

TESE

1037

A Influência das Correntes de  
Fuga AC (60 Hz) Advindas dos Cabos  
Para - Raios na Corrosão das  
Fundações Metálicas das Linhas  
de Transmissão AC - Tipo Grelha  
Dimensionada



**ESCOLA FEDERAL DE ENGENHARIA DE ITAJUBÁ – EFEI  
PPG – PRÓ-DIRETORIA DE PESQUISA E PÓS GRADUAÇÃO**

**A INFLUÊNCIA DAS CORRENTES DE  
FUGA AC (60 Hz) ADVINDAS DOS CABOS  
PÁRA-RAIOS NA CORROSÃO DAS  
FUNDAÇÕES METÁLICAS DAS LINHAS  
DE TRANSMISSÃO AC - TIPO GRELHA  
DIMENSIONADA**

**FRANCISCO ROMÁRIO WOJCICKI**



**Dissertação submetida à Escola Federal de Engenharia de Itajubá – MG,  
para a obtenção do grau de Mestre Engenharia**

**Itajubá, novembro de 1999**

**A INFLUÊNCIA DAS CORRENTES DE FUGA AC (60 Hz) ADVINDA  
DOS CABOS PÁRA-RAIOS, NA CORROSÃO DAS FUNDACÕES  
METÁLICAS DAS LINHAS DE TRANSMISSÃO AC - TIPO GRELHA  
DIMENSIONADA**

**FRANCISCO ROMÁRIO WOJCICKI**

Esta dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA.

Especialidade em Engenharia Elétrica e aprovada em sua forma final pelo orientador, co-orientador e membros da banca examinadora.

---

Prof. Manoel Eduardo Miranda Negrisoli, Dr.  
(Orientador)

---

Prof. César Vitório Franco, PhD  
(Co-orientador)

Banca Examinadora:

---

Prof. Oscar Armando Maldonado Astorga, Dr.  
(1º Examinador – FEG - UNESP)

---

Prof. César Vitório Franco, PhD  
(2º Examinador - Co-orientador - UFSC)

---

Prof. Cláudio Ferreira, Dr.  
(3º Examinador - EFEI)

---

Prof. Manoel Eduardo Miranda Negrisoli, Dr.  
(4º Examinador – Orientador - ANEEL)

## AGRADECIMENTOS

**“.....O que importa não é o que você  
conhece,  
mas o que você faz com aquilo que  
conhece...”**

**Roberto Cintra Leite**

## AGRADECIMENTOS

---

Agradeço ao Prof. Manoel Eduardo Miranda Negrisoni, D.Sc.(Orientador) e ao Prof. Cesar Vitorio Franco, PhD.(Co-Orientador) pela paciência, dedicação, atenção e perseverança com que acompanharam os meus trabalhos dando o apoio incondicional ao meu crescimento profissional.

Agradeço ao colega e doutorando da UFSC Valner Brusamarello, M.Sc. pelos valiosos comentários e sugestões apresentados ao presente trabalho e pela parceria na elaboração de artigos científicos durante esta jornada de trabalho.

Agradeço a ELETROSUL – Empresa Transmissora de Energia Elétrica do Sul do Brasil S/A, empresa da qual faço parte como engenheiro desde 1983, pelo suporte financeiro e situacional proporcionando meios para que a minha evolução profissional prosseguisse de forma plena e crescente, a qual proporcionou a mim o CESE/97 – Curso de Especialização em Sistemas Elétricos de Potência culminando na Dissertação de Mestrado.

Agradeço ao colega Eng. Márcio Pereira Zimmermann, Assistente Executivo da Diretoria Técnica da ELETROSUL, pela indicação para o Curso CESE, pelo apoio e confiança na minha pessoa e pela delegação, após a conclusão do Curso, para um trabalho direcionado à aplicação na empresa o qual culminou nesta Dissertação de Mestrado.

Agradeço a Sílvia Regina Molski, ainda minha noiva/97 e hoje minha esposa, a qual compartilhou a todo o momento das horas de satisfação e angústias durante a realização deste trabalho, compreendendo, relevando, consolando, incentivando enfim, contribuindo de forma especial na minha vida pessoal e profissional.

Aos meus pais, Zygmunt Wojcicki e Therezinha Maria Wojcicki, razão maior da minha vida, pelo grande amor e apoio em todas as horas, embora morando distantes, sempre se fizeram muito presente em todos os momentos da minha preparação pessoal e profissional.

Agradeço a todos os meus colegas de trabalho da Eletrosul, que colaboraram direta ou indiretamente neste trabalho, mas de modo especial: Eng. Davenir Maggi Schaeffer, Eng. Hamilton Sell, Eng. Eduardo Nicolazzi, Quím. Jovani Afonso de Souza, Tec. Quím. Renieri Paulo Salai, Eletricistas de LT das Regionais de Transmissão de Santa Catarina e do Paraná, pelo apoio que recebi, pelas contribuições técnicas que me foram confiadas e pelos trabalhos que juntos pudemos desenvolver, sem esta colaboração não seria possível a elaboração desta Dissertação de Mestrado.

|  |     |
|--|-----|
| LISTA DE FIGURAS E TABELAS.....  | ix  |
| RESUMO.....  | xii |
| ABSTRACT.....  | xiv |
| <br>   |     |
| <b>CAPÍTULO 1</b>  |     |
| <b>INTRODUÇÃO</b>  |     |
| 1.1 GENERALIDADES.....   | 1   |
| 1.2 CUSTOS DA CORROSÃO.....  | 2   |
| 1.3 SITUAÇÃO DA CORROSÃO EM FUNDAÇÕES TIPO GRELHA DIMENSIONADA<br>NAS LT DA ELETROSUL..... | 5   |
| <br>   |     |
| <b>CAPÍTULO 2</b>  |     |
| <b>FUNDAMENTOS TÉCNICOS</b>  |     |
| 2.1 POTENCIAL DE ELETRODO PADRÃO.....  | 7   |
| 2.2 ELETRODO DE REFERÊNCIA.....  | 9   |
| 2.2.1 SINAL DO POTENCIAL DE ELETRODO DE REFERÊNCIA.....                                    | 11  |
| 2.3 POLARIZAÇÃO.....   | 12  |
| 2.4 DIAGRAMA DE POURBAIX.....  | 19  |
| 2.5 CORROSÃO.....  | 22  |
| 2.5.1 MECANISMO QUÍMICO DA CORROSÃO.....   | 25  |
| 2.5.2 MECANISMO ELETROQUÍMICO DA CORROSÃO.....   | 27  |
| 2.5.3 TIPOS DE CORROSÃO.....   | 29  |
| 2.5.3.1 QUANTO AO TIPO DE CORROSÃO.....  | 29  |
| 2.5.3.2 QUANTO AO MEIO.....  | 30  |
| 2.6 PROCESSOS DE CORROSÃO.....   | 31  |
| 2.6.1 CORROSÃO NO SOLO.....  | 31  |
| 2.6.1.1 MEDIDA DO POTENCIAL DE ÓXIDO-REDUÇÃO DO SOLO.....                                  | 34  |

|  |    |
|--|----|
| 2.6.1.2 DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE DE DESPOLARIZAÇÃO DO SOLO .....                                  | 35 |
| 2.6.2 CORROSÃO GALVÂNICA OU BIMETÁLICA .....   | 36 |
| 2.6.3 CORROSÃO MICROBIOLÓGICA .....  | 39 |
| 2.6.3.1 CORROSÃO DEVIDO À FORMAÇÃO DE ÁCIDOS .....   | 40 |
| 2.6.3.2 OXIDAÇÃO DE PIRITAS E ÁCIDO SULFÚRICO POR FERROBACILLUS FERROOXIDANS .....                   | 41 |
| 2.6.3.3 FUNGOS OU BACTÉRIAS CELULOLÍTICAS QUE FERMENTAM MATERIAL CELULÓSICO A ÁCIDOS ORGÂNICOS ..... | 41 |
| 2.6.3.4 CORROSÃO POR DESPOLARIZAÇÃO CATÓDICA .....   | 42 |
| 2.6.4 CORROSÃO ELETROLÍTICA .....  | 46 |
| 2.6.5 CORROSÃO POR AERAÇÃO DIFERENCIAL.....  | 50 |

### CAPÍTULO 3

#### MÉTODOS DE PROTEÇÃO POR REVESTIMENTOS DE ZINCO

|  |    |
|--|----|
| 3.1 TIPOS DE REVESTIMENTOS DE ZINCO .....  | 53 |
| 3.2 PROCESSO DE ZINCAGEM POR IMERSÃO (GALVANIZAÇÃO).....                                   | 54 |
| 3.3 PROCESSO DE METALIZAÇÃO POR ASPERSÃO TÉRMICA.....                                      | 56 |
| 3.4 INFLUÊNCIA DE DIVERSOS PARÂMETROS NA GALVANIZAÇÃO .....                                | 58 |
| 3.5 FUNÇÃO BÁSICA DA GALVANIZAÇÃO NAS ESTRUTURAS METÁLICAS DAS TORRES DE TRANSMISSÃO ..... | 60 |
| 3.6 NORMAS BRASILEIRAS RELATIVAS À GALVANIZAÇÃO .....                                      | 60 |

### CAPÍTULO 4

#### AVALIAÇÃO DO ESTADO DA CORROSÃO EM ESTRUTURAS METÁLICAS GALVANIZADAS ENTERRADAS

|  |    |
|--|----|
| 4.1 MÉTODOS DE AVALIAÇÃO DO ESTADO DA CORROSÃO EM ESTRUTURAS ENTERRADAS..... | 62 |
| 4.1.1 MÉTODO VISUAL.....   | 62 |
| 4.1.2 MÉTODO DA MEDIÇÃO DO POTENCIAL DE CORROSÃO .....                       | 62 |
| 4.1.2.1 PROCEDIMENTO DE MEDIÇÃO .....  | 62 |

|  |    |
|--|----|
| 4.1.2.2 ANÁLISE DO INDICADOR DA CORROSÃO.....  | 66 |
| 4.1.2.3 INTERFERÊNCIA NAS MEDIÇÕES .....   | 67 |
| 4.1.2.4 CRITÉRIOS DE AVALIAÇÃO .....   | 68 |
| 4.2 MEDIÇÃO DO POTENCIAL DE CORROSÃO EM DOIS PONTOS.....                                 | 69 |
| 4.2.1 MEDIÇÃO DA RESISTÊNCIA DE ATERRAMENTO DAS FUNDAÇÕES EM<br>GRELHA DIMENSIONADA..... | 69 |
| 4.2.2 MÉTODO DA MEDIÇÃO DO POTENCIAL EM DOIS PONTOS.....                                 | 70 |
| 4.3 FORMA PONTUAL DA LEI DE OHM .....  | 72 |

## CAPÍTULO 5

### AS CORRENTES DE FUGA E A CORROSÃO ELETROLÍTICA

|  |    |
|--|----|
| 5.1 CORRENTE DE FUGA - MODÉLO DE BURNETT ..... | 75 |
| 5.2 CORROSÃO POR CORRENTE DE FUGA .....        | 76 |
| 5.3 DISCUSSÕES SOBRE A CORRENTE DE FUGA.....   | 79 |

## CAPÍTULO 6

### PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

|  |    |
|--|----|
| 6.1 GENERALIDADES .....  | 85 |
| 6.2 ROTEIRO DOS ENSAIOS REALIZADOS PARA A MEDIÇÃO EM CAMPO DA<br>CORRENTE DE FUGA.....   | 86 |
| 6.3 ROTEIRO DE TESTES.....   | 90 |
| 6.4 MEDIÇÃO DOS POTENCIAIS EM CAMPO UTILIZANDO O MÉTODO<br>ELETRODO PADRÃO DE Cu/CuSO <sub>4</sub> – MEDIÇÃO EM DOIS PONTOS..... | 92 |

## CAPÍTULO 7

### ANÁLISE DOS RESULTADOS E DISCUSSÕES

|  |    |
|--|----|
| 7.1 RESULTADO E ANÁLISE DOS VALORES DA CORRENTE DE FUGA MEDIDA<br>NAS FUNDAÇÕES DAS TORRES DE TRANSMISSÃO 306 e 260..... | 94 |
|--|----|

|  |     |
|--|-----|
| 7.2 ANÁLISE DA FORMA DE ONDA DA CORRENTE DE FUGA MEDIDA NAS<br>FUNDAÇÕES DAS TORRES DE TRANSMISSÃO 306 e 260.....              | 96  |
| 7.3 RESULTADOS DAS MEDIÇÕES DE POTENCIAL MEDIDAS EM CAMPO NAS<br>FUNDAÇÕES DAS TORRES DE TRANSMISSÃO DO SISTEMA ELETROSUL..... | 97  |
| 7.4 ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA CORRENTE DE FUGA NA MEDIÇÃO DE<br>POTENCIAL, MEDIDA EM CAMPO, NA FUNDAÇÃO DA TORRE 306.....       | 99  |
| 7.5 ANÁLISE DA INCLINAÇÃO DAS MEDIÇÃO DE POTENCIAL, MEDIDAS EM<br>CAMPO NAS FUNDAÇÕES DAS TORRES 305, 306 E 307.....           | 104 |
| 7.6 INSPEÇÃO DAS FUNDAÇÕES DAS TORRES 305, 306 e 307.....  | 105 |
| <br>CAPÍTULO 8   |     |
| CONCLUSÕES.....  | 109 |
| <br>CAPÍTULO 9   |     |
| RECOMENDAÇÕES E SUGESTÕES.....   | 111 |
| <br>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....  | 112 |

## LISTA DE FIGURAS E TABELAS

|   |    |
|---|----|
| <i>Figura 1.1.1 - Fundação tipo grelha dimensionada.....</i>  | 2  |
| <i>Figura 2.1.1 - Esquemas da semi célula galvânica.....</i>  | 7  |
| <i>Figura 2.1.2 - Célula de corrosão ou pilha de corrosão.....</i>  | 8  |
| <i>Figura 2.2.1 - Esquema ilustrativo dos eletrodos de campo .....</i>  | 10 |
| <i>Figura 2.2.2 - Vista mais detalhada (em corte) do eletrodo .....</i>   | 10 |
| <i>Figura 2.3.1 - Curvas de polarização .....</i>   | 16 |
| <i>Figura 2.3.2 - Influência da polarização anódica.....</i>  | 16 |
| <i>Figura 2.3.3 - Esquema da curva de polarização catódica (Região de Tafel).....</i>   | 18 |
| <i>Figura 2.4.1 - Diagrama de Pourbaix para o Zinco .....</i>   | 20 |
| <i>Figura 2.4.2 - Efeito do pH na corrosão do Zinco .....</i>   | 22 |
| <i>Figura 2.5.1 - O ciclo do metais .....</i>   | 23 |
| <i>Figura 2.5.1.1 - Leis da velocidade de crescimento e camadas de óxido .....</i>  | 25 |
| <i>Figura 2.6.1.1 - Perfil da resistividade do solo .....</i>   | 34 |
| <i>Figura 2.6.2.1 - Representação esquemática de um processo de corrosão .....</i>  | 37 |
| <i>Figura 2.6.4.1 - Detalhe da corrosão por corrente de fuga .....</i>  | 48 |
| <i>Figura 2.6.5.1 - Esquema da pilha de concentração diferencial .....</i>  | 50 |
| <i>Figura 2.6.5.2 - Esquema de corrosão na linha d'água.....</i>  | 51 |
| <i>Figura 3.2.1 - Micrografia de um revestimento galvanizado típico.....</i>  | 55 |
| <i>Figura 3.3.1 - Característica da AT e seqüência de eventos típicos.....</i>  | 57 |
| <i>Figura 4.1.2.1 - Posição da medição nas estruturas autoportantes .....</i>   | 63 |
| <i>Figura 4.1.2.2 - Diagrama demonstrativo para a medição do potencial de eletrodo nas torres autoportantes .....</i>             | 64 |
| <i>Figura 4.1.2.3 - Posição da medição nas estruturas estaiadas .....</i>   | 64 |
| <i>Figura 4.1.2.4 - Gráfico do potencial do pé de torre .....</i>   | 65 |
| <i>Figura 4.1.2.5 - Gráfico do potencial de repouso verdadeiro do pé de torre.....</i>  | 66 |
| <i>Figura 4.2.1.1 - Medição de resistência de aterramento da fundação em grelha dimensionada Método de Wenner .....</i>           | 69 |
| <i>Figura 4.2.1.2 - Curva da resistência de aterramento de uma haste vertical .....</i>   | 70 |
| <i>Figura 4.2.2.1 - Medição de potencial de corrosão das fundações utilizando um eletrodo padrão de Cu/CuSO<sub>4</sub> .....</i> | 71 |

|   |     |
|---|-----|
| <i>Figura 4.2.2.2 - Tendência da curva de potencial de corrosão das fundações em grelha dimensionada utilizando um eletrodo padrão para a medição .....</i> | 72  |
| <i>Figura 4.3.1 – Distribuição das correntes elétricas no solo .....</i>  | 73  |
| <i>Figura 4.3.2 – Distribuição das correntes de fuga no solo .....</i>  | 73  |
| <i>Figura 5.1.1 – Modelo proposto por Burnett para a circulação da corrente de fuga em fundações de linhas de transmissão.....</i>                          | 75  |
| <i>Figura 5.2.1 - Detalhe da proteção catódica por corrente impressa.....</i>   | 77  |
| <i>Figura 5.2.2 - Detalhe da proteção catódica por corrente impressa ao longo da tubulação .....</i>  | 77  |
| <i>Figura 5.2.3 - Trecho de LT onde podem circular correntes de fuga .....</i>  | 78  |
| <i>Figura 5.3.1 - Efeito da corrente CA na taxa de corrosão.....</i>  | 81  |
| <i>Figura 5.3.2 - Efeito da corrente CA na taxa de corrosão em ambiente úmido .....</i>   | 81  |
| <i>Figura 5.3.3 - Diagrama de Tafel para um processo corrosivo (a) sem componente CA; (b) com componente CA .....</i>                                       | 82  |
| <i>Figura 5.3.4 – Excursão do sinal CA relativa e absoluta .....</i>  | 83  |
| <i>Figura 6.2.1 - (a) Localização física das pontinas;(b) Desenho esquemático das pontinas em planta com instalação de isoladores de vidro .....</i>        | 86  |
| <i>Figura 6.2.2 - Diagrama esquemático da corrente de fuga <math>I_x</math> e <math>I_y</math>.....</i>   | 87  |
| <i>Figura 6.2.3 - Esquemático do circuito para a medição de <math>I_x</math> e <math>I_y</math>.....</i>  | 89  |
| <i>Figura 6.2.4 - Foto do circuito para a medição da corrente de fuga <math>I_x</math> e <math>I_y</math>.....</i>  | 90  |
| <i>Figura 6.4.1 - Esquemático da medição de potencial com o eletrodo padrão de <math>Cu/CuSO_4</math> utilizando o método em dois pontos .....</i>          | 93  |
| <i>Figura 7.1.1 - Esquemático simplificado do circuito medido.....</i>  | 95  |
| <i>Figura 7.2.1 – Ilustração típica da forma de onda da corrente de fuga; (a) na fundação da torre 306 e (b) na fundação da torre 260 .....</i>             | 96  |
| <i>Figura 7.3.1 - (a) inclinação negativa ;(b) inclinação positiva.....</i>   | 98  |
| <i>Figura 7.4.1 - Esquemático das torres e os resultados das medições de potencial nas torres 305, 306 e 307.....</i>                                       | 100 |
| <i>Figura 7.4.2 - Esquemático das torres e os resultados das medições de potencial na torre 306.....</i>  | 100 |
| <i>Figura 7.4.3 - Esquemático das torres e os resultados das medições de potencial nas torres 305, 306 e 307.....</i>                                       | 101 |
| <i>Figura 7.4.4 - Esquemático das torres e o resultado da medição de potencial na torre 306.....</i>  | 101 |
| <i>Figura 7.4.5 - Esquemático das torres e o resultado das medições de potencial nas torres 305, 306 e 307.....</i>   | 102 |

|   |            |
|---|------------|
| <i>Figura 7.4.6 - Esquemático das torres e o resultado das medições de potencial nas torres 305, 306 e 307.....</i> | <i>102</i> |
| <i>Figura 7.5.1 - Curvas de potencial da fundação da torre 305 .....</i>  | <i>104</i> |
| <i>Figura 7.5.2 - Curvas de potencial da fundação da torre 306 .....</i>  | <i>105</i> |
| <i>Figura 7.5.3 - Curvas de potencial da fundação da torre 307 .....</i>  | <i>105</i> |
| <i>Figura 7.6.1 - Estado físico da fundação da torre 305 .....</i>  | <i>106</i> |
| <i>Figura 7.6.2 - Estado físico da fundação da torre 307 .....</i>  | <i>107</i> |
| <i>Figura 7.6.3 - Estado físico da fundação da torre 306 .....</i>  | <i>107</i> |
| <br>  |            |
| <i>Tabela 1.2.1 - Custos de corrosão.....</i>   | <i>3</i>   |
| <i>Tabela 1.3.1 – Corrosão nas linhas de transmissão por classe de tensão .....</i>                                 | <i>5</i>   |
| <i>Tabela 1.3.2 – Corrosão em linhas de transmissão – Situação atual .....</i>                                      | <i>6</i>   |
| <i>Tabela 2.2.1 - Série Eletromotriz.....</i>   | <i>12</i>  |
| <i>Tabela 2.5.1 - Leis da velocidade de oxidação, em diferente intervalos de temperatura de metais puros .....</i>  | <i>27</i>  |
| <i>Tabela 2.6.4.1 - Massa de metal perdido em corrosão eletrolítica.....</i>  | <i>49</i>  |
| <i>Tabela 5.3.1 – Resultado dos testes de laboratório.....</i>  | <i>84</i>  |
| <i>Tabela 7.3.1 - Quantidade de fundações medidas e o perfil de potencial encontrado.....</i>                       | <i>98</i>  |
| <i>Tabela 7.4.1 – Resumo dos resultados das medições de potencial relativo à torre 306 .....</i>                    | <i>103</i> |

Em países com dimensões continentais como o Brasil as linhas de transmissão são os elos de ligação entre a geração e o consumo, transportando elevados blocos de energia para a alimentação dos grandes centros consumidores.

A medida que os níveis de tensão foram sendo elevados para maximizar a transmissão e minimizar as perdas, as estruturas de madeira e concreto das linhas foram cedendo lugar às de aço galvanizado por inúmeras facilidades. Estas estruturas metálicas, em especial as fundações do tipo grelha dimensionada, são projetadas para suportar 30 anos de serviço enterradas diretamente nos solos, uma vez que este revestimento galvanizado apresenta uma elevada proteção ao metal base resistente à corrosão. Cabe salientar que este material (aço galvanizado) da fundação é o mesmo empregado no restante das demais partes constituintes de uma torre de transmissão.

Com a implantação do sistema de transmissão em extra alta tensão – 525 kV, notamos num curto intervalo de tempo, o aparecimento precoce da corrosão nas fundações galvanizadas das linhas de transmissão. Estas constatações foram corroboradas por medições de potencial do sistema torre-solo, com a utilização do eletrodo padrão Cu/CuSO<sub>4</sub>.

Foram medidos o módulo e o ângulo destas correntes de fuga advindas dos cabos pára-raios X e Y (as torres autoportantes possuem dois cabos pára-raios instalados), as quais são induzidas por campos eletromagnéticos com as linhas energizadas e os resultados apontam para valores significativos destas correntes, sendo elas as responsáveis pela aceleração do processo corrosivo das fundações em grelha dimensionada. A corrosão nas fundações das torres de transmissão está associada diretamente à circulação destas correntes de fuga (*stray current*), as quais fecham o circuito elétrico, via solo, entre torres adjacentes.

O método utilizado para a análise da influência destas correntes de fuga nas fundações em grelha dimensionada, “método de medição em dois pontos”, relaciona os valores encontrados de potencial de corrosão em mV e a inclinação da curva de polarização obtida (inclinação positiva ou negativa) com o processo eletroquímico nas fundações, apontando para um estado anódico (corrosão) ou catódico (redução) da

ferragem da fundação.

O potencial de corrosão é alterado e o processo anódico é minimizado quando os cabos pára-raios são isolados eletricamente das linhas de transmissão.

ABSTRACT

In operation of powerlines structures, such as steel, the transmission lines have the high voltage the source of generation and there is consumption of energy, involving large amounts of energy in the big centers of consumption.

Due the elevation of the voltage, in order to minimize the transmission and to minimize the losses, the wooden and the concrete structure to support the lines have to be made of galvanized steel, with other advantages. These metallic structures, especially those with foundations of the gal type, are proposed to offer a service life of 30 years. Based directly in the soil, the galvanized coating presents a very resistant protection against the corrosion of the metal based in the foundation. The buried part of the structure, if should be mentioned, is made of the same material as the rest of the metallic structure.

In connection with the implementation of the transmission structure with high voltage, 132 kV, it was observed that, after a short period of time, the galvanized buried parts of the foundations of the structures under study show signs of significant corrosion. These observations were verified through measurements of the open-circuit potential using the standard Cu/CuSO<sub>4</sub> electrode.

The results are the result of the stray currents, resulting from the lightning rod cables X and Y (the well-recognized tower have two lightning-rod cables, labeled by electromagnetic fields of the energized lines, were measured and the results showed significant values of these currents, which are responsible of the acceleration of the corrosion process of the foundations of the metallic towers of the gal type. The corrosion potential in the foundations of metallic transmission towers is directly related to the generation of these stray currents, which show the electric current flow, with the neighbouring towers.

The method used for the analysis of the influence of these stray currents on the foundations of the gal type, the "method of measurement in two points", which the measured values of the potential of the electrode in relation to the reference electrode (copper/copper sulfate) with the silver-silver chloride process existing in the foundation, pointing at an anodic electrode (cathode) or at a

In countries of continental dimensions, such as Brazil, the transmission lines form the links between the centres of generation and those of consumption of energy, transporting huge amounts of energy to the big centres of consumption.

Due the elevation of the voltage, in order to maximise the transmission and to minimise the losses, the wooden and the concrete structures to support the lines gave way to those made of galvanised steel, wich offer innumerable advantages. These metallic structure, particulary those wich foundations of the grid type, and projected to offer a service life of 30 years. Placed directly in the soil, the galvanised coating present a very resistant protection against the corrosion of the metal buried in the foundation. The buried part of the strucuture, it should be mentioned, is made of the same material as the rest of the metallic structure.

In connection with the implantation of the transmission system in extra-high voltage, 525 kV, it was observed that, after a short period of time, the galvanised buried parts of the foundations of the transmission tower show signs of premature corrosion. These observations were verified through measurements of the tower-soil potential, using the standard Cu/CuSO<sub>4</sub> electrode.

The module and the angle of the stray currents, resulting from the lightning rod cables X and Y (the self-supporting tower have two lightning rod cables), induced by eletromagnetic fields of the energised lines, were measured and the results showed significant values of these currents, which are responsible of the acceleration of the corrosion process of the foundations of the metallic towers of the grid type. The corrosion provoked in the foundations of metallic transmission towers is directly linked to the circulation of these stray currents, which close the electric circuit, through the soil, with the neighbouring towers.

The method used for the analysis of the influence of these stray currents on the foundations of the grid type, the “method of measurement in two points”, relates the encountered values of the potential of the corrosion in mV and the inclination of the polarisation curve obtained (positive or negative inclination) with the eletro-chemical process occurring in the foundation, pointing at an anodic condition (corrosion) or at a

cathodic condition (reduction) of the metal buried in the foundation.

The potential of the corrosive process is altered and the anodic process is minimised if and when the lightning rod cables are electrically isolated from the transmission lines.

## 1.1. GENERALIDADES

Com o crescimento exponencial do consumo de energia elétrica dos mais diversos setores da sociedade moderna, seja na área residencial ou no setor comercial ou ainda no segmento industrial, existe a necessidade planejada de transportar grandes blocos de energia desde o ponto de geração até o usuário para o sistema receptor. Atualmente associados a estas linhas que estão a grandes distâncias do ponto de consumo, estão as linhas de transmissão as quais são indispensáveis para a distribuição de energia elétrica.

A medida que os níveis de tensão foram sendo elevados para possibilitar o transporte e atender as perdas, as estruturas de suporte e suporte foram sendo feitas de metal galvanizado as quais apresentam melhores vantagens, são mais duráveis, os materiais de cura, montagem de torres, substituição das peças de torres, manutenção de peças reservas e estratégias de locais são mais e mais seguras.

As linhas de transmissão que utilizam estruturas metálicas apresentam alto potencial para atender longos períodos de operação, atingindo em média cerca de 30 anos de serviço.

Em sua maioria, as fundações das linhas de transmissão, são do tipo grade dimensionada conforme a Fig.1.1.1, sendo-as construídas com a mesma ferragem empregada no momento das demais partes estruturais de uma linha de transmissão, ficando a mesma exposta.

O processo de deterioramento das fundações é feito por meio mecânico, pois a terra é compactada com as vibrações que fornecem a energia necessária à compactação das camadas de solo, tornando desta forma um sistema muito mais resistente das torres, dando a estabilidade necessária a mesma. Como estas estruturas são utilizadas nos mais diversos tipos de solos, estas fundações estão sujeitas a diferentes processos de corrosão os quais são objeto de estudos laboratoriais de teste de trabalho.

**INTRODUÇÃO**

**1.1 GENERALIDADES**

Com o constante crescimento do consumo de energia elétrica dos mais diversos setores da sociedade moderna, seja na área residencial ou no ramo comercial ou ainda no segmento industrial, existe a necessidade premente de transportar grandes blocos de energia desde o ponto de geração até a entrega para o efetivo consumo. Normalmente associados a estes blocos que estão a grandes distâncias do ponto de consumo, estão as linhas de transmissão as quais são indispensáveis para o suprimento da energia elétrica.

A medida que os níveis de tensão foram sendo elevados para maximizar a transmissão e minimizar as perdas, as estruturas de madeira e concreto foram cedendo lugar às de metal galvanizadas as quais apresentam maiores vantagens, tais como transporte dos materiais da torre, montagem da torre, manutenção das peças da torre, armazenamento de peças reservas e estratégias de locais com torres e peças reservas.

As linhas de transmissão que utilizam estruturas metálicas galvanizadas são projetadas para atenderem longos períodos de operação, atingindo em média cerca de 30 anos de serviço.

Em sua maioria, as fundações destas linhas de transmissão, são do tipo grelha dimensionada conforme a Fig.1.1.1, fundação esta construída com a mesma ferragem empregada na montagem das demais partes constituintes de uma linha de transmissão, ficando a mesma enterrada.

O processo de soterramento destas fundações é feita por meio mecânico, pois a terra é compactada com apiloadores que fornecem a energia necessária à recomposição das camadas do solo tornando desta forma um sistema sólido para a sustentação das torres, dando a resistência mecânica necessária a mesma. Como estas estruturas são colocadas nos mais diversos tipos de solos, estas fundações estão sujeitas a diferentes processos de corrosão os quais são objetivo da Revisão Bibliográfica deste trabalho.

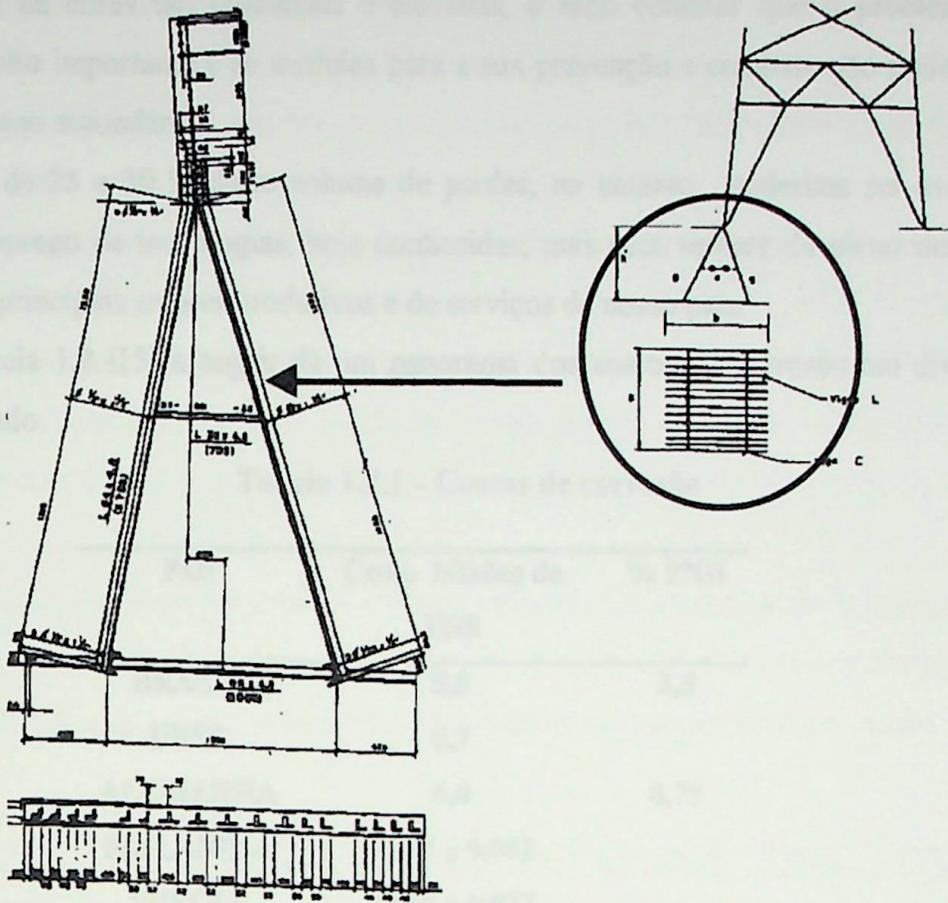


Fig.1.1.1 - Fundação tipo grelha dimensionada

## 1.2 CUSTOS DA CORROSÃO

A corrosão afeta os mais diferentes setores e segmentos da atividade humana. Levantamentos efetuados no Hemisfério Norte indicam que os custos anuais causados pela corrosão representam, aproximadamente, 3,5 % do PNB (Produto Nacional Bruto) de países industrializados. Na ausência de estatísticas, o custo da corrosão no Brasil tem sido estimado em US\$ 5,8 bilhões de dólares/ano[5].

O primeiro levantamento realizado com vistas à avaliação do custos da corrosão foi feito nos EUA, por determinação do Congresso, que atribuiu esta missão ao National Bureau of Standards o qual, por sua vez, contratou o Batelle Columbus Laboratories (Columbus, Ohio) para auxiliá-lo neste trabalho. As conclusões deste levantamento são surpreendentes, principalmente por mostrar que o custo anual da corrosão é muito superior ao que até então havia sido estimado. O valor médio encontrado gasto para o combate a corrosão foi de 70 bilhões de dólares.

Diante de cifras tão confiáveis e elevadas, é fácil concluir que o problema da corrosão é muito importante e as medidas para a sua prevenção e combate não podem ser relegadas a plano secundário.

Cerca de 25 a 30 % deste volume de perdas, no entanto, poderiam ser evitadas através de emprego de tecnologias, hoje conhecidas, mas nem sempre de pleno domínio por parte dos principais setores produtivos e de serviços de nosso país.

A Tabela 1.2.1[5] a seguir dá um panorama dos custos da corrosão em diversos países do mundo.

**Tabela 1.2.1 - Custos de corrosão**

| <b>País</b>      | <b>Custo bilhões de<br/>US\$</b> | <b>% PNB</b> |
|------------------|----------------------------------|--------------|
| <b>BRASIL</b>    | <b>5,8</b>                       | <b>3,5</b>   |
| <b>URSS</b>      | <b>6,7</b>                       | <b>-</b>     |
| <b>ALEMANHA</b>  | <b>6,0</b>                       | <b>0,75</b>  |
| <b>FINLÂNDIA</b> | <b>0,047 a 0,062</b>             | <b>-</b>     |
| <b>SUÉCIA</b>    | <b>0,058 a 0,077</b>             | <b>-</b>     |
| <b>ÍNDIA</b>     | <b>0,32</b>                      | <b>-</b>     |
| <b>AUSTRÁLIA</b> | <b>0,550</b>                     | <b>1,5</b>   |
| <b>JAPÃO</b>     | <b>9,2</b>                       | <b>1,8</b>   |

A corrosão constitui uma das principais causas de deterioração de equipamentos e estruturas metálicas no setor elétrico, resultando em custos muitos elevados e até mesmo em interrupção do suprimento de energia.

Dentre os principais casos observados pode-se chamar atenção à corrosão de fundações metálicas de torres de transmissão.

Esta pode ser causada tanto pelas propriedades físicas, químicas, físico-químicas e biológicas do solo como por fatores externos tais como, correntes de interferência, contatos de metais dissimilares e outros.

Assim sendo, têm sido desenvolvidas e adaptadas técnicas eletroquímicas práticas que visam facilitar a detecção da tendência e/ou grau de corrosão nessas estruturas, sem que haja necessidade de escavação sistemática de cada pé de torre.

Apesar de se saber que a corrosão custa dinheiro, isto raramente parece ser considerado antes que a corrosão se tenha iniciado. E nessa altura, procuram-se soluções

de emergência, não havendo tempo para fazer um estudo econômico das possibilidades de proteção.

Os custos envolvidos nos processos anticorrosivos podem ser classificados em:

- a) custo inicial de um esquema anticorrosivo;
- b) as economias que o esquema proporcionará durante o período para o qual foi projetado;
- c) o custo da manutenção do esquema no mesmo período.

Observa-se que a alínea a) e c) não são muito difíceis de avaliar, admitindo que a duração pretendida é conhecida; a alínea b) no entanto, envolve alguns custos de difícil avaliação [1].

A galvanização é um processo largamente utilizado não só em torres de transmissão e estruturas de subestações, como em condutores de alumínio com alma de aço, ferragens e acessórios para linhas de transmissão de modo a diminuir os custos contra a corrosão.

### 1.3 SITUAÇÃO DA CORROSÃO EM FUNDAÇÕES TIPO GRELHA DIMENSIONADA NAS LT DA ELETROSUL

Há uma grande preocupação no Setor Elétrico Nacional, em especial na Eletrosul, com referência às fundações tipo grelha dimensionada das torres das linhas de transmissão, devido ao efeito da corrosão causado pelo solo. O longo período em operação das torres de transmissão nas quais foram detectada corrosão, bem como devido ao fato de já ter sido detectado corrosão também em torres de transmissão com poucos anos de operação, como por exemplo na LT Itá - Campos Novos 525 kV, levou-nos a iniciar um trabalho de pesquisa, com o intuito de encontrar um método de proteção eficaz onde o custo benefício seja atraente. Segundo levantamentos desta pesquisa, o custo de recuperação das fundações (utilizando métodos mecânicos) e aplicação de pintura a base de alcatrão de hulha nas quatro grelhas de uma (01) torre de 525 KV, apresenta valores da ordem de R\$ 4.000,00 (dados da Eletrosul).

A seguir as Tabelas 1.3.1 e 1.3.2 mostram de forma sucinta, o atual estado das fundações tipo grelhas das linhas de transmissão do sistema da ELETROSUL, inspecionadas recentemente e também o método de avaliação utilizado na empresa para determinar o estado da corrosão em nossas fundações.

Tabela 1.3.1 - Corrosão nas linhas de transmissão por classe de tensão

| CLASSE DE TENSÃO kV | QUANTIDADE DE LT NO SISTEMA ELETROSUL | QUANTIDADE DE LT COM CORROSÃO | TEMPO DE OPERAÇÃO (ANOS) |
|---------------------|---------------------------------------|-------------------------------|--------------------------|
| 138                 | 24                                    | 04 = 16,7 %                   | 27                       |
| 230                 | 41                                    | 07 = 17,0 %                   | 17 a 20                  |
| 500                 | 19                                    | 04 = 21,0 %                   | 1 a 11                   |

Tabela 1.3.2- Corrosão em linhas de transmissão - Situação Atual

| ITEM | LT            | TEMPO EM OPERAÇÃO (ANOS) | SITUAÇÃO DA FUNDAÇÃO ATUAL | OBSERVAÇÕES                      |
|------|---------------|--------------------------|----------------------------|----------------------------------|
| 01   | PFU/FAR II    | 21                       | BOA                        |                                  |
| 02   | JOI/CBA I, II | 24,17                    | REGULAR                    | 18% COM CORROSÃO                 |
| 03   | MGA/LON       | 14                       | REGULAR                    | POLUIÇÃO ATMOSFÉRICA             |
| 04   | ARE/SMS       | 18                       | REGULAR                    | POLUIÇÃO INDUSTRIAL              |
|      | CBA/SMS       | 18                       | REGULAR                    |                                  |
|      | ARE/CBA       | 15                       | REGULAR                    |                                  |
| 05   | JUP/MIM I,II  | 28                       | REGULAR                    | CORROSÃO NAS FUNDAÇÕES           |
|      | MIM/CGR       |                          | REGULAR                    |                                  |
| 06   | ARE/CNO       | 2                        | REGULAR                    | CORROSÃO NA JUNÇÃO PÉ/GRELHA     |
| 07   | CBA/BLU       | 10                       | REGULAR                    | CORROSÃO NAS FUNDAÇÕES           |
| 08   | ITÁ/CNO       | 1                        | REGULAR                    | CORROSÃO PREMATURA NAS FUNDAÇÕES |

- Obs.: PFU/FAR II - LT Passo Fundo - Farroupilha - 230 kV  
JOI/CBA I, II - LT Curitiba - Joinville I e II - 230 kV  
MGA/LON - LT Maringá - Londrina - 230 kV  
ARE/SMS - LT Areia - São Mateus do Sul - 230 kV  
CBA/SMS - LT Curitiba - São Mateus do Sul - 230 kV  
ARE/CBA - LT Areia - Curitiba - 230 kV  
JUP/MIM I,II - LT Jupia - Mimoso I e II - 230 kV  
MIM/CGR - LT Mimoso - Campo Grande - 230 kV  
ARE/CNO - LT Areia - Campos Novos - 525 kV  
CBA/BLU - LT Curitiba - Blumenau - 525 kV  
ITÁ/CNO - LT Itá - Campos Novos - 525 kV

## FUNDAMENTOS TÉCNICOS

2.1 POTENCIAL DE ELETRODO PADRÃO

O funcionamento das pilhas eletroquímicas e das pilhas de corrosão envolve uma importante grandeza que se denomina "potencial de eletrodo" ou simplesmente "potencial", como se costuma dizer na prática. O seu aparecimento baseia-se num princípio geral segundo o qual, sempre que se tem um metal em contato com um eletrólito, desenvolve-se entre o metal e o eletrodo de referência uma diferença de potencial elétrica que pode ser positiva, negativa ou nula, dependendo do metal, das espécies presentes no eletrólito, além de outras variáveis. Este fenômeno é devido à tendência natural da maioria dos metais a se ionizarem num eletrólito, como acontece com os metais ativos em relação aos meios aquosos. Para que isto aconteça é necessário que ele passe para a forma iônica, o que ocorre segundo a reação anódica a seguir: (Me = metal)



A Fig.2.1.1 mostra a f.e.m. que aparece entre um metal e um meio aquoso (eletrólito) e seus íons  $\text{Me}^{+n}$  dissolvidos no eletrólito [4].

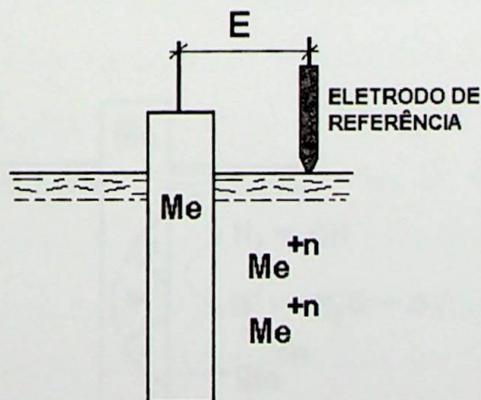
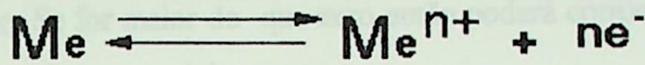


Fig.2.1.1 - Esquemas da semi célula galvânica

A reação prossegue no sentido indicado até ocorrer a saturação do eletrólito, com íons do metal, nas imediações da interface metal/meio, quando então a entrada de um íon a mais na solução, provoca a redução de outro íon que se deposita no próprio metal, mantendo o equilíbrio das cargas. Deste modo a reação se torna reversível, tendo-se:



Assim, a diferença de potencial  $E$  mencionada na Fig.2.1.1 é explicada pela presença de cargas elétricas de um sinal, no eletrólito, e cargas de sinal oposto no metal. O valor desta diferença, ou seja, do potencial, depende de muitos fatores, uns deles ligados ao metal e outros, relacionados com o eletrólito, tais como tipo do eletrólito, concentração, temperatura, grau de aeração e grau de agitação. Entretanto, uma vez fixadas as variáveis ligadas ao eletrólito, o potencial passa a ser função do metal, sendo o seu valor uma propriedade de cada um.

Ao conjunto constituído por um metal em contato com um eletrólito denomina-se meia pilha, meia célula, semicélula ou simplesmente eletrodo.

A medição direta do potencial é materialmente impraticável. Para resolver o problema foi desenvolvido um eletrodo de referência sendo, o padrão, o eletrodo normal de hidrogênio mas outros eletrodos também poderão ser usados.

Conhecendo-se o processo catódico que ocorre numa célula de corrosão, podemos calcular então a f.e.m. da pilha de corrosão representada na Fig.2.1.2 [4] pela equação :

$$\text{f.e.m.} = E_{\text{catodo}} - E_{\text{anodo}}$$

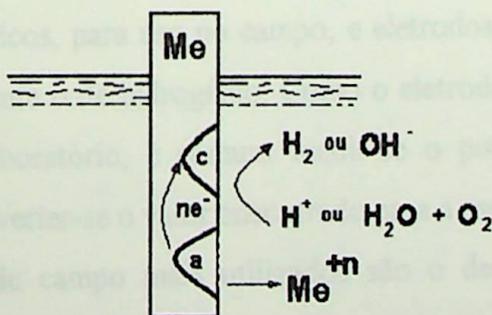
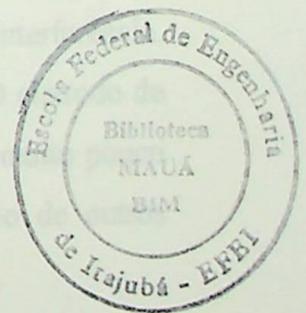


Fig.2.1.2 - Célula de corrosão ou pilha de corrosão



Como neste caso, as semi células estão em curto circuito, não tem muito sentido falar em f.e.m. falamos então em Tendência à Corrosão, portanto :

$$\text{Tendência à Corrosão} = E_{\text{catodo}} - E_{\text{anodo}}$$

Se o valor da tendência à corrosão for menor do que zero dizemos que o material não corroerá neste meio. Se for maior do que zero então poderá corroer neste meio. Neste último caso não se pode afirmar que irá corroer.

Os processos catódicos que ocorrem numa célula de corrosão não são limitados somente ao do oxigênio ou do hidrogênio. É claro que podem existir outros, dependendo do meio.

O fato do fator da tendência à corrosão ser positivo, não significa necessariamente que o material irá corroer, porque outros fatores podem intervir, fazendo com que a corrosão seja minimizada ou até mesmo interrompida. É o que ocorre, por exemplo, com os materiais do tipo apassivável, isto é, materiais em que o produto de corrosão é aderente, péssimo condutor de eletricidade e não poroso, de tal sorte que cria uma barreira entre o material e o meio, minimizando desta maneira a corrosão. É o caso do aço inoxidável, alumínio, titânio [3,4,5,6].

## **2.2 ELETRODO DE REFERÊNCIA**

Os eletrodos de referência são dispositivos indispensáveis na tecnologia de proteção catódica. É fazendo-se uso destes eletrodos que se mede o potencial de uma estrutura em relação ao meio, a fim de se avaliar a condição do material metálico, isto é, verificar se há corrosão, se a estrutura está protegida ou se há influência de correntes de interferência. Existem eletrodos práticos, para uso no campo, e eletrodos de laboratório. O eletrodo de laboratório é basicamente o de hidrogênio. Como o eletrodo de hidrogênio é muito pouco prático, mesmo no laboratório, é comum medir-se o potencial com auxílio de outros eletrodos e depois converter-se o valor encontrado para a escala referente a ele.

Os eletrodos de campo mais utilizados são o de Cu/CuSO<sub>4</sub> (Cobre/Sulfato de Cobre) saturado, o de Ag/AgCl (Prata/Cloreto de Prata) e o de zinco [3]. O eletrodo de Cu/CuSO<sub>4</sub> é usado principalmente para a medição de potenciais no solo. O seu uso em meio líquido deve ser evitado. O eletrodo de Ag/AgCl é específico para água salgada.

O eletrodo de zinco aplica-se tanto para a medição de potencial em água salgada como no solo. Para o uso no solo, o zinco deve ser envolvido com enchimento condutor de gesso e bentonita. A Fig.2.2.1 [3] mostra esquematicamente os eletrodos de referência usados em campo.

Cada eletrodo de referência tem um valor diferente para o seu próprio potencial. É por isso que um dado potencial, medido com diferentes eletrodos de referência, apresenta valores diferentes.

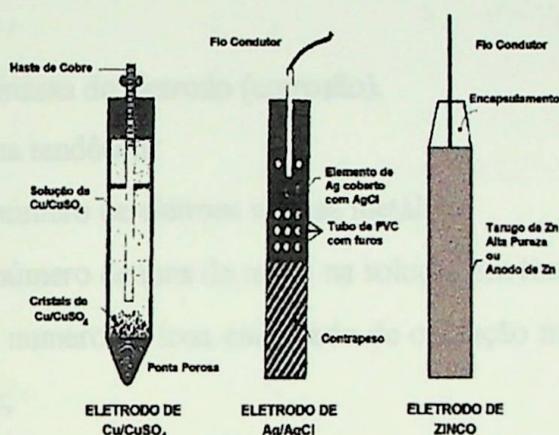


Fig. 2.2.1 - Esquema ilustrativo dos eletrodos de campo

Como a medição é realizada através da medição do potencial das estruturas enterradas no solo, vamos detalhar um pouco mais o eletrodo mais utilizado que é o  $\text{Cu}/\text{CuSO}_4$  - Cobre/Sulfato de Cobre, mostrado na Fig.2.2.2, em outro corte, o qual consiste basicamente de uma haste de cobre eletrolítico imersa em uma solução saturada de sulfato de cobre [3,8]. O potencial deste eletrodo de referência é de +0,337 V, que corresponde ao potencial elétrico padrão do cobre, conforme a Tabela 2.2.1.

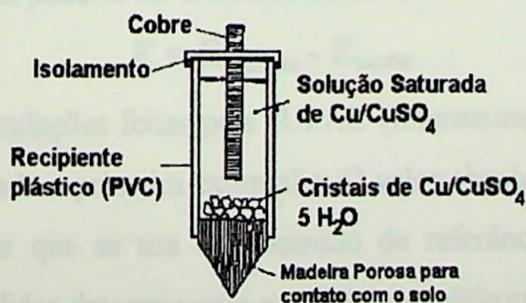


Fig.2.2.2 - Vista mais detalhada (em corte) do eletrodo

### 2.2.1 SINAL DO POTENCIAL DE ELETRODO DE REFERÊNCIA

Um eletrodo é denominado anodo quando nele ocorre uma reação de oxidação e é denominado catodo quando nele ocorre uma reação de redução.

No anodo há uma tendência:

- a aumentar o número de elétrons livres na fase metálica;
- a aumentar a concentração dos íons do metal na solução em torno dele;
- a aumentar o número de íons em estado de oxidação mais elevado na solução em torno dele;
- a diminuir a massa do eletrodo (corrosão).

No catodo há uma tendência:

- a diminuir o número de elétrons na fase metálica;
- a diminuir o número de íons do metal na solução em torno dele;
- a aumentar o número de íons em estado de oxidação menos elevado na solução em torno dele;
- a aumentar a massa do cátodo.

Cada eletrodo tem uma tendência a dar ou receber elétrons em relação ao eletrodo de hidrogênio. Assim, o eletrodo de zinco apresenta caráter anódico (sofre corrosão) pois cede elétrons para o de hidrogênio ao passo que o de cobre recebe elétrons do eletrodo de hidrogênio apresentando portanto caráter catódico.

Quando se tem um eletrodo constituído, como já visto, por um metal imerso em solução de seus íons, pode-se considerar o potencial do eletrodo como sendo  $E$ . Este será igual a diferença entre o potencial do metal  $E_{\text{metal}}$  e o potencial da solução  $E_{\text{solução}}$

$$E = E_{\text{metal}} - E_{\text{solução}}$$

Este potencial também poderia ser arbitrado como sendo

$$E = E_{\text{solução}} - E_{\text{metal}}$$

mas para atender as recomendações feitas pela IUPAC (International Union of Pure and Applied Chemistry), será usada a primeira expressão. O valor absoluto deste potencial não pode ser medido, a não ser que se use um eletrodo de referência, tendo-se então na realidade uma escala de medidas determinando-se então uma diferença de potencial [5]. A Tabela 2.2.1, mostra a série de potencial Padrão de Metais,  $E_0$  a 25 °C para a reação  $Me^{n+} + ne^- = Me$  [3].

Tabela 2.2.1 - Série Eletromotriz

| Reação de Eletrodo                           | Potencial $E_0$<br>(Volts) | Reação de Eletrodo   | Potencial $E_0$<br>(Volts) |
|--|----------------------------|--|----------------------------|
| $\text{Li}^+ + \text{e}^- = \text{Li}$       | -3.045                     | $\text{Ni}^{++} + 2\text{e}^- = \text{Ni}$                                 | -0.250                     |
| $\text{K}^+ + \text{e}^- = \text{K}$         | -2.925                     | $\text{Mo}^{+++} + 3\text{e}^- = \text{Mo}$                                | -0.200                     |
| $\text{Ba}^{++} + 2\text{e}^- = \text{Ba}$   | -2.906                     | $\text{Sn}^{++} + 2\text{e}^- = \text{Sn}$                                 | -0.136                     |
| $\text{Ca}^{++} + 2\text{e}^- = \text{Ca}$   | -2.866                     | $\text{Pb}^{++} + 2\text{e}^- = \text{Pb}$                                 | -0.126                     |
| $\text{Na}^+ + \text{e}^- = \text{Na}$       | -2.714                     | $\text{H}^+ + \text{e}^- = \frac{1}{2} \text{H}_2$                         | 0.000                      |
| $\text{Mg}^{++} + 2\text{e}^- = \text{Mg}$   | -2.363                     | $\text{Cu}^{++} + 2\text{e}^- = \text{Cu}^+$                               | 0.153                      |
| $\text{Al}^{+++} + 3\text{e}^- = \text{Al}$  | -1.662                     | $\text{Cu}^{++} + 2\text{e}^- = \text{Cu}$                                 | 0.337                      |
| $\text{Ti}^{++} + 2\text{e}^- = \text{Ti}$   | -1.628                     | $\text{H}_2\text{O} + \frac{1}{2} \text{O}_2 + 2\text{e}^- = 2\text{OH}^-$ | 0.401                      |
| $\text{Zr}^{++++} + 4\text{e}^- = \text{Zr}$ | -1.529                     | $\text{Fe}^{+++} + \text{e}^- = \text{Fe}^{++}$                            | 0.771                      |
| $\text{Mn}^{++} + 2\text{e}^- = \text{Mn}$   | -1.180                     | $\text{Hg}_2^{++} + 2\text{e}^- = 2 \text{Hg}$                             | 0.788                      |
| $\text{Nb}^{+++} + 3\text{e}^- = \text{Nb}$  | -1.100                     | $\text{Ag}^+ + \text{e}^- = \text{Ag}$                                     | 0.799                      |
| $\text{Zn}^{++} + 2\text{e}^- = \text{Zn}$   | -0.762                     | $\text{Hg}^{++} + 2\text{e}^- = \text{Hg}$                                 | 0.854                      |
| $\text{Cr}^{+++} + 3\text{e}^- = \text{Cr}$  | -0.744                     | $\text{Pd}^{++} + 2\text{e}^- = \text{Pd}$                                 | 0.987                      |
| $\text{Fe}^{++} + 2\text{e}^- = \text{Fe}$   | -0.440                     | $\text{Pt}^{++} + 2\text{e}^- = \text{Pt}$                                 | 1.190                      |
| $\text{Cd}^{++} + 2\text{e}^- = \text{Cd}$   | -0.403                     | $\text{O}_2 + 4\text{H}^+ + 4\text{e}^- = 2\text{H}_2\text{O}$             | 1.228                      |
| $\text{Co}^{++} + 2\text{e}^- = \text{Co}$   | -0.277                     | $\text{Au}^{+++} + 3\text{e}^- = \text{Au}$                                | 1.498                      |

### 2.3 POLARIZAÇÃO

Um fator de certa predominância na corrosão resultante do contato de metais diferentes é o valor da diferença de potencial entre os dois metais. Um metal acoplado a outro metal, perto dele na tabela de potenciais, será corroído mais lentamente que quando ligado a um outro metal que se encontre mais afastado. Assim, o zinco unido com o ferro será corroído mais lentamente do que se unido com o cobre, conforme comprovam os valores das diferenças de potenciais:

$$\text{Zn} - \text{Fe} : + 0,323 \text{ V}$$

$$\text{Zn} - \text{Cu} : +1,100 \text{ V}$$

Logo, quanto mais elevado o potencial maior será a força que provoca a corrosão. Entretanto, relativamente à velocidade de corrosão outros fatores devem ser considerados.

Todo metal imerso em uma solução contendo seus próprios íons na ausência de reações que interfiram, possui um potencial  $E$  dado pela equação de Nernst. Se uma corrente circular por esse eletrodo o potencial variará, e o novo valor de potencial  $E'$  dependerá da corrente aplicada. A diferença entre os dois potenciais é conhecida como sobrepotencial:

$$\eta = E' - E$$

Pode ocorrer que o potencial inicial seja diferente do potencial de equilíbrio termodinâmico, devido a reações e fenômenos que interferem no processo. Este é o caso mais comum em corrosão, sendo este valor conhecido como potencial de corrosão ou potencial misto.

O potencial de corrosão também varia ao circular uma corrente pelo eletrodo, sendo esta variação conhecida como polarização.

Quando dois metais diferentes são ligados e mergulhados em um eletrólito estabelece-se uma diferença de potencial entre os eletrodos resultantes. Fechando-se o circuito externo observa-se uma diminuição dessa diferença de potencial com o tempo. O potencial do anodo se aproxima ao do catodo e o do catodo se aproxima ao do anodo. Tem-se o que se chama polarização dos eletrodos: polarização anódica no anodo e polarização catódica no catodo.

As causas dessa variação podem ser várias, podendo-se citar, entre elas, as reações secundárias que conduzem a formação de películas protetoras ou reforço da película já existente, a destruição de películas já existentes, fenômenos de adsorção de gases contidos na solução ou em outras substâncias e o estabelecimento de um estado estacionário, que pode ser provocado pela saturação da solução nas vizinhanças do eletrodo ou pela diminuição da concentração iônica que se deposita ou desprende no catodo.

A relação entre a polarização de um metal e a densidade de corrente elétrica correspondente foi estabelecida por Tafel (lei de Tafel). A expressão matemática desta lei é conhecida como equação de Tafel:

$$E' - E = \eta = a + b \log i$$

onde

$E'$ : potencial do metal no eletrólito, numa dada condição;

**E**: potencial de repouso ou potencial de equilíbrio do mesmo metal no mesmo eletrólito (potencial que se estabelece quando se tem um metal em um eletrólito na ausência de corrente elétrica externa);

$\eta$ : polarização que pode ser anódica ou catódica;

**a e b**: constantes que podem ser obtidas experimentalmente;

**i** : densidade de corrente elétrica.

Para exemplificar a polarização pode-se considerar a pilha na qual o anodo é constituído de uma placa de zinco, o catodo de uma placa de cobre e o eletrólito é uma solução diluída de ácido sulfúrico. Os eletrodos são colocados próximos entre si para que a resistência interna do sistema seja pequena, da ordem de 0,1  $\Omega$ , e a resistência externa, constituída pelo fio de junção e pelo voltímetro, devida ao seu pequeno valor, possa ser desprezada. As medidas mostram que o potencial de eletrodo do zinco será da ordem de -1,0 V e o do cobre da ordem de +0,1 V.

A diferença de potencial inicial dos dois eletrodos será então igual a 1,1 V e como a resistência é de 0,1  $\Omega$  a intensidade de corrente será então de 11 A. Se a superfície submersa de cada um dos eletrodos for de 5 cm<sup>2</sup>, a densidade de corrente anódica será igual a 2,20 A/cm<sup>2</sup>, que deveria provocar uma forte corrosão. Aplicando a lei de Faraday pode-se determinar a velocidade de corrosão, pois tem-se as relações:

$$Q = I \cdot (F \cdot K \cdot n) / A$$

$$K = (Q \cdot A) / (F \cdot n) = (I \cdot A) / (F \cdot n)$$

nas quais:

**Q** : é a quantidade de eletricidade que escoo do anodo para o catodo no tempo t;

**I** : é a intensidade de corrente de corrosão expressa em ampères;

**F** : é o equivalente eletroquímico (constante de Faraday);

**A** : é a massa atômica do metal ;

**K** : é a quantidade do metal corroído;

**n** : é o número de moles de elétrons transferidos.

Substituindo-se pelos valores correspondentes tem-se:

$$K = (2,2 \cdot 3600 \cdot 65) / (96500 \cdot 2)$$

$$K = 2,65 \text{ g/cm}^2\text{h}$$

Determinando-se a massa do eletrodo de zinco antes e depois de colocar a pilha em funcionamento, nota-se que a quantidade de zinco dissolvida é menor do que a calculada mostrando a experiência que a velocidade real de corrosão é 20-50 vezes menor do que o valor calculado. A razão dessa variação, admitindo-se constantes as resistências do circuito metálico e do eletrólito, é que ocorre uma diminuição na diferença de potencial da pilha e conseqüentemente uma diminuição na corrente de corrosão. Pode-se concluir então que devido a passagem de corrente os eletrodos sofreram polarização: o potencial de redução do catodo decresce e o potencial de redução do anodo cresce.

Quando as reações anódicas e catódicas se realizam em um metal elas se polarizam mutuamente. Usando-se o diagrama Fig.2.3.1 [4] que relaciona o potencial ( $E$ ) e a corrente ( $I$ ), pode-se ter os resultados: quando  $I$  for zero,  $E_a$  e  $E_c$  representam os potenciais reversíveis de equilíbrio das meias pilhas correspondentes. Como mencionado, os anodos e os catodos se tornam mutuamente polarizados: os anodos se tornam mais nobres (potenciais de redução crescem) e os catodos se tornam mais ativos (potenciais de redução decrescem), tendo-se os valores dos potenciais polarizados  $E_a'$  e  $E_c'$ . A tensão da pilha é igual a corrente  $I'$  que flui no circuito, multiplicada pela resistência  $R$ , resistência total do circuito de corrosão, isto é, a soma das resistências dos condutores metálicos e eletrolíticos e da resistência de películas (óxidos ou produtos de corrosão) na superfície do metal. Pode-se, então, escrever:

$$(E_c' - E_a') = I' \cdot R$$

Se o anodo e o catodo estiverem em curto-circuito e o eletrólito for de alta condutividade (como o caso da corrosão de metais em ácidos),  $R$  é muito pequeno e então, a corrente de corrosão será máxima, o potencial decresce para um mínimo e é chamado potencial de corrosão: ponto de interseção das duas curvas de polarização.

Conforme a polarização das reações dos eletrodos se processa, a velocidade de corrosão é limitada, sendo evidente que quanto mais polarizada se tornar uma reação do eletrodo menor a velocidade de corrosão resultante.

A Fig.2.3.2 [4] mostra a influência da polarização anódica na corrente de corrosão: aumentando-se a polarização anódica para um dado metal, de  $A1$  para  $A2$  haverá um decréscimo da corrente máxima de corrosão de  $I1$  para  $I2$ .

Verifica-se, então, que a polarização anódica polariza o eletrodo em direção catódica ou de potencial mais nobre (menos ativo), ao passo que a polarização catódica polariza o eletrodo em direção anódica, i.é, torna-o mais ativo.

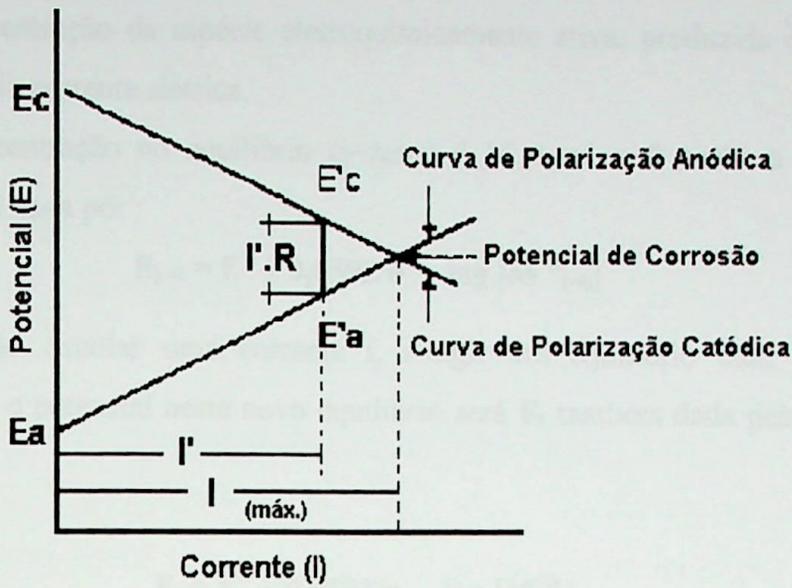


Fig. 2.3.1 - Curvas de polarização

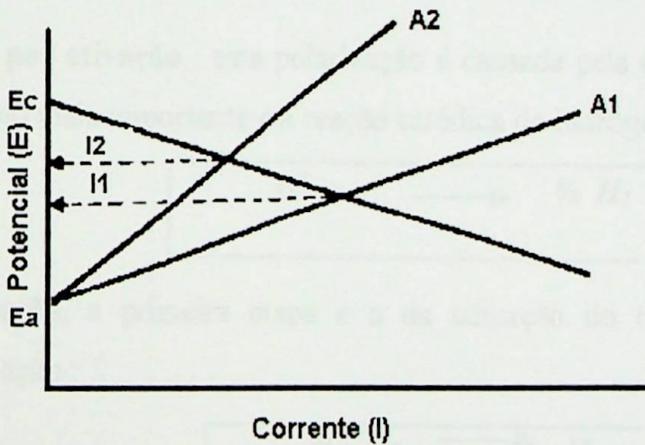


Fig. 2.3.2 - Influência da polarização anódica

Evidentemente, para os processos de corrosão a polarização é importante, pois potenciais de polarização se opõem aos potenciais calculados fazendo com que as diferenças de potenciais das pilhas, na prática, tenham valores inferiores aos calculados.

Quanto maior a polarização, menor é a sua ação prejudicial na corrosão, ao passo que no aproveitamento da corrente de uma pilha ou numa eletrodeposição é interessante se manter a polarização em um valor mínimo.

Os diferentes tipos de polarização são: polarização por concentração, por ativação e ôhmica.

**Polarização por concentração:** é a variação do potencial em consequência da variação da concentração da espécie eletroquimicamente ativa, produzida ou consumida face e passagem da corrente elétrica.

Se a concentração no equilíbrio ( $i=0$ ) é  $M + ni = 0$  então o potencial no Equilíbrio  $E_{i=0}$  é dada por :

$$E_{i=0} = E^0 + 0,0592/n \cdot \log [M^{+n}_{i=0}]$$

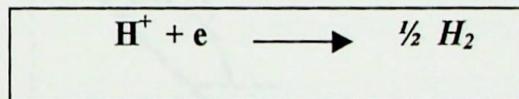
Se, quando circular uma corrente  $i$ , atingir um equilíbrio com concentração  $M + ni = 0$  então o potencial neste novo equilíbrio será  $E_i$  também dada pela Equação de Nernst e será

$$E_i = E^0 + 0,0592/n \cdot \log [M^{+n}_i]$$

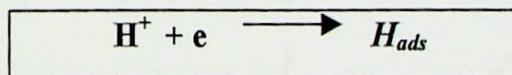
A polarização por concentração é conhecida por  $(E_i) - (E_{i=0})$  e é dada por :

$$(E_i) - (E_{i=0}) = 0,0592/n \cdot \log \{ [M^{+n}_{i=0}] / [M^{+n}_i] \}$$

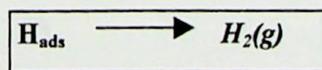
**Polarização por ativação :** esta polarização é causada pela etapa lenta da reação de eletrodo. O exemplo mais importante é a reação catódica do hidrogênio.



para ocorrer esta reação, a primeira etapa e a da adsorção do hidrogênio reduzido, representada pela equação :



e a segunda etapa é :



a primeira etapa é a etapa limitante do processo.

**Queda ôhmica :** a queda ôhmica é consequência da variação de condutividade elétrica da solução eletrolítica e é dada pelo produto  $I \cdot R$ .

Na prática a polarização do eletrodo é a combinação das polarizações por concentração, ativação e queda ôhmica.

É importante observar que a polarização por concentração diminui com a agitação, enquanto que a polarização por ativação e queda ôhmica não são afetadas.

**Equações de Tafel**

A polarização do eletrodo ( $E_1 - E_{i=0}$ ) é também chamada de sobrepotencial ( $\eta$ ) e é dada por

$$\eta = (E_1) - (E_{i=0})$$

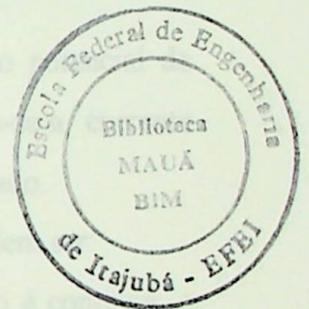
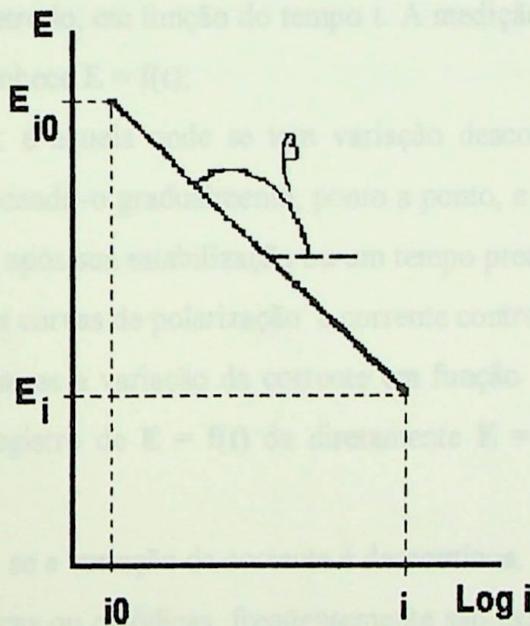
Se a variação do potencial com o logaritmo da corrente, Fig.2.3.3 [4], é linear, então podemos escrever a equação :

$$\eta = (E_1) - (E_{i=0}) = \beta \cdot \log (i/i_0)$$

Esta equação é conhecida por Equação de Tafel, onde:

$\beta$  é conhecido constante de Tafel;

$i_0$  como a densidade de corrente de troca e sendo ambas constantes para um dado material num determinado meio.



**Fig. 2.3.3 – Esquema da curva de polarização catódica (Região de Tafel)**

Se um metal se encontra no potencial de equilíbrio termodinâmico haverá uma troca de íons entre o metal e a solução, porém sem passagem de corrente elétrica em nenhuma das duas direções.

Quando o potencial varia, o valor do sobrepotencial criado define o comportamento do metal. Se o sobrepotencial for positivo, circulará pela interface metal-solução uma corrente positiva (corrente anódica) e o metal se corroerá através de uma reação de

oxidação. Se o sobrepotencial for negativo, isto é, se  $E' < E$  uma corrente catódica se estabelecerá e tem-se uma reação de redução.

Entre os numerosos métodos de estudo da corrosão eletroquímica aqueles que se baseiam na medição e avaliação do sobrepotencial ocupam lugar de destaque. Esses métodos consistem em realizar uma eletrólise, onde se utilizam, como eletrodo e eletrólito respectivamente, metal e o meio cuja interação se deseja estudar.

O ensaio pode ser conduzido a potenciais de eletrodo controlados (neste caso medindo-se os valores de corrente em função do potencial aplicado), ou então a corrente de eletrólise controlada (anotando-se os valores de potencial em função da corrente).

Representando-se graficamente a relação  $E = f(I)$  ou  $I = f(E)$ , entre o potencial de eletrodo e a corrente de eletrólise, obtém-se uma curva de polarização.

As curvas de polarização a potencial controlado podem ser de dois tipos:

- a) **potenciocinética ou potenciodinâmica** : é aquela onde se tem variação contínua do potencial de eletrodo, em função do tempo  $t$ . A medição de  $I = f(t)$  dá  $I = f(E)$ , uma vez que se conhece  $E = f(t)$ ;
- b) **potenciostática**: é aquela onde se tem variação descontínua do potencial de eletrodo, modificando-o gradualmente, ponto a ponto, e medindo-se a corrente correspondente, após sua estabilização ou um tempo predeterminado.

Da mesma forma, as curvas de polarização a corrente controlada podem ser:

- a) **galvanocinética**: se a variação da corrente em função do tempo é contínua, e neste caso o registro de  $E = f(t)$  dá diretamente  $E = f(I)$ , pois se conhece  $I = f(t)$ .
- b) **galvanostática**: se a variação da corrente é descontínua.

As correntes, anódicas ou catódicas, freqüentemente são expressas como densidade de corrente ( $I$ ), ou seja, corrente por unidade de área, que é uma propriedade específica independente da área da superfície [2,3,4,5].

## **2.4 DIAGRAMA DE POURBAIX**

A previsão da imunidade, corrosão ou apassivação dos metais pode ser feita através do estudo termodinâmico do comportamento de um determinado material metálico em um meio eletrolítico. Pourbaix estudou esta influência, aplicando as leis da Termodinâmica para medir a tendência dos metais à corrosão, quando variamos o pH e o potencial aos

quais estão submetidos, o estudo foi resumido em Diagramas de Potencial vs pH, denominado “Diagramas de Pourbaix” [3].

Estes diagramas indicam as áreas representadas pelo metal onde o material é imune, i.é, onde a corrosão é impossível de acontecer, áreas onde irá ocorrer a corrosão representadas pelos respectivos íons por exemplo  $\text{Fe}^{++}$ ,  $\text{CuO}_{2-}$ ,  $\text{Al}^{+++}$ ,  $\text{HPbO}_{2-}$  e áreas onde o metal sofre corrosão, mas o produto da corrosão é compacto, aderente e não condutor, portanto protetor do material contra a corrosão subsequente. Neste último caso o metal nestas áreas se encontra no estado apassivado. Estas áreas são representadas pelos óxidos e/ou hidróxidos como  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Zn}(\text{OH})_2$ ,  $\text{Fe}_3\text{O}$ ,  $\text{Cr}(\text{OH})_3$ .

A Termodinâmica nos permite prever a região de imunidade de um metal, na qual não há a tendência para corrosão. Fora desta região haverá sempre tendência para corrosão, no entanto, esta poderá ou não ocorrer conforme os produtos de corrosão sejam solúveis, ou formem uma camada contínua, aderente e protetora.

Em princípio não podemos prever estas características que devem ser determinadas. Experimentalmente existem hoje diagramas de Pourbaix para todos os metais e muitas ligas.

Os diagramas de Pourbaix permitem prever o efeito de mudança de pH ou do potencial elétrico (proteção catódica) sobre a corrosão.

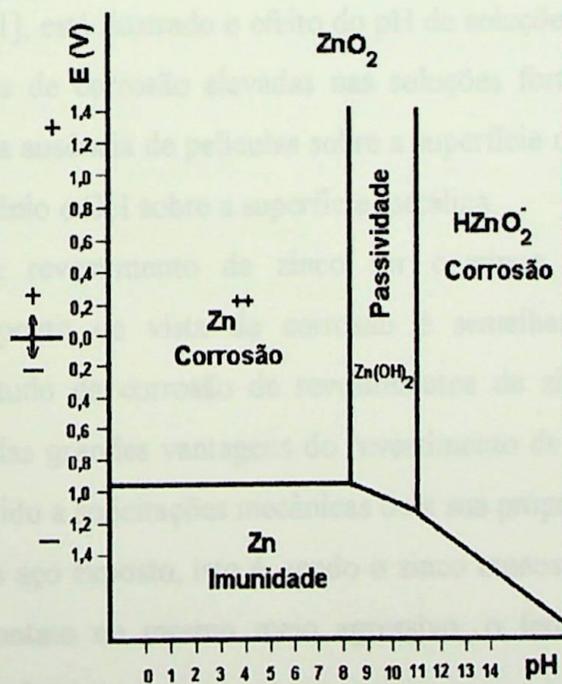


Fig. 2.4.1 - Diagrama de Pourbaix para o Zinco

A Fig.2.4.1 [3], mostra o Diagrama de Pourbaix do zinco, onde vemos que os campos de corrosão do zinco situam-se na faixa de pH 0 a aproximadamente 8,5 e do pH 10,5 a 14, dependendo do potencial a que se encontra submetido o zinco. Entre estas duas faixas, situa-se um campo de passividade.

Na parte inferior, encontra-se o campo da imunidade do zinco à corrosão. Isto é, nessas condições a forma estável dele é a metálica.

Juntamente com seus colaboradores, Pourbaix elaborou um Atlas de Equilíbrio Eletroquímico, editado juntamente pelo CEBELCOR e pela Editora Pergamon Press, no qual se encontram os diagramas para praticamente todos os metais.

O diagrama de Pourbaix é muito útil, porém também apresentam limitações e o próprio autor, em suas conferências sobre o assunto enfatiza muito que o diagrama é termodinâmico. Isto é, refere as condições de equilíbrio dos metais e seus compostos, em meio aquoso a 25°C e sob pressão de 1 atm. O seu emprego para elucidar problemas práticos, em que os sistemas não se acham em equilíbrio e em diferentes temperaturas, pode conduzir a erros graves.

Na prática, outros fatores relacionados com a natureza do metal e do meio, provocam uma alteração das condições de equilíbrio e podem determinar a velocidade de corrosão.

Na Fig.2.4.2 [1], está ilustrado o efeito do pH de soluções alteradas na corrosão do zinco. As velocidades de corrosão elevadas nas soluções fortemente ácidas e alcalinas podem ser atribuídas a ausência de películas sobre a superfície metálica e o fácil acesso de íons hidrogênio, oxigênio e OH sobre a superfície metálica.

Enquanto um revestimento de zinco for contínuo e impermeável, o seu comportamento do ponto de vista de corrosão é semelhante ao do zinco. Assim, freqüentemente o estudo da corrosão de revestimentos de zinco é tratado como o do próprio zinco. Uma das grandes vantagens do revestimento de zinco, é que quando sofre descontinuidades devido a solicitações mecânicas ou a sua própria corrosão, age como uma proteção catódica do aço exposto, isto é, sendo o zinco menos nobre que o ferro, quando os dois estão em contato no mesmo meio agressivo, o ferro é protegido a custa da dissolução eletrolítica do zinco.

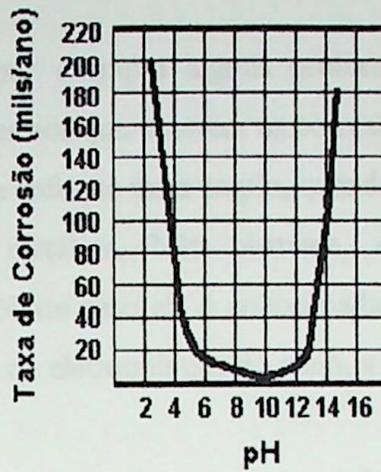


Fig. 2.4.2 – Efeito do pH na corrosão do Zinco

Freqüentemente, faz-se referência a capacidade protetora dos revestimentos de zinco a partir desse seu caráter anódico. Convém lembrar que este é um aspecto muito importante. No entanto inicialmente deve atuar a resistência à corrosão do próprio zinco. Só quando este é danificado ou corroído, o que em outros revestimentos (metálicos catódicos ou pinturas) provoca a corrosão da base metálica, entra em jogo a sua capacidade de proteção catódica.

Esta prolongará a vida útil do aço e dependerá da espessura da camada de zinco e da extensão da área exposta. Poderão, em certos casos, os produtos de corrosão do zinco recobrir a base de ferro exposta e se forem aderentes, promover a sua proteção.

Os revestimentos de zinco tem numerosas e variadas aplicações, sendo largamente utilizados na proteção contra a corrosão atmosférica e também em águas, solos e outros meios. Assim, utiliza-se o ferro revestido de zinco na construção civil, em instalações de distribuição de água, em equipamento de refrigeração, em câmaras frigoríficas, em “containers” na indústria automobilística, em estruturas metálicas tipo torres de transmissão e suas fundações, em equipamentos elétricos e em muitas outras aplicações.

## 2.5 CORROSÃO

O termo corrosão era usado, até há pouco tempo, para descrever um determinado tipo de “deterioração” dos metais, não se aplicando a materiais não-metálicos, conforme explica o Prof. H. H. Uhlig [6,10], um dos pioneiros americanos do estudo da corrosão, no Departamento de Metalurgia do Massachusetts Institute of Technology (M.I.T.).

Entretanto, de acordo com a conceituação mais moderna, entende-se por corrosão a “deterioração” dos materiais pela ação do meio. Expresso desta forma, o conceito abrange materiais metálicos e não-metálicos. Na realidade, certos tipos de decomposição de

materiais não-metálicos - por exemplo alguns problemas que incidem no concreto - seguem mecanismos similares aos que ocorrem na corrosão.

Como resultado deste enfoque mais amplo, quando se trata de metais, o fenômeno é denominado de corrosão metálica. Não obstante, na prática, continua-se a falar simplesmente de corrosão. Neste caso ela é conceituada como a destruição dos materiais metálicos pela ação química ou eletroquímica do meio, a qual pode estar, ou não, associada uma ação física.

Em geral, nos processos de corrosão, os metais reagem com os elementos não-metálicos presentes no meio, particularmente o oxigênio e o enxofre, produzindo compostos semelhantes aos encontrados na natureza, dos quais foram extraídos.

Com exceção dos metais nobres, que são encontrados na natureza sob a forma metálica, a condição mais estável é a de composto, que apresenta o mais baixo nível de energia interna, nível de energia  $E1$  na Fig.2.5.1 . Para se obter um metal, cede-se energia ao composto (minério) por intermédio dos processos metalúrgicos. Disso resulta que o nível de energia do metal assim obtido é mais elevado que o do composto de onde se originou, nível  $E2$  na Fig.2.5.1. Assim o metal se encontra num estado de equilíbrio metaestável, e havendo condições propícias, ocorrem as reações de corrosão que devolvem o metal a sua forma original de composto, obviamente liberando energia.

Como decorrência desse fenômeno, para que se tenha o metal em equilíbrio estável, é necessário que uma quantidade adicional de energia lhe seja cedida de forma contínua, o que é feito por intermédio dos métodos de proteção. Em face destas considerações, conclui-se que a corrosão é um fator que contribui fortemente para o aumento do desperdício de energia, entidade cada vez mais preciosa nos tempos modernos. O ciclo dos metais está mostrado na Fig.2.5.1 [3].

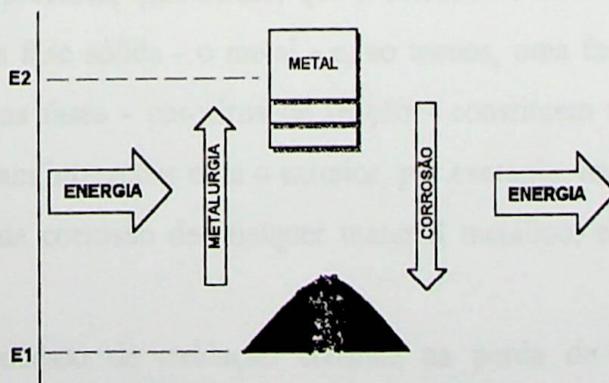


Fig.2.5.1 - O ciclo do metais

Praticamente todos os metais encontram-se na natureza sob a forma de compostos não-metálicos (óxidos, hidróxidos, sulfetos, cloretos). Grande quantidade de energia (térmica ou elétrica) precisa ser despendida para deles extrair os metais. Uma certa quantidade de energia, no entanto, fica retida nos metais, que, assim, contém mais energia interna do que seus minérios.

Quase todos os materiais metálicos encontram-se, portanto, num estado instável e tendem, espontaneamente, a reagir com o meio ambiente e formar novamente compostos de menor conteúdo de energia interna e conseqüentemente mais estáveis. Nestas interações não há perda de energia. Ocorrem, única e exclusivamente, mudanças de forma de energia em obediência ao "Primeiro Princípio da Termodinâmica". Exemplificando: aço carbono, quando exposto à atmosfera terrestre (meio ambiente), transforma-se em óxidos de ferro (minério de ferro), que são mais estáveis que o próprio aço; ele é, pois, gradativamente destruído pela corrosão atmosférica. O abaixamento do nível de energia não é nada mais do que a tendência para o equilíbrio. Esta é a lei da Natureza.

Assim, de certo modo, a corrosão pode ser considerada como sendo um processo inverso ao da extração de metais dos seus minérios.

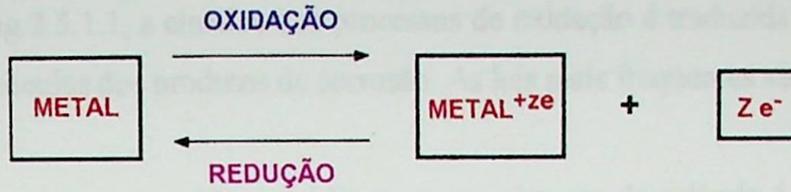
A corrosão de metais (metais puros e ligas) é definida como uma deterioração de um material metálico por reações químicas ou eletroquímicas com o meio ambiente (DIN 50900) [2].

No processo de corrosão intervêm reações químicas ou eletroquímicas entre um metal, que é corroído e um meio ambiente, que o ataca. Estas interações obedecem há leis fundamentais da química, principalmente da eletroquímica.

A corrosão é, sempre, um processo natural, irreversível e espontâneo, que, na maioria das vezes, ocorre em condições não controláveis.

Convém ter presente, igualmente, que a corrosão é uma reação heterogênea, pois reagem entre si uma fase sólida - o metal - e, ao menos, uma fase líquida ou gasosa - o meio agressivo. Estas fases - parceiros de reação - constituem um sistema aberto, pois também se manifestam interações com o exterior, por exemplo, na forma de troca de calor. E, ainda, no curso da corrosão de qualquer material metálico, ele cede energia livre ao meio ambiente.

Então, o processo de oxidação consiste na perda de elétrons pelo metal (a combinação com oxigênio é um caso de oxidação, mas não o único). As reações básicas da corrosão são:



Os exemplos mais importantes de corrosão ocorrem por mecanismo eletroquímico, que envolve necessariamente a presença de um eletrólito.

### 2.5.1 MECANISMO QUÍMICO DA CORROSÃO

Campo abrangido pela corrosão química é bem mais restrito que o da corrosão eletroquímica, e se compõe principalmente da oxidação, destacando-se a corrosão em alta temperatura. Não obstante, a corrosão química pode ocorrer também a temperatura ambiente, em meio gasoso e ainda em alguns meios líquidos, isentos de água.

O mecanismo da corrosão química é caracterizado por uma reação química do metal com o agente corrosivo, sem que haja deslocamento dos elétrons envolvidos em direção a outras áreas. O produto de corrosão forma-se na superfície do metal exposto ao meio, podendo constituir uma película que, dependendo do metal, do meio e das condições em que se processa a reação, pode apresentar diferentes propriedades. Em certos casos, esta película pode ter propriedades protetoras e chegar a bloquear por completo as reações subsequentes no meio considerado.

Nos diferentes níveis de temperatura, a velocidade de crescimento das películas de óxidos formadas é possível ser representada por meio de correlações: linear, parabólica ou logarítmica (esta última formulação empírica também é representada, as vezes, por uma função exponencial) conforme a Fig.2.5.1.1 [2].

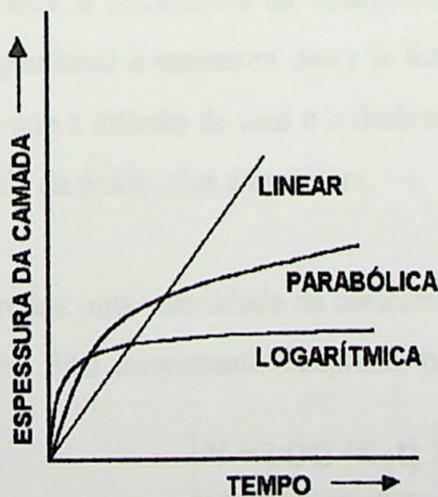


Fig.2.5.1.1 - Leis da velocidade de crescimento de camadas de óxido

Conforme a Fig.2.5.1.1, a cinética dos processos de oxidação é traduzida pelas leis de crescimento das películas dos produtos de corrosão. As leis mais freqüentes são:

**a) Linear**

Nos processos em que se verifica a lei linear, o crescimento da película é dado pela expressão:

$$Y = Kt + C$$

onde:

**Y** é a espessura da película;

**K** e **C** são constantes;

**t** é o tempo.

A variação linear esclarece que a espessura da camada será tanto maior quanto maior for o tempo de ação do meio gasoso oxidante. Isto ocorre, digamos, se a camada de óxido não for capaz de proteger o metal subjacente, como já relatado.

Neste caso a oxidação será do tipo uniforme e o fenômeno que governa a corrosão é o das reações de fases (fase metálica oxidante).

**b) Parabólica**

Quando o processo obedece à lei parabólica, o crescimento da espessura da película é expresso por:

$$Y^2 = K_1t + C_1$$

onde:

**K<sub>1</sub>** e **C<sub>1</sub>** são constantes;

**t** é o tempo.

Na variação parabólica, o incremento da velocidade de crescimento da camada de óxido é inversamente proporcional a espessura desta já formada. Esta lei é válida para os processos de oxidação em que a difusão de íons e o deslocamento de elétrons controlam o desenvolvimento da película de óxido, que é protetora.

**c) Logarítmica**

A lei logarítmica traduz uma velocidade de crescimento da película menor do que a encontrada na lei parabólica. Este crescimento é expresso por:

$$Y = \text{LOG}(K_2t)$$

onde:

$K_2$  é uma constante;

$t$  é o tempo.

No caso da variação logarítmica (ou exponencial), a velocidade de oxidação decresce muito mais rapidamente do que na variação parabólica e, para longos intervalos de tempo, ela tende a zero. Neste caso, decresce progressivamente a velocidade de difusão de partículas eletricamente carregadas, no meio de películas de óxidos.

A cinética destes processos varia tanto com o metal como com a temperatura e o meio. Geralmente o processo de oxidação, nas suas diversas etapas, envolve mais de uma lei, podendo iniciar-se com espessura da película aumentando segundo a lei linear, passando depois para a parabólica, prosseguindo de acordo com a lei logarítmica.

Importante é ressaltar que vários metais seguem diferentes leis de crescimento da camada de óxido, em distintos intervalos de temperatura, o que a Tabela 2.5.1 [2] esclarece.

**Tabela 2.5.1 - Leis da velocidade de oxidação, em diferentes intervalos de temperatura de metais puros**

| METAL | Lei da Velocidade de Oxidação °C |             |            |
|-------|----------------------------------|-------------|------------|
|       | Logarítmica                      | Parabólica  | Linear     |
| Al    | < 300                            | 300....475  | > 475      |
| Cu    | < 100                            | > 550       | -----      |
| Mg    | -----                            | < 450       | > 450      |
| Ti    | < 360                            | 360....850  | > 850      |
| Zn    | < 360                            | > 360       | -----      |
| Fe    | < 180                            | 400....1000 | -----      |
| Ce    | -----                            | 30....125   | 125....190 |
| Ta    | < 300                            | > 350       | -----      |
| U     | -----                            | 100....165  | 165....220 |
| Th    | -----                            | 250....350  | 350....500 |

## 2.5.2 MECANISMO ELETROQUÍMICO DA CORROSÃO

A natureza eletroquímica dos processos de corrosão em meio aquoso foi notada ainda nos primórdios do século passado, quando em 1825 Walcker observou a pilha de temperatura diferencial, Davy distinguiu a pilha de tensão diferencial e Becquerel a pilha de concentração diferencial em 1826 e Marianini, em 1830, identificou a pilha de aeração diferencial.

A característica fundamental do mecanismo eletroquímico é que ele só se verifica em presença de um eletrólito. A reação de corrosão é composta de duas reações parciais: uma reação anódica e uma reação catódica que se processam em pontos distintos. A reação anódica é uma reação de oxidação no qual são liberados elétrons, os quais se deslocam para outros pontos do metal onde ocorre a reação catódica que é uma reação de redução. A reação anódica tem como consequência a dissolução do metal, portanto corrosão, ao passo que a reação catódica conduz à redução de espécies presentes no meio, sem a participação do metal sobre o qual ela tem lugar. O mecanismo se traduz no funcionamento de uma pilha de corrosão que requer quatro elementos imprescindíveis, a saber [3]:

- uma área onde se passa a reação anódica, por isso mesmo denominada de área anódica;
- uma área distinta daquela, onde se passa a reação catódica, por isso mesmo denominada de área catódica;
- uma ligação metálica que une ambas as áreas e por onde fluem os elétrons resultantes da reação anódica;
- um eletrólito em contato simultâneo com as mesmas áreas por onde fluem os elétrons resultantes de ambas as reações.

Os cálculos termodinâmicos, embora fornecendo dados sobre a possibilidade ou não de haver corrosão, não fornecem indicação sobre a velocidade com que a corrosão se processa. A velocidade de corrosão é determinada pela intensidade de corrente que circula entre os locais anódicos e catódicos.

A reação de corrosão global é a resultante das reações anódicas e catódicas. Estas estão relacionadas de tal forma que suas velocidades tem que ser as mesmas e qualquer alteração na velocidade de uma delas deve refletir-se na velocidade da outra. Para reduzir a velocidade de corrosão é necessário então diminuir a velocidade de uma das reações, sejam

anódicas ou catódicas. O pH do meio, o seu teor em oxigênio e a temperatura, são fatores que influenciam na velocidade de corrosão.

Na corrosão uniforme a velocidade de corrosão pode ser expressa em perda de peso ou de espessura por unidade de tempo. Não se consideram os produtos de corrosão.

As unidades adotadas são várias. Entre elas, a título ilustrativo, citaremos algumas [1]:

**mdd** (miligrama por decímetro quadrado dia)

**mpy** (mils por ano - adotada nos EUA)

**ipy** (polegadas por ano - EUA)

Os valores apresentados em unidades dessa natureza apresentam valores médios, que dependem da duração da exposição, sendo a velocidade inicial geralmente maior que a final. Por essa razão, deve-se sempre enunciar a duração de exposição quando se apresenta o resultado de uma velocidade de corrosão obtida por ensaio.

Convém lembrar que esta quantificação da corrosão, só é válida para a corrosão generalizada. No caso de pites, uma pequena perda de material pode provocar corrosões graves .

### **2.5.3 TIPOS DE CORROSÃO**

A corrosão pode ser classificada de duas maneiras : quanto ao seu tipo e quanto ao meio em que ocorre.

#### **2.5.3.1 QUANTO AO TIPO DE CORROSÃO**

- **Generalizada** - é a corrosão uniforme. A superfície é corroída de maneira uniforme em toda a sua extensão.
- **Localizada** - a corrosão estabelece-se preferencialmente em alguns pontos discretos e pode ser ainda subclassificada em :
  - **Por pites** - que é caracterizada por perfuração em pontos discretos;
  - **Intergranular**- que e a corrosão preferencial no contorno do grão. É a corrosão mais perigosa porque na maioria das vezes só se pode detectar por micrografias;

- **Seletiva** - quando algum(s) do(s) componente (s) da liga é corroído preferencialmente. Por exemplo, a dezincificação do latão ou a grafitização do ferro fundido cinzento;
- **Sob tensão fraturante** - quando o material sofre ruptura sob a ação conjugada, corrosão-tensão;
- **Esfoliação** - é a corrosão que ocorre com os materiais laminados, em particular o alumínio, que se manifesta pela separação das camadas;
- **Galvânica** - quando houver contatos galvânicos entre materiais diferentes, seja artificial, seja natural. Isto acontece por exemplo, em chapas de alumínio com rebites de latão, em tubo de ferro "novo" em contato com tubo de ferro "velho";
- **Correntes de fuga** - é a corrosão que ocorre com instalações enterradas ou submersas próximas a rede de estradas de ferro eletrificada, próximas as instalações de retificação da corrente elétrica ou ainda próximas às linha de transmissão de alta e extra alta tensão;
- **Frestas (crevice)** - quando houver frestas. Estas frestas podem ser naturais nas juntas ou provocadas nos depósitos.

### **2.5.3.2 QUANTO AO MEIO**

**Gasoso** - quando o meio for constituído pelos gases. O ar atmosférico é o exemplo.

O ar atmosférico também pode ser subclassificado em :

**Poluído** - aquele que, além do oxigênio, nitrogênio, vapor d'água e gás carbônico (componentes naturais), contém outros gases ou substâncias;

Comporta ainda subdivisões em:

- **Industrial** - que contém essencialmente SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S e outros produtos químicos;
- **Marinho** - que contém, essencialmente, cloreto;
- **Urbana** - que contém SO<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, CO e NO<sub>2</sub> em concentrações baixas;
- **Tropical** - que possui alta umidade relativa do ar e temperatura "elevada";

Combinações das anteriores:

- **Não poluído ou rural** - é aquele que contém essencialmente os componentes normais do ar e eventualmente poeira (sólidos - (SiO<sub>2</sub>) em suspensão);

**Sólido** - que é representado particularmente pelos solos. Naturalmente também comporta subdivisões:

**arenoso**

**argiloso**

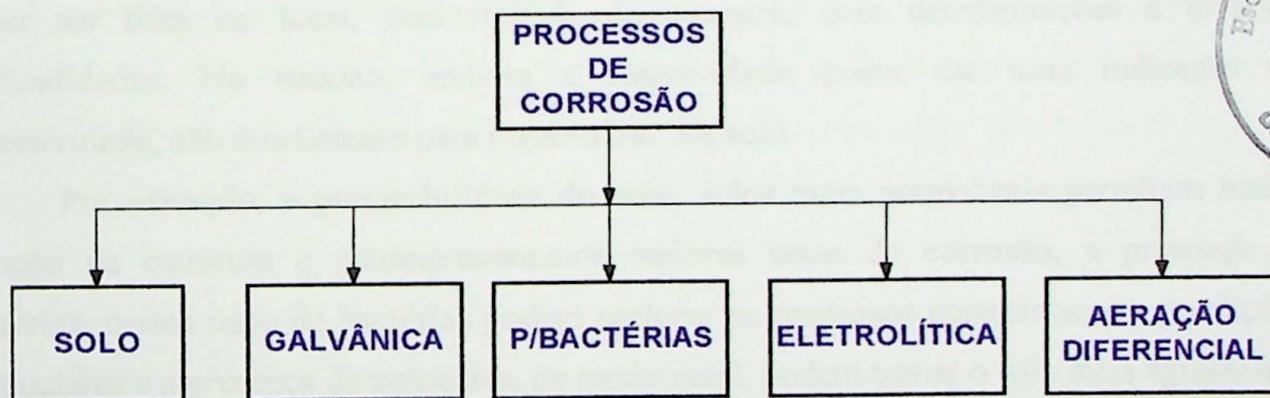
**outros**

**Líquido** - que também comporta subdivisões :

- **Natural** - representado pelas águas que, também comporta subdivisões em
- **Doce** - representado pelos rios e lagos.
- **Salina** - representado pelos mares e oceanos.
- **Outros** - representados pelos produtos químicos, tais como álcool, ácidos, éteres, ésteres [5].

## 2.6 PROCESSOS DE CORROSÃO

A seguir apresentaremos os principais processos associados à corrosão, aos quais as fundações do tipo grelha dimensionada estão mais suscetíveis:



### 2.6.1 CORROSÃO NO SOLO

Designa-se genericamente de corrosão pelo solo aos processos corrosivos observados em estruturas enterradas. A esta complexa forma de corrosão essencialmente eletroquímica estão sujeitos: oleodutos, gasodutos, adutoras, trilhos, cabos subterrâneos, fundações de estruturas das torres de transmissão e telecomunicações quando enterrados ou em contato com o solo. A agressividade dos solos depende essencialmente dos seus componentes agressivos e da sua constituição.

Os solos variam largamente nas características físicas e químicas que influenciam na sua agressividade. As características físicas de importância na corrosão são aquelas que determinam a permeabilidade do solo ao ar e a água. As substâncias químicas que influenciam na corrosão são aquelas solúveis na água. A presença de algumas aumenta e de outras diminui a agressividade do meio. A resistência elétrica do solo é determinada não só pela natureza e concentração de íons condutores, como pelo teor de umidade, pela temperatura, outros. Além disso, ainda há possibilidade de corrosão por correntes parasitas e corrosão por bactérias.

A corrosão nos solos também é um fenômeno eletroquímico, mas tendo em vista os muitos fatores em jogo e ainda a inter-relação dos seus efeitos, o mecanismo ainda é mais complexo do que na corrosão em água, o que torna também mais complexo o seu estudo em laboratório e em condições naturais.

Os ensaios normalmente efetuados para avaliar a agressividade dos solos são: resistividade elétrica, pH, grau de aeração, condutibilidade elétrica, capacidade de retenção de água, acidez total, alcalinidade, teor em cloretos, sulfatos, sulfetos e bactérias. É muito freqüente a determinação apenas da resistividade elétrica, que apresenta a vantagem de poder ser feita no local, sem retirada de amostra, com determinações a diversas profundidades. No entanto, embora a resistividade possa dar uma indicação da agressividade, não é suficiente para caracterizar um solo.

Por exemplo, a permeabilidade do solo, solos mais permeáveis permitem maior aeração da estrutura e conseqüentemente maiores taxas de corrosão, a presença de bactérias, certos tipos de bactérias podem acelerar os processos corrosivos, em condições particulares e a presença de poluentes, de modo geral, podem tornar o solo mais agressivo.

Exemplifiquemos: a agressividade dos solos aumenta a medida que cresce o teor de componentes ácidos (ácidos úmicos, cloretos, sulfatos e sulfetos). Para valores de  $\text{pH} < 6,5$  os solos ácidos passam a ser gradativamente mais agressivos e a corrosão comumente é do tipo oxigênio. Os componentes básicos, digamos em solos calcários, praticamente não causam ataque sensível. Para a corrosão ser nítida, necessário é que o teor de umidade seja superior a uns 20 %. Solos pedregosos e arenosos - caracterizados por alta permeabilidade - comumente são fortemente areados e permeáveis a água. Nestes solos, o ataque é semelhante à corrosão atmosférica. Em solos não-porosos (argilosos, pantanosos), muito pequena é a quantidade de oxigênio livre. Nestes, muitas espécies de bactérias encontram seu habitat, se contiverem gipsita e substâncias orgânicas haverá corrosão por

microorganismos. Evidente é o papel da condutibilidade elétrica de solos sobre sua agressividade. Com efeito, solos secos praticamente não conduzem eletricidade, pois inexistem eletrólitos aquosos para fechar o circuito da corrente de corrosão. A resistência elétrica específica (ohm.cm), é o inverso da condutibilidade elétrica. Assim, corrosividade dos solos aumenta à medida que decresce aquela resistência. Os seguintes valores de medida justificam a assertiva [4]:

| <b>RESISTÊNCIA ESPECÍFICA, KΩ.cm</b> | <b>INTENSIDADE DO ATAQUE</b> |
|--------------------------------------|------------------------------|
| < 2,3                                | forte                        |
| 2,3 a 5,0                            | moderado                     |
| 5,0 a 10,0                           | fraco                        |
| > 10,0                               | desprezível                  |

Um solo de resistividade baixa é mais agressivo, possui umidade permanente e sais minerais dissolvidos, enquanto que um solo de resistividade elevada é menos agressivo e possui menos umidade e sais minerais dissolvidos.

Se em solos existirem bolsas de ar, células de aeração diferencial originar-se-ão e a corrosão será punctiforme, portanto especialmente danosa. Danos de corrosão, também de ordem local, sobrevirão se por exemplo, uma fundação atravessar um depósito salino ou estiver em contato com certas águas minerais. Então, células de concentração formar-se-ão. Variações do nível do lençol de água subterrânea influem grandemente na corrosão em solos, bem como efeitos de correntes elétricas dispersas e o ataque por microorganismos.

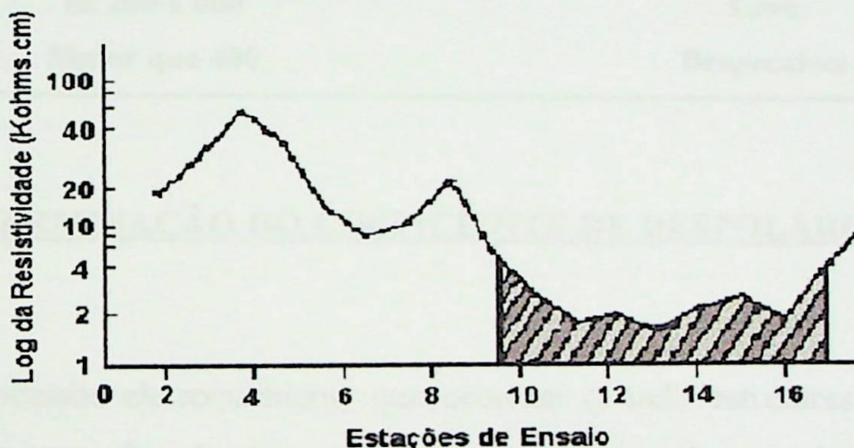
Desta forma então as informações mais importantes, para o projetista, são aquelas referentes a corrosividade do solo. Estas informações devem ser obtidas em campo, através de ensaios no solo. Existem vários ensaios e critérios para a avaliação da corrosividade de um solo. Os mais utilizados são os seguintes :

- determinação da resistividade aparente do solo;
- determinação do pH e do potencial de óxido-redução do solo;
- determinação do coeficiente de despolarização do solo;
- determinação da natureza e do teor de sais solúveis existentes no solo.

Também é importante, para a avaliação da corrosividade de um solo, o histórico de corrosão ocorrida em estruturas metálicas enterradas no solo.

Normalmente é traçado apenas o perfil de resistividade do solo das áreas onde serão implantadas as fundações das torres de transmissão. No entanto, convém determinar, também, o potencial de óxido-redução e o grau de despolarização do solo, pois, estes dois últimos parâmetros fornecem subsídios para medir, respectivamente, a influência da ação microbiológica e dos sais dissolvidos na corrosão de estruturas soterradas.

Para o levantamento do perfil de resistividade, fixam-se estações de ensaios ao longo da faixa de servidão das linhas de transmissão. Em cada estação, a resistividade aparente é determinada pelo processo de Wenner [18]. Uma vez determinada a resistividade, em cada estação, deve ser feito um gráfico onde, em abcissas são marcadas as estações e, em ordenadas, os logaritmos dos valores da resistividade. A Fig.2.6.1.1 [4] ilustra este tipo de gráfico.



**Fig.2.6.1.1 - Perfil da resistividade do solo**

Examinando-se o gráfico da Fig.2.6.1.1, vê-se que o terreno em estudo apresenta problemas na faixa compreendida entre as estações de número 9 a 17. As fundações enterradas (ou a serem enterradas) nesta faixa, deverão receber proteção catódica.

Pode-se adotar o seguinte critério para a avaliação da corrosividade do solo [4]:

| <b>VALOR DA RESISTIVIDADE<br/>(KΩ.cm)</b> | <b>GRAU DE<br/>CORROSIVIDADE</b> |
|---|----------------------------------|
| menor que 1                               | <b>muito corrosivo</b>           |
| de 1 a 4                                  | <b>Corrosivo</b>                 |
| de 4 a 10                                 | <b>Moderadamente corrosivo</b>   |
| maior que 10                              | <b>pouco corrosivo</b>           |

### 2.6.1.1 MEDIDA DO POTENCIAL DE ÓXIDO-REDUÇÃO DO SOLO

O potencial de óxido-redução dá uma indicação da atividade de bactérias anaeróbicas que, por efeito da despolarização da eventual célula de corrosão existente, vai aumentar a agressividade do solo. Starkey e Wight estabeleceram a seguinte relação entre o potencial de óxido-redução e a corrosividade [4].

| <b>POTENCIAL DE ÓXIDO-REDUÇÃO<br/>(mV)</b> | <b>CORROSIVIDADE DO SOLO</b> |
|--|------------------------------|
| <b>Menor que 100</b>                       | <b>Severa</b>                |
| <b>de 100 a 200</b>                        | <b>Moderada</b>              |
| <b>de 200 a 400</b>                        | <b>Leve</b>                  |
| <b>Maior que 400</b>                       | <b>Desprezível</b>           |

### 2.6.1.2 DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE DE DESPOLARIZAÇÃO DO SOLO

Os processos eletroquímicos, que ocorrem quando estruturas de aço enterradas estão sujeitas a corrosão, são controlados principalmente pelo grau de polarização. Se não houvesse o fenômeno da polarização, dificilmente seriam encontrados solos que possuíssem uma corrosividade tão baixa para que se pudesse usar neles estruturas de aço enterradas. Com base nesse fenômeno, Rosenquist idealizou um ensaio que permite calcular o coeficiente de despolarização de um solo. Este coeficiente é uma indicação da maior ou menor facilidade com que uma célula do corrosão, formada em estruturas metálicas enterradas, sofre despolarização.

Rosenquist determinou com o auxílio de sua sonda, o coeficiente de despolarização e a resistividade de vários tipos de solos.

Esses solos tinham sido previamente classificados em grupos, de acordo com as suas corrosividades conhecidas a partir de dados experimentais. Os grupos são os seguintes

**grupo de corrosividade 1** : corrosividade desprezível;

**grupo de corrosividade 2** : corrosividade muito leve;

**grupo de corrosividade 3:** corrosividade que em condições desfavoráveis pode danificar estruturas de aço delgadas;

**grupo de corrosividade 4 :** corrosividade que normalmente danificará estruturas de aço.

**grupo de corrosividade 5 :** corrosividade muito alta. Não é recomendada a utilização de estruturas de aço.

Com base nessas informações elaborou-se a seguinte tabela, mostrando a relação entre grupos de corrosividade, coeficiente de despolarização e resistividade [4,5]:

| <b>COEFICIENTE DE<br/>DESPOLARIZAÇÃO</b>       | <b>40 %</b> | <b>40-60 %</b> | <b>60-80 %</b> | <b>80-100 %</b> |
|--|-------------|----------------|----------------|-----------------|
| <b>Resistividade do solo 0,10 KΩ.cm</b>        | <b>2</b>    | <b>3</b>       | <b>4</b>       | <b>5</b>        |
| <b>Resistividade do solo 0,10-0,50 KΩ.cm</b>   | <b>2</b>    | <b>3</b>       | <b>3-4</b>     | <b>4-5</b>      |
| <b>Resistividade do solo 0,50-2,50 KΩ.cm</b>   | <b>2</b>    | <b>2</b>       | <b>3</b>       | <b>4</b>        |
| <b>Resistividade do solo 2,50-12,50 KΩ.cm</b>  | <b>1</b>    | <b>2</b>       | <b>2-3</b>     | <b>3-4</b>      |
| <b>Resistividade do solo maior 12,50 KΩ.cm</b> | <b>1</b>    | <b>1</b>       | <b>1-3</b>     | <b>2-3</b>      |

## **2.6.2 CORROSÃO GALVÂNICA OU BIMETÁLICA**

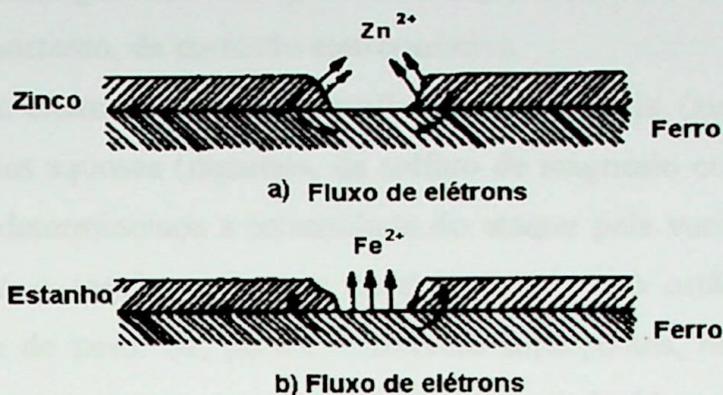
Ocorre quando dois metais diferentes em contato elétrico estão expostos ao mesmo meio agressivo. Este é um caso extremo de heterogeneidade de superfície exposta a processo de corrosão. Neste caso a reação anódica está localizada em um metal e a reação catódica está localizada no outro.

A tabela de potenciais padrão de eletrodo (Tabela 2.2.1 Capítulo 2) pode ser utilizada para dar uma indicação de qual o metal que funciona como anodo e qual como catodo nesse tipo de contato.

Isto apenas consiste numa orientação aproximada, uma vez que os potenciais sob condições práticas podem ser muito diferentes dos valores padrão. Por exemplo, o chumbo e o estanho são anódicos para o níquel na água do mar, embora o níquel tenha o potencial de eletrodo mais negativo. Pode-se elaborar series galvânicas para um ambiente particular.

A corrosão galvânica pode ocorrer em revestimentos metálicos sobre outros metais, no caso de haver uma falha no revestimento, como ilustrado na Fig.2.6.2.1 [1].

No primeiro caso, o zinco é mais anódico que o ferro e este corrói. No segundo, o ferro é que é anódico em relação ao estanho e se corrói.



**Fig.2.6.2.1 - Representação esquemática de um processo de corrosão**

A Fig.2.6.2.1 dá a representação esquemática de um processo de corrosão ocorrendo em uma falha de revestimento.

- a) zincado
- b) estanhado.

Um exemplo comum de corrosão galvânica ocorre nas fundações de linhas de transmissão. O aço das fundações forma um par galvânico com o material de recobrimento que é o zinco. O zinco é o mais anódico dos dois metais e se corrói.

A intensidade da corrosão depende das áreas relativas dos dois metais. Se a área do metal anódico é pequena comparada com a do metal catódico, a corrosão será muito localizada.

Exemplifiquemos com a corrosão causada no par ferro - cobre, onde o ferro, sendo o metal anódico se corrói.

No caso de rebites de cobre em chapas de ferro, haverá corrosão da chapa nas imediações do rebite. No caso de rebites de aço em chapas de cobre, a corrosão concentrar-se-á nos rebites, provocando a sua rápida corrosão.

A forma de corrosão em estudo é um típico caso de corrosão eletroquímica acelerada, que sobrevem quando dois materiais metálicos dissimilares (isto é, de potenciais diferentes), estão unidos entre si e, simultaneamente, em contato com um eletrólito.

À corrosão bimetálica estão sujeitos pares metálicos imersos num eletrólito ou simplesmente expostos a ambientes úmidos (corrosão atmosférica).

A conseqüente diferença de potencial  $E$  origina um fluxo de elétrons livres entre os dois materiais. A correlata intensidade da corrente de corrosão  $I$ , porém, tem maior influência sobre o efeito galvânico do que a diferença de potencial  $E$ , que dá força motriz daquela corrente e, portanto, da corrosão eletroquímica.

Para ilustrar o efeito galvânico, mergulhemos dois metais (zinco e aço carbono, por exemplo) em soluções aquosas (digamos, de sulfato de magnésio ou de ferro e, ainda, em cloreto de sódio) e determinemos a intensidade do ataque pela variação do peso de cada metal. Verificar-se-á o seguinte: quando os dois metais não estão em contato, ambos experimentam perda de peso. Se, porém, estiverem superpostos, no zinco acusará muito maior perda de peso, enquanto o peso do ferro aumentará devido a deposição de produtos de corrosão.

Assim, a corrosão galvânica é uma forma de corrosão eletroquímica acelerada: o zinco é sacrificado e o aço é protegido. No zinco predomina, pois, oxidação e ele é o anodo, enquanto que no aço, de maior resistência à corrosão, prevalece a redução e ele funciona como catodo da assim formada pilha galvânica.

Muito freqüente é a corrosão galvânica, pois imposições de ordem construtiva e econômica exigem muitas vezes a união de peças de diferentes materiais metálicos. Quando tais peças estiverem em contato com qualquer eletrólito, uma corrente de corrosão formar-se-á e elétrons livres, estes fluem entre os dois metais onde íons migram no eletrólito, fechando a corrente da corrosão.

A corrosão galvânica comumente é governada pela reação de redução (polarização catódica). Assim, o metal ou liga quimicamente mais resistente será protegido a custa do outro material metálico, de menor resistência à corrosão, e que será preferencialmente o corroído. Conforme as condições, a corrosão galvânica será do tipo oxigênio ou do tipo hidrogênio e, sempre, fenômenos de polarização intervirão. De enorme importância, o efeito da polarização é devida ao desenvolvimento de filmes de produtos de corrosão protetores.

Isto posto, em todos os casos de corrosão galvânica será alterado o potencial de cada um dos metais, o do metal mais nobre aproxima-se progressivamente ao potencial do menos nobre. Assim sendo, decrescerá a diferença de potencial  $E$  do par metálico em decorrência do aumento da resistência elétrica global  $R$  e, portanto, a intensidade da corrente  $I$  de corrosão igualmente diminuirá.

Outro importante fator de influência na corrosão galvânica é a relação entre a área do metal mais nobre - área catódica - e a do metal menos nobre - área anódica. A fim de interpretar o efeito deste fator, necessário é ter presente que o anodo é aquele metal em que a corrente de corrosão (em forma de íons metálicos dissolvidos) entra no eletrólito. O catodo por sua vez é o metal da respectiva pilha galvânica que recebe a corrente de corrosão do eletrólito.

Assim, o metal do anodo sofre corrosão e o do catodo experimenta a proteção catódica. Além disso, se a área anódica for pequena, grande é a densidade da corrente elétrica que por ela passa e, ainda, a velocidade de corrosão do anodo aumenta a medida que cresce a densidade da corrente anódica.

É comum na corrosão acelerada, devida a efeitos galvânicos, o ataque ser mais intenso na proximidade da união de materiais metálicos dissimilares do que em locais dela distantes. O efeito de distância depende da condutibilidade elétrica da solução agressiva.

Assim, em soluções de alta resistência elétrica o decorrente ataque leva a formação de alvéolos. Importante é frizar, que a corrosão galvânica é facilmente identificada pelo fato de os danos serem mais intensos na proximidade do local de união de materiais metálicos de potenciais diferentes [1,2,3,4,5,10].

### **2.6.3 CORROSÃO MICROBIOLÓGICA**

A corrosão microbiológica [5], também chamada microbiana ou biológica, é aquela onde a corrosão do material metálico se processa sob a influência de microrganismos, quase que exclusivamente bactérias, embora existam exemplos de corrosão atribuídos a fungos e algas. Quando ocasionada por bactérias é chamada corrosão bacteriana.

Dada a variedade de ambientes que podem proporcionar crescimento de bactérias, algas ou fungos, muitos são os equipamentos que podem sofrer a corrosão microbiológica. Entre esses ambientes podem ser citados: água do mar, de rios e de sistemas de refrigeração, regiões pantanosas, sedimentos oleosos, solos contendo resíduos orgânicos ou sais como sulfatos, nitratos, fosfatos ou ainda enxofre.

Os microrganismos, devido a um ou mais dos seguintes fatores, podem concorrer para que haja corrosão:

- influência direta na velocidade das reações anódicas e catódicas;
- modificação na resistência de películas existentes nas superfícies metálicas pelos produtos do metabolismo microbiano;

- originam meios corrosivos;
- formação de tubérculos que possibilitam o aparecimento de pilhas de aeração diferencial;

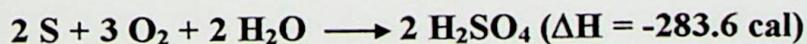
Pode-se classificar a corrosão microbiológica em:

- corrosão devida a formação de ácidos;
- corrosão por despolarização catódica;
- corrosão por aeração diferencial;
- corrosão por ação combinada de bactérias;
- corrosão devida a formação de ácidos.

### **2.6.3.1 CORROSÃO DEVIDO À FORMAÇÃO DE ÁCIDOS**

Um grupo de bactérias do gênero *Thiobacillus* oxida enxofre, ou os compostos de enxofre, o sulfato, com a simultânea produção de ácido sulfúrico que funciona como agente corrosivo. Os compostos de enxofre são geralmente: sulfito ( $\text{SO}_3^{2-}$ ), tiosulfato ( $\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$ ) e diversos politionatos como o tetracionato ( $\text{S}_4\text{O}_6^{2-}$ ). Algumas bactérias metabolizam sulfetos solúveis, se a concentração de  $\text{H}_2\text{S}$  livre estiver abaixo de 200 ppm e estão freqüentemente associados com microrganismos que convertem sulfatos ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) para sulfetos ( $\text{S}^{2-}$ ) e sulfetos para enxofre.

As três espécies mais envolvidas nos processos de corrosão são: *Thiobacillus thioparus*, *Thiobacillus thiooxidans* e *Thiobacillus concretivorus*. Essas bactérias são aeróbias, isto é, necessitam de presença de oxigênio e autotróficas sintetizando seu material celular de compostos inorgânicos de carbono e nitrogênio. A energia para essa síntese é proveniente da oxidação do enxofre ou seus compostos, como exemplifica a reação:



A temperatura ótima para crescimento dessas bactérias esta na faixa de 25-30°C e não sobrevivem na faixa de 55-60°C. Seus processos metabólicos ocasionam em alguns casos, valores de pH em torno de 2.

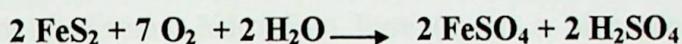
Como exemplo de corrosão provocada por essas bactérias tem-se a destruição da ferragem de aço carbono em contato com esgoto ou águas poluídas, devido ao desprendimento de gás sulfídrico dessa águas. Esse gás é oxidado, pelas bactérias, para

ácido sulfúrico que ocasiona então a corrosão do aço. Em certos casos até a borracha vulcanizada é atacada por essas bactérias [5].

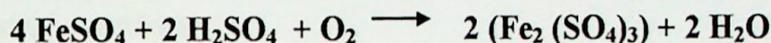
### 2.6.3.2 OXIDAÇÃO DE PIRITAS E ÁCIDO SULFÚRICO POR FERROBACILLUS FERROOXIDANS

Ferrobacillus ferrooxidans são bactérias capazes de acelerar a oxidação de depósitos piríticos ( $\text{FeS}_x$ ) para ácido sulfúrico, em pH ácido. Pode-se admitir a série de reações, considerando-se a pirita como  $\text{FeS}_2$  :

- oxidação da pirita



- oxidação do sulfato ferroso



- hidrólise do sulfato férrico



ou



- oxidação da pirita pelo sulfato férrico



Essas bactérias são responsáveis pela natureza ácida das águas de minas de ouro e de carvão, pois oxidam a pirita presente à ácido sulfúrico. Essas águas, devido ao seu caráter ácido, são corrosivos para as máquinas de bombeamento bem como para as instalações das minas.

A proteção contra essa corrosão pode ser orientada para o seguinte ponto neutralização da acidez com óxido de cálcio (cal) [5].

### 2.6.3.3 FUNGOS OU BACTÉRIAS CELULOLÍTICAS QUE FERMENTAM MATERIAL CELULÓSICO A ÁCIDOS ORGÂNICOS

Em alguns casos, fundações metálicas enterradas são revestidas com material celulósico, como, por exemplo, aniagem, impregnado com asfalto ou betume. A celulose pode ser oxidada, por certas bactérias como *Butyribacterium retigeri*, produzindo ácidos acético e butírico e dióxido de carbono. Tem-se, portanto, além da deterioração do

revestimento à corrosão das fundações devida aos ácidos formados. Essa corrosão é mais freqüente em meio anaeróbio ou muito pouco aerado.

Certos fungos podem acumular ácidos orgânicos, mesmo em condições aeróbias, podendo então ocasionar corrosão de materiais metálicos como cobre, ferro e alumínio [5].

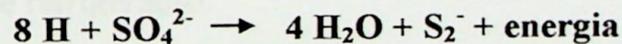
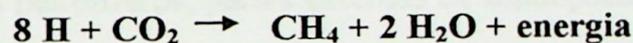
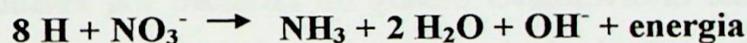
#### **2.6.3.4 CORROSÃO POR DESPOLARIZAÇÃO CATÓDICA**

O ferro em meios deaerados, como águas ou solos, normalmente não sofre corrosão considerável. Entretanto em certos casos, mesmo em ausência de aeração, observa-se corrosão acentuada. Isso ocorre em águas ou solos úmidos contendo bactérias capazes de utilizarem, em seus metabolismos, hidrogênio livre (como o hidrogênio catódico) ou hidrogênio combinado de compostos orgânicos.

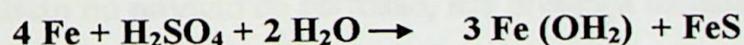
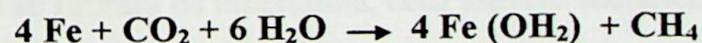
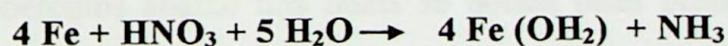
Entre essas bactérias estão as:

- redutoras de nitrato, como a *Micrococcus denitrificans*;
- redutoras de dióxido de carbono, como a *Methanobacterium omeliansky*;
- redutoras de sulfato, como a *Desulfovibrio desulfuricans*.

As reações que se processam são, respectivamente:



Para o caso de corrosão do ferro podem ser escritas as equações:



Essas bactérias, que são anaeróbias, isto é, se desenvolvem em ausência de ar, retiram a energia necessária aos seus processos metabólicos, das reações de oxi-redução apresentadas.

No campo da corrosão tem sido mais freqüentes os casos relacionados com as bactérias redutoras de sulfato. Essas bactérias geralmente ocorrem:

- em regiões de estagnação em linhas de fluxo;
- debaixo de depósitos ou em frestas em linhas de fluxo com baixas velocidades;
- debaixo de lamas ou em parte inferior de pites;
- em filtros, principalmente de areia;

- em torno de fundações enterradas;
- em poços de recuperação secundária de petróleo;
- em tubulações onde circula água que tenha sofrido processo de retirada de oxigênio com sulfito de sódio, que é oxidado o sulfato de sódio.

O gênero *Desulfovibrio* consiste em um pequeno grupo de espécies estritamente anaeróbias, que são caracterizadas por sua capacidade de reduzir sulfato à sulfeto.

Somente dois gêneros de bactérias conseguem reduzir sulfato inorgânico, são: *Desulfovibrio* e *Clostridium*, sendo que dessa última só uma espécie a *Clostridium nigrificans*.

As bactérias redutoras de sulfato, gênero *Desulfovibrio* aparecem geralmente como bastonetes ligeiramente curvos. O crescimento dessas bactérias depende de:

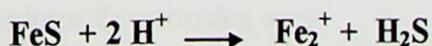
- condições favoráveis de pH entre 5,5 - 5,8 , sendo 7,0 o valor ótimo;
- ausência de oxigênio;
- presença de sulfato;
- presença de nutrientes incluindo matéria orgânica;
- temperatura, entre 25 - 44°C;

A corrosão produzida por bactérias do gênero *Desulfovibrio* tem sido observada em: revestimentos de poços petrolíferos, partes externas de fundações enterradas, poços de águas profundas, sistemas de refrigeração.

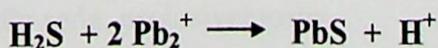
A corrosão é caracterizada pela:

- presença de tubérculos abaixo dos quais se notam pites profundos, ficando o material quando se retiram os tubérculos, com aspecto metálico brilhante;
- presença de sulfeto no produto de corrosão, sua presença isolada não é evidência conclusiva pois o sulfeto pode provir de outra fonte.

Para identificar a formação de sulfeto de ferro, no produto de corrosão, pode-se proceder da seguinte maneira, pequena quantidade do produto de corrosão é colocada em tubos de ensaio e tratada por ácido clorídrico ou sulfúrico ocorrendo a reação:

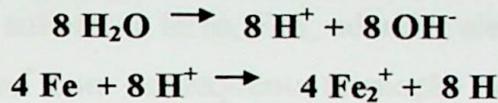


O gás sulfídrico -  $\text{H}_2\text{S}$ , despreendido é caracterizado pelo seu odor característico ou pelo escurecimento de um papel de filtro umedecido com acetato ou nitrato de chumbo, devido a formação de sulfeto de chumbo -  $\text{PbS}$ , que é preto:

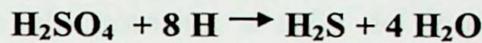


Von Wolzogen Kühr apresentou um mecanismo de ação das bactérias redutoras de sulfato, baseado na despolarização catódica. A aceleração da reação catódica depende da presença da enzima hidrogenase, que algumas espécies de bactérias têm, e que pode ser considerada um catalisador biológico permitindo ao hidrogênio reduzir o sulfato. A sequência das reações pode ser apresentada da seguinte forma:

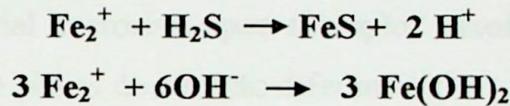
- anodo



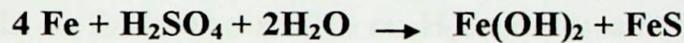
- catodo, despolarização catódica



Os produtos de corrosão podem ser:

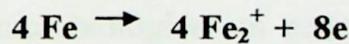


e a reação total pode ser então escrita:



Sob o ponto de vista eletroquímico, podem ser escritas da seguinte forma:

- anodo



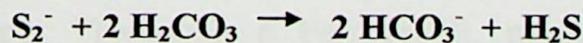
- catodo



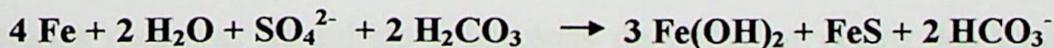
O hidrogênio, formado na área catódica pode ficar adsorvido ao material metálico, polarizando-o e portanto reduzindo a velocidade do processo corrosivo. Entretanto em presença de bactérias redutoras de sulfato, essas fazem uma despolarização catódica, acelerando portanto o processo corrosivo, processando-se a reação:



Se houver presença de ácido carbônico, tem-se:



A reação total, com os produtos de corrosão, será:



Deve-se notar a relação de 3:1 entre o Fe (OH)<sub>2</sub> e o FeS. Esse valor foi determinado por análise do produto de corrosão. Confirma-se que a ação corrosiva não é somente devida ao H<sub>2</sub>S, pois senão a reação seria, exclusivamente:



O crescimento autotrófico das bactérias redutoras de sulfato é feito à expensas do  $\text{CO}_2$  ou  $\text{CO}_3^{2-}$  como fonte de carbono e o hidrogênio como fonte de energia.

Quando a concentração de  $\text{Fe}_2^+$  for pequena pode ocorrer a formação de FeS que fica aderido à superfície do metal ocasionando a polarização da área anódica, retardando, portanto, o processo corrosivo. Entretanto, em concentrações mais elevadas de  $\text{Fe}_2^+$ , há formação de sulfeto de ferro, floculento, e não aderente, e o processo corrosivo é intenso. Mesmo que já esteja formado o sulfeto de ferro, FeS, aderido, ele será removido se houver aumento da concentração de  $\text{Fe}_2^+$  com conseqüente formação de grandes quantidades de FeS floculento e não aderente.

Alguns autores admitem não somente a ação de despolarização catódica pelas bactérias mas também uma ação conjunta de diversos fatores citando-se entre esses:

- a formação de material corrosivo por exemplo, enxofre ou ácidos, a partir de sulfeto e formação de pilhas de aeração diferencial;
- a influência do  $\text{H}_2\text{S}$  na força eletromotriz da pilha Fe - H funcionando a bactéria com a finalidade de fornecer o sulfeto ou  $\text{H}_2\text{S}$ . Em presença de sulfeto a força eletromotriz da pilha Fe-H permanece elevada em toda faixa de pH, ao passo que em ausência de sulfeto a força eletromotriz cai para valor muito baixo.

Ocorrem casos de corrosão microbiológica em que se observa ação simultânea de bactérias. Assim por exemplo, pode-se ter:

- redução de sulfato e formação de ácido devido a ação das bactérias redutoras de sulfato forma-se o  $\text{H}_2\text{S}$  que é oxidado para  $\text{H}_2\text{SO}_4$ , pela espécie *Thiobacillus thiooxidans*;
- redução de sulfato e oxidação de sulfeto, o sulfeto formado pelas bactérias redutoras de sulfato é oxidado por certas bactérias, inclusive *Thiobacilli*, para enxofre elementar que é substância muito corrosiva para materiais ferrosos;
- oxidação de enxofre elementar (de origem química ou biológica) provocada simultaneamente por *Thiobacilli* e *Ferrobacilli*, produzindo mais ácido e, evidentemente, corrosão mais rápida;
- bactérias redutoras de sulfato e bactérias de ferro, no centro dos tubérculos, ocasionados pelas bactérias de ferro, há o crescimento de bactérias anaeróbias redutoras de sulfato, ocasionando então a corrosão localizada abaixo desses tubérculos, formando pites. Quando se remove um tubérculo de óxido de ferro,  $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ , podemos observar:

- ⇒ resíduo preto de sulfeto de ferro, FeS, não magnético e que desprende H<sub>2</sub>S quando reage com ácidos, como clorídrico ou sulfúrico, corrosão microbiológica;
- ⇒ resíduo escuro de magnetita Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>, óxido de ferro magnético, produto formado pelo processo de corrosão por aeração diferencial.

#### **2.6.4 CORROSÃO ELETROLÍTICA**

Designa-se corrosão eletrolítica aos processos corrosivos de natureza eletroquímica, ocasionados em estruturas metálicas enterradas ou submersas, como resultado de um fluxo indesejável de corrente contínua dispersa no eletrólito. Embora há na literatura alusão ao fato de que correntes com frequência entre 50 -120 Hz não causam maiores danos à corrosão, autores como Uruchurtu et all [11] afirmam que nesta faixa de frequência existe o processo corrosivo e dependem da intensidade destas correntes. As instalações mais sujeitas a este tipo de ataque são os oleodutos, adutoras, fundações de estruturas de transmissão, cabos elétricos e cabos de comunicações enterrados.

Os casos estudados anteriormente envolveram sempre processos eletroquímicos espontâneos, isto é, a diferença de potencial se origina dos potenciais próprios dos materiais metálicos envolvidos no processo corrosivo. Existem entretanto, correntes ocasionadas por potenciais externos que produzem casos severos de corrosão.

Estruturas como fundações e tubulações enterradas, como oleodutos, gasodutos, adutoras, minerodutos e cabos telefônicos, estão frequentemente sujeitas a esses casos devido as correntes elétricas de interferência que abandonam o seu circuito normal para fluir pelo solo ou pela água. Essas correntes elétricas são também chamadas correntes de fuga ou parasitas.

Quando estas correntes atingem instalações metálicas enterradas podem ocasionar corrosão a essas instalações para então retornar ao circuito original através do solo ou da água.

Como as grandezas dessas correntes são maiores que as originadas na própria estrutura metálica, a corrosão verificada pode ser muito intensa. Esse tipo de corrosão é chamada corrosão por eletrólise ou eletrolítica e pode-se defini-la como a “deterioração” da superfície externa de um metal forçado a funcionar como anodo ativo de uma célula ou pilha eletrolítica. Geralmente as áreas corroídas estão livres de produto de corrosão e,

como é uma forma de corrosão localizada, em pouco tempo ocorre a perfuração das instalações, no caso de tubulações.

No caso de fundações de linhas de transmissão, a cobertura de zinco é rapidamente consumida pela ação destas correntes indesejáveis.

As correntes de fuga que produzem maiores danos são as provenientes de correntes contínuas mas também de correntes alternadas de baixa frequência. Estima-se que uma corrente alternada de 60 ciclos cause cerca de 1% do dano produzido por uma corrente contínua equivalente [4]. Atualmente há estudos de que estes danos podem chegar até 25%, conforme o nível de corrente circulante [11]. As principais fontes destas correntes de fuga são: instalações de solda elétrica, instalações de eletrodeposição (galvanoplastias), sistemas de tração elétrica (trens, bondes e metrô), sistemas de proteção catódica (principalmente por corrente impressa) e as correntes advindas pelos cabos pára-raios das linhas de transmissão quando energizadas [12], sendo neste último caso citado a possibilidade de danos ocasionados por correntes originadas por campos elétricos e magnéticos.

As correntes de interferência podem ser classificadas em:

- **estáticas** - que tem amplitude e percursos constantes. Como exemplo tem-se os sistemas de proteção por corrente impressa ou forçada;
- **dinâmicas** - são as que variam continuamente de amplitude e/ou nos seus percursos. Como exemplo tem-se os sistemas de tração elétrica e as correntes que circulam nos cabos pára-raios de linha de transmissão.

A taxa de corrosão resultante das correntes de interferência depende principalmente dos seguintes fatores:

- intensidade e densidade da corrente;
- distância entre as estruturas interferente e interferida e localização da fonte de corrente interferente;
- existência ou não de revestimento e qualidade deste;
- localização de juntas isolantes;
- resistividade do meio.

Estas correntes são devidas a deficiência de isolamento de alguma parte de um circuito que se encontra a um potencial diferente do meio.

Como a resistência dos metais é muito menor que a resistência do solo ou água, as estruturas metálicas enterradas ou imersas constituem um novo circuito por onde passam as correntes de fuga.

A Fig.2.6.4.1 [4] ilustra um exemplo típico da corrosão, causada por corrente de fuga.

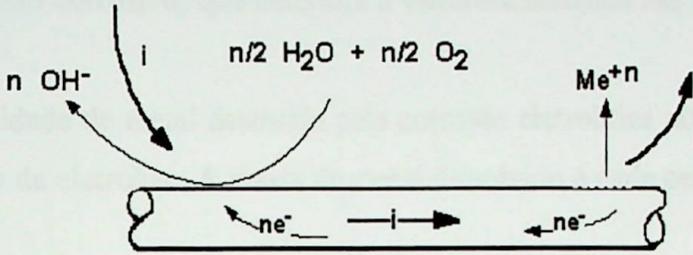


Fig.2.6.4.1 - Detalhe da corrosão por corrente de fuga

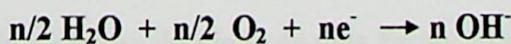
Como se observa na Fig.2.6.4.1, se houver qualquer descontinuidade ou mesmo alta resistividade elétrica no circuito de retorno (tubulação ou ferragem da fundação) haverá fuga da corrente para a instalação metálica de baixa resistividade por intermédio do solo. A corrosão irá ocorrer no ponto de retorno da corrente à fonte.

Este tipo de corrosão é também conhecido por "corrosão por eletrólise", porque o seu mecanismo é essencialmente de eletrólise.

Como se observa na Fig.2.6.4.1, o movimento dos elétrons é no sentido oposto ao da corrente convencional dentro de um condutor metálico, sendo que o responsável pela condução de eletricidade no solo (eletrólito), são os íons. Nestas condições ocorre uma mudança no mecanismo de condução elétrica de movimento eletrônico para iônico, e esta mudança ocorre através da reação anódica de corrosão dada pela equação :



Analogamente, na região catódica



A rigor, não há necessidade de que a corrente seja efetivamente contínua, podendo ser inclusive alternada. Para se evitar este tipo de corrosão a única solução é eliminar a corrente de fuga [3].

Os pontos de “captação” da corrente são áreas catódicas e as áreas de “descarga” são áreas anódicas, da mesma forma como acontece numa célula eletrolítica [3].

Como conseqüência do aparecimento das áreas catódicas e das áreas anódicas, surge um processo corrosivo, que deteriora a estrutura metálica nas regiões de descarga da corrente.

A quantidade de metal destruída pela corrosão eletrolítica pode ser calculada, pelas Leis de Faraday da eletrólise. A massa de metal dissolvido é dada pela equação:

$$M = Eq \cdot I \cdot t$$

onde

**M** = massa, em grama;

**Eq** = equivalente eletroquímico, em grama/coulomb;

**I** = corrente que sai da estrutura, em ampère;

**t** = tempo de circulação da corrente, em segundos.

Na Tabela 2.6.4.1 [3], são mostrados os equivalentes eletroquímicos e a massa dissolvida para alguns metais.

**Tabela 2.6.4.1 - Massa de metal perdido em corrosão eletrolítica**

| <b>METAL</b> | <b>EQUIVALENTE<br/>ELETROQUÍMICO<br/>(g/ C)</b> | <b>MASSA<br/>(Kg/A.ano)</b> |
|--------------|---|-----------------------------|
| <b>Fe</b>    | <b>0,0002893</b>                                | <b>9,2</b>                  |
| <b>Pb</b>    | <b>0,0010736</b>                                | <b>33,9</b>                 |
| <b>Zn</b>    | <b>0,0003388</b>                                | <b>10,7</b>                 |
| <b>Al</b>    | <b>0,0000932</b>                                | <b>2,9</b>                  |
| <b>Cu</b>    | <b>0,0003294</b>                                | <b>10,4</b>                 |

O desgaste da camada protetora de Zinco de uma fundação de torre de transmissão, dependendo do valor da corrente de fuga aplicada, pode apresentar um desgaste prematuro desta camada à períodos inferiores ao esperado, que é de aproximadamente 25 anos.

### 2.6.5 CORROSÃO POR AERAÇÃO DIFERENCIAL

Existe um tipo de pilha bastante importante que é a pilha de concentração. Este tipo de pilha aparece como consequência da diferença de concentração da espécie eletroquimicamente ativa no meio. Seja o sistema constituído por dois semi-elementos idênticos, isto é, mesmo metal e mesmo eletrólito. A única diferença entre os dois é a concentração, conforme mostra a Fig.2.6.5.1 [4].

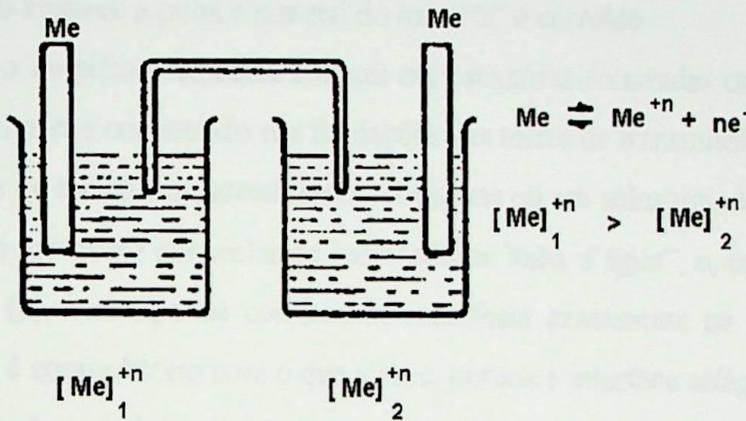


Fig.2.6.5.1 - Esquema da pilha de concentração diferencial

Aplicando-se a equação de Nernst aos dois sistemas podemos calcular os potenciais dos eletrodos. Então :

$$E_1 = E_0 + (0,0592)^{-n} \cdot \log [Me^{+n}]_1$$

$$E_2 = E_0 + (0,0592)^{-n} \cdot \log [Me^{+n}]_2$$

Os valores de  $E_0$  e  $n$  são constantes, pois se trata de elementos idênticos. Como :

$$[Me^{+n}]_1 > [Me^{+n}]_2$$

portanto

$$E_1 > E_2$$

Assim, uma simples variação de concentração é capaz de provocar o aparecimento de pilha e portanto a corrosão em "2". A corrosão por frestas é um seu exemplo típico.

Um caso particular de pilha de concentração bastante importante é o de oxigênio, também chamado de aeração diferencial.

Se tivermos o sistema mostrado na Fig.2.6.5.1 onde de um lado entra o oxigênio a pressão  $P_1$  e de outro a  $P_2$ , a equação de Nernst, para o eletrodo de oxigênio fica :

$$E = 1,23 + 0,0148 \cdot \log PO_2 - 0,0592 \cdot pH$$

Se o pH for constante,

$$E = k + 0,0148 \cdot \log PO_2 \quad \text{onde} \quad k = 1,23 - 0,0592 \cdot \text{pH}$$

então :

$$E_1 = k + 0,0148 \cdot \log P_1$$

$$E_2 = k + 0,0148 \cdot \log P_2$$

como

$$P_1 > P_2$$

então

$$E_1 > E_2$$

Portanto aparece a pilha e o metal do lado “2” é corroído.

Este tipo de pilha é bastante comum em estruturas soterradas ou submersas, sendo um caso normalmente encontrado nas fundações das torres de transmissão.

No caso de estruturas parcialmente submersas ou em solos umedecidos, este tipo de corrosão recebe um nome particular de “corrosão na linha d’água”, e, como é mostrado na Fig.2.6.5.2 [4] (a), este tipo de corrosão se manifesta exatamente na linha d’água. Isto, aparentemente, é contraditório com o que vimos, porque a interface ar/água é a região onde a concentração de oxigênio é maior, portanto  $PO_2$  é também maior. No entanto, se observarmos com cuidado, veremos que a Interface ar/água não é ortogonal a superfície metálica devido a tensão interfacial (menisco), ver na Fig.2.6.5.2 (b).

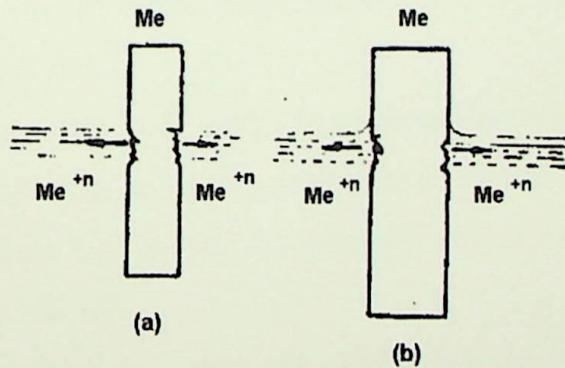


Fig.2.6.5.2 - Esquema de corrosão na linha d’água

Como se observa a corrosão não ocorre na interface, mas logo abaixo. Como esta região coincide com o prolongamento da linha d’água, dá-se a nítida impressão de ser na interface. Portanto, a teoria está de acordo com o que se observa.

Vamos agora associar à corrosão por aeração diferencial devido a presença nos solos de microrganismos como algas, fungos e bactérias os quais formam produtos insolúveis que ficam aderidos na superfície metálica sob a forma de filmes ou tubérculos.

As algas são plantas microscópicas, que ocorrem usualmente em grandes colônias e de cores variando entre púrpura, azul e verde. elas crescem rapidamente em presença de ar, água e luz solar as condições ideais para crescimento das algas são:

**temperatura: 18 - 40 °C**

**p H: 5,5 - 9,0**

São muito encontradas quando as fundações ficam submersas com uma camada superficial de água, pois essas condições oferecem os requisitos essenciais para crescimento de algas: ar, água e luz solar.

Estas condições ocasionarão corrosão por aeração diferencial ou o desenvolvimento de bactérias anaeróbias, como as redutoras de sulfato, que também ocasionarão a corrosão nessa região.

## **MÉTODOS DE PROTEÇÃO POR REVESTIMENTOS DE ZINCO**

### **3.1 TIPOS DE REVESTIMENTOS DE ZINCO**

O método de aplicação mais comumente utilizado é o de revestimento de zinco difundido por imersão a quente, também conhecido por galvanização. Há, no entanto, mais outros quatro métodos importantes, cada um deles com seus campos de aplicação próprios. Esses métodos são: metalização (aspersão térmica), eletrodeposição, sherardização e pintura com tintas ricas em zinco.

Há uma certa confusão na nomenclatura. Algumas vezes, para a zincagem por imersão a quente, além dos termos galvanização e galvanização a quente, também é encontrado o termo zincagem a fogo. O termo às vezes utilizado "galvanização a frio" corresponde à eletrodeposição. Neste trabalho, o termo galvanização referir-se-á sempre e apenas à zincagem por imersão a quente.

A escolha do método em qualquer caso específico é feita de acordo com a aplicação requerida, podendo considerar-se os cinco processos antes complementares que competitivos. Normalmente pouca dúvida se estabelece sobre qual o melhor processo para determinada aplicação. Cada método tem certas características e propriedades que auxiliam na sua escolha em cada caso específico.

O processo da galvanização tem sido praticado comercialmente há mais de um século. Embora os princípios básicos do processo permaneçam os mesmos, a sua técnica tem sido aperfeiçoada, constituindo hoje em dia um processo controlável utilizando os resultados dos trabalhos de pesquisa [1].

Todas as ferragens das torres de transmissão, bem como de suas respectivas estruturas de fundação, são especificadas conforme Normas vigentes (assunto tratado no Capítulo 3.6 ) e o processo é o de imersão em zinco líquido para a obtenção de uma película de proteção catódica final não inferior a 80  $\mu\text{m}$ .

A seguir faremos breves comentários sobre a Zincagem por Imersão (Galvanização), uma vez que necessitamos conhecer o processo aqui empregado nas ferragens destas estruturas autoportantes.

Galvanização consiste na imersão da peça de aço preparada em banho de zinco fundido para formar o revestimento. Na prática, o processo não é tão simples, além de haver influência de muitos fatores sobre o revestimento [1].

Devido à reação do ferro com o zinco fundido e conseqüente difusão do zinco, o revestimento é constituído de camadas de liga zinco-ferro que são progressivamente mais ricas em zinco a medida que se aproxima da superfície externa. A camada superficial é constituída essencialmente por zinco puro. A influência dos diversos parâmetros do processo no revestimento será comentada oportunamente [1].

A zincagem por imersão a quente produz um revestimento que cobre toda a superfície de ferro, incluindo os cantos, costuras e soldas no caso de se tratar de peças acabadas [1].

### **3.2 PROCESSO DE ZINCAGEM POR IMERSÃO (GALVANIZAÇÃO)**

A temperatura de fusão do zinco puro é de 419,5 °C. A temperatura normal de operação do processo de galvanização situa-se numa faixa de 440 °C a 470 °C.

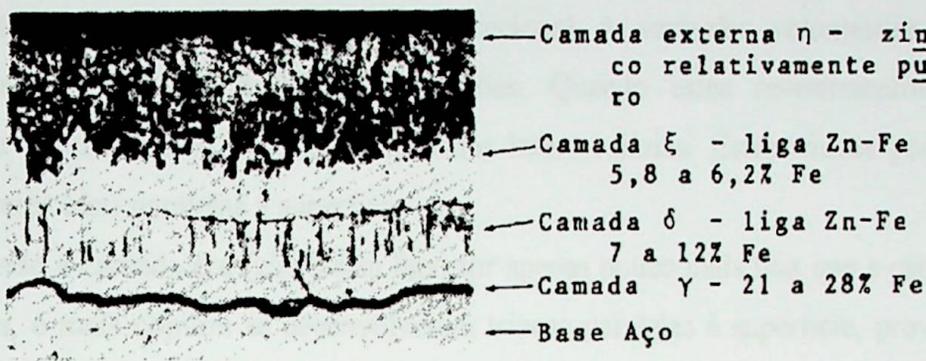
Acima de 480 °C a velocidade de dissolução do ferro no zinco é muito elevada, com efeitos prejudiciais tanto nas peças a serem galvanizadas como no tanque de galvanização.

O zinco líquido reage com o ferro formado por difusão do ferro no zinco. Diversas camadas de ligas Zn-Fe são formadas e suas composições podem ser determinadas com base no diagrama de fase Zn-Fe.

Nas condições normais de galvanização, formam-se as seguintes camadas, sucessivamente menos ricas em ferro conforme a Fig. 3.2.1 [1]:

- camada  $\gamma$  (gama), contendo 21 a 28 % de ferro, na qual domina o composto  $\text{FeZn}_3$ , de cristalização cúbica;
- sobre essa camada encontra-se a camada  $\delta$  (delta) contendo 7 a 12 % de ferro, na qual domina o composto  $\text{FeZn}_7$ , de cristalização hexagonal;
- sobre a precedente apresenta-se a camada  $\xi$  (zeta) contendo aproximadamente 6 % de ferro, dominando nela o composto  $\text{FeZn}_{13}$ , de cristalização rômbrica;

- a camada externa  $\eta$  (eta) é formada de zinco relativamente puro, arrastado pela peça durante a retirada do banho, na qual o teor em ferro corresponde ao do banho de galvanização, aproximadamente 0,02 %.



**Fig.3.2.1 - Micrografia de um revestimento galvanizado típico**

As reações que provocam a formação das camadas de liga gama, delta e zeta se realizam entre a fase líquida (zinco) e a fase sólida (aço) resultando em compostos intermetálicos sólidos, isto é, as camadas de ligas se formam localmente, no estado sólido. Apenas a camada exterior, eta, resulta da solidificação da película de zinco fundido que permanece na superfície das peças no momento de sua extração do banho de galvanização. A reação zinco-ferro prossegue após solidificação do zinco, por difusão do zinco - camada eta na camada zeta, enquanto a temperatura permanece acima de 250 °C.

Enquanto que a espessura da primeira camada de liga (camada gama) é bastante constante (da ordem de 1  $\mu\text{m}$  a 2  $\mu\text{m}$  de espessura), as outras podem variar fortemente em função de condições da galvanização. Em casos extremos o revestimento poderá ser constituído, seja quase que inteiramente por camadas de ligas ou quase inteiramente por zinco puro.

Assim, a espessura do revestimento total e de cada camada de liga depende de diversos parâmetros, tais como: temperatura do banho, rugosidade de superfície, composição do aço, teor de alumínio no zinco e outros parâmetros.

Com exceção da camada eta (zinco), todas as camadas de liga presentes nos revestimentos galvanizados têm dureza elevada e ductilidade baixa. Se a formação de camadas intermediárias for reduzida ou nula, o revestimento será dúctil e o material

galvanizado poderá ser dobrado sem causar trincamento, ou esfoliação de zinco. Esta situação é que se procura obter na galvanização de fios e de arames.

Normalmente, uma parte considerável do revestimento é constituída pelas camadas de liga. A adesão do revestimento depende de adesão das camadas e a sua resistência depende da estrutura das camadas intermediárias. Estas são porosas e possuem pouca coesão metálica devido ao crescimento direcional à variação volumétrica e são responsáveis por rupturas durante deformações. Quando estes revestimentos forem dobrados se desenvolverão trincas nas camadas intermediárias. Estas trincas podem ser perpendiculares e/ou paralelas à superfície.

Quando a camada **eta** (zinco sem liga) for apenas pouco mais fina que a camada de fases frágeis, é mais comum se desenvolverem trincas paralelas à superfície, provocando uma tendência do revestimento a se soltar como escamas no dobramento da peça. Se, ao contrário, a camada **eta** não for muito fina ou inexistente, as trincas tendem a desenvolver-se perpendicularmente à superfície, não ocorrendo descamação no dobramento da peça. Neste caso, desenvolvem-se trincas finas praticamente imperceptíveis que não afetam a aderência e que, do ponto de vista da corrosão, não são prejudiciais, uma vez que entra em ação e proteção catódica fornecida pelo zinco, além do possível preenchimento com produtos de corrosão impermeáveis.

Considera-se que a vida de um produto galvanizado, quanto a resistência à corrosão, é quase inteiramente função da quantidade de zinco depositado sobre a superfície da peça.

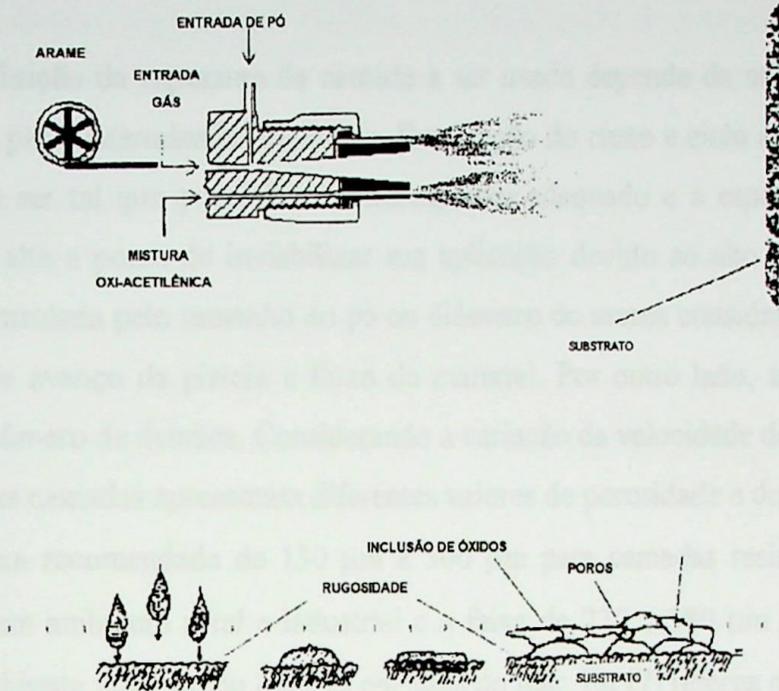
A espessura do revestimento é, em geral, ligeiramente maior nos cantos o que é uma vantagem em relação aos revestimentos por pintura, onde acontece o contrário [1].

### **3.3 PROCESSO DE METALIZAÇÃO POR ASPERSÃO TÉRMICA**

Atualmente, dentre os processos utilizados para depositar camadas resistentes a corrosão, surge a Aspersão Térmica (AT) como uma alternativa eficaz e econômica para proteger materiais metálicos pela deposição de revestimentos resistentes a diversas formas de corrosão eletrolítica e química.

Basicamente a AT consiste de um grupo de processos por meio dos quais se deposita, sobre uma superfície previamente preparada, camadas de materiais metálicos ou

não metálicos. As principais características da AT, no que concerne ao aspecto típico das camadas depositadas, são esquematicamente apresentadas na Fig.3.3.1 [9] a seguir:



**Fig.3.3.1 - Característica da AT e Seqüência de eventos típicos**

As camadas depositadas pelo processo de AT se caracterizam por uma estrutura lamelar com incrustações de óxidos e um grau variável de porosidade. Estas características estão relacionadas aos gases e velocidades utilizadas para transferir as partículas aquecidas ou fundidas do bocal da pistola na direção do substrato ou superfície a ser revestida. O Zinco e o Alumínio são os materiais mais frequentemente depositados por AT com a finalidade de fornecer ao aço proteção contra a corrosão. Eles fornecem um revestimento tipo barreira, bem como um revestimento anódico de sacrifício para proteger o substrato de aço exposto, em ambientes corrosivos ( solos, marinho, atmosféricos, outros).

O Zinco permanece mais ativo e fornece melhor proteção catódica que o Alumínio nos solos, entretanto, apresenta uma vida mais curta para trabalhar imerso em água do mar ou na zona da maré em relação ao menos ativo.

Nos processos de AT, os materiais de deposição são fundidos ou aquecidos em uma fonte de calor gerada no bico de uma pistola apropriada por meio de combustão de gases, de arco elétrico ou por plasma. Imediatamente após a fusão, o material finamente atomizado é acelerado por gases sob pressão contra a superfície a ser revestida, atingindo-a no estado fundido ou semi-fundido. Ao se chocarem contra a superfície, as partículas achatam-se e aderem ao material base e na seqüência sobre as partículas já existentes, originando-se assim uma camada de estrutura típica e diferente de qualquer outra forma

metalúrgica. Essas camadas são constituídas de pequenas partículas achatadas em direção paralela ao substrato, com estrutura típica lamelar contendo inclusões de óxidos e porosidade.

A definição da espessura da camada a ser usada depende da otimização de outras propriedades para determinada finalidade. Em função do custo e ciclo de vida, a espessura mínima deve ser tal que possibilite o desempenho adequado e a espessura máxima não deve ser tão alta a ponto de inviabilizar sua aplicação devido ao alto custo. A espessura mínima é controlada pelo tamanho do pó ou diâmetro do arame considerando constantes a velocidade de avanço da pistola e fluxo de material. Por outro lado, a espessura total é obtida pelo número de demãos. Considerando a variação da velocidade de avanço e o fluxo de material, as camadas apresentam diferentes valores de porosidade e dureza.

A faixa recomendada de 130  $\mu\text{m}$  a 300  $\mu\text{m}$  para camadas resistentes a corrosão atmosférica em ambiente rural e industrial e a faixa de 230 a 380  $\mu\text{m}$  para corrosão nos solos, em ambiente marinho ou imersas em água do mar. Ett [7] reforça os dados anteriores mencionando que camadas de 350 a 400  $\mu\text{m}$  evitariam os poros passantes e em camadas de 200  $\mu\text{m}$  seriam mínimos [9].

### 3.4 INFLUÊNCIA DE DIVERSOS PARÂMETROS NA GALVANIZAÇÃO

Os constituintes do zinco utilizado na galvanização possuem ações marcadas sobre o aspecto, espessura, composição do revestimento galvanizado e sua resistência à corrosão.

O alumínio e outros elementos são adicionados ao banho de galvanização para controlar características físicas, entre elas a espessura e a aparência superficial.

As influências provocadas no revestimento pelas impurezas ou adições, nem sempre estão perfeitamente esclarecidas, encontrando-se freqüentemente desacordo entre os dados de diversos autores, principalmente na quantificação dos teores de aditivos e suas conseqüências.

Os tipos de zinco mais correntemente utilizados em galvanização são aqueles cujo teor em zinco é da ordem de 98 a 98,5 %, sendo o restante constituído de 1,2 a 1,6 % de chumbo, 0,2 a 0,5 % de cádmio, 0,02 a 0,05 % de ferro, correspondendo ao tipo Prime Western da ASTM B-6 e ao tipo comum da ABNT EB - 302. Não vale a pena procurar zinco mais puro, uma vez que no banho de galvanização o zinco se saturará de chumbo (normalmente, existe uma camada desse metal no fundo das cubas).

- **Ação do chumbo**

A presença do chumbo no zinco, no seu teor de saturação (1,2 % a 450 °C) é útil porque este elemento, por um lado melhora a molhabilidade do aço pelo zinco fundido e por outro, tem o efeito de aumentar a espessura do revestimento em relação ao zinco puro. O excesso de chumbo deposita-se no fundo e protege a cuba do ataque pelo zinco.

- **Ação do ferro**

A solubilidade do ferro no zinco à saturação é de cerca de 0,02 % a 450 °C, é esse teor que se encontra na camada eta do revestimento (externa). Para quantidades mais elevadas formar-se-ão cristais de  $FeZn_{13}$  que se dispersarão no banho de zinco, aparecendo no revestimento de zinco, conseqüentemente provocando uma fragilização deste. Um teor de ferro acima de 0,1 % tem um efeito prejudicial.

- **Ação do alumínio**

O alumínio inibe a formação de ligas intermediárias, melhorando, portanto, a ductilidade. Teores mais elevados de alumínio podem prejudicar a aderência e a resistência à corrosão.

Os efeitos produzidos pela presença do alumínio no zinco são múltiplos e discutidos por diversos autores. Em princípio, há um certo acordo sobre os seguintes pontos:

- ⇒ para teores baixos, (ordem de 0,01 %) o alumínio provoca um aumento de brilho do revestimento, sem outras modificações de estrutura ou propriedades;
- ⇒ acima de certo teor, indicado por alguns autores em 0,03 %, inicia uma diminuição de espessura das camadas de liga do revestimento;
- ⇒ acima de 0,1 % as modificações de estrutura do revestimento aumentam, com o desaparecimento das camadas de liga, redução sensível da espessura do revestimento com a melhora da sua ductilidade.

A adição de alumínio ao banho da galvanização depende, portanto, da natureza e do destino das peças a galvanizar. Essa adição é indispensável quando se deseja obter revestimentos finos e dúcteis (como no caso de fios e chapas); ela é inútil e mesmo contraindicada no caso de material pouco sujeito a deformações no qual se pretende apenas uma boa proteção contra a corrosão que é o caso das ferragens das torres de transmissão.

- **Ação do estanho**

A adição do estanho no zinco tem como tendência provocar um aumento de espessura das camadas da liga e da espessura total do revestimento provocando uma diminuição da ductilidade.

- **Ação de outros elementos**

O cádmio, o cobre e o antimônio nos seus teores normais presentes nos banhos de galvanização não têm efeito sobre a estrutura e as propriedades do revestimento obtido, para teores mais elevados pode provocar alterações de coloração e ductilidade [1].

### **3.5 FUNÇÃO BÁSICA DA GALVANIZAÇÃO NAS ESTRUTURAS METÁLICAS DAS TORRES DE TRANSMISSÃO**

Os revestimentos de zinco apresentam uma tríplice proteção ao metal base :

- ⇒ Resistência à corrosão inerente que o zinco oferece na maioria das condições atmosféricas e nos solos;
- ⇒ Proteção catódica ao metal base nas descontinuidades do revestimento, por ser mais eletronegativo que o aço ;
- ⇒ diminuição da taxa de corrosão, devido ao recobrimento das áreas descobertas pelos seus produtos de corrosão.

### **3.6 NORMAS BRASILEIRAS RELATIVAS À GALVANIZAÇÃO**

Há freqüentemente para o mesmo tema normas internacionais e normas nacionais de diversos países. Isso justifica-se, pois mesmo que sejam bastante semelhantes no global, podem haver diferenciações causadas pelas condições locais. Na elaboração de uma norma, as já existentes sobre o mesmo assunto podem ser uma fonte de informação útil, mas é preciso considerar criteriosamente as condições de aplicações locais, de forma que as especificações se adaptem aos condicionamentos reais de sua utilização. No caso da galvanização, devem ser consideradas, por exemplo, as condições de clima e de agressividades ambientais do país.

Existem diversas normas brasileiras sobre o assunto, sendo que a Comissão de Revestimentos Metálicos atua no âmbito CB-1 - Comitê Brasileiro de Mineração e Metalurgia da ABNT, fazendo parte do Sub-Comitê SC-1.9, Corrosão, que funciona no

âmbito de um Convênio ABNT/ABRACO (Associação Brasileira de Normas Técnicas e Associação Brasileira de Corrosão).

As normas utilizadas na área de linhas de transmissão são as seguintes:

- EB - 302 - Zinco primário – especificações;
- EB - 344 - Zincagem em produtos de aço ou ferro fundido;
- EB - 782 - Elemento de fixação de componentes das estruturas metálicas de linhas de transmissão e de subestações;
- EB 795 - Cordoalhas de fios de aço zincados para estais, tirantes, cabos mensageiros e usos similares;
- MB 483 - Fios de aço com revestimentos de zinco para alma de aço em cabos de alumínio ACSR (Aluminium Cable Steel Reinforced).

Para aços de espessuras entre 3,18 mm e 4,17 mm é especificada uma massa mínima de revestimento de  $610 \text{ g/m}^2$  (média dos corpos-de-prova ensaiados) e de  $550 \text{ g/m}^2$  (mínimo individual). Para aços de espessuras iguais ou superiores a 4,76 mm são especificados os valores respectivamente de  $702 \text{ g/m}^2$  e  $610 \text{ g/m}^2$  [1].

Em torres galvanizadas a camada galvanizada representa de 2,5 a 3,4 % do peso da estrutura total, sendo o seu custo avaliado entre 10 a 18 % do custo total da torre [1].

Considerando a incidência do custo de galvanização sobre o equipamento, conclui-se que se for necessário um acréscimo nesses custos para melhorar o seu desempenho nas fundações que ficarão em contato permanente com os solos (maior espessura, revestimento adicional, mudança de projeto, custo de controle de qualidade), mesmo assim será compensador quando comparado aos custos de material e mão-de-obra de substituições [1].

## **AVALIAÇÃO DO ESTADO DA CORROSÃO EM ESTRUTURAS METÁLICAS GALVANIZADAS ENTERRADAS**

### **4.1 MÉTODOS DE AVALIAÇÃO DO ESTADO DA CORROSÃO EM ESTRUTURAS ENTERRADAS**

#### **4.1.1 MÉTODO VISUAL**

É o acompanhamento do processo de corrosão através de medidas de perda de peso ou profundidade de pite (perfuração em pontos discretos). Nas condições reais de aplicação do material é sem dúvida a forma mais precisa e confiável de avaliar a agressividade de um solo e o real estágio da corrosão no qual se encontra a fundação de uma torre, porém é um método muito trabalhoso, pois é necessário escavar o solo junto aos montantes que compõe a fundação das torres de transmissão atingindo profundidades de 3,5m ou mais, dependendo da altura da torre sendo que para isso, o número de trabalhadores é elevado e a mecanização é um sistema pouco utilizado nestas tarefas, devido aos locais apresentarem dificuldades nos acessos para um trabalho mecanizado ao longo das linhas de transmissão do sistema elétrico.

#### **4.1.2 MÉTODO DA MEDIÇÃO DO POTENCIAL DE CORROSÃO**

Baseia-se na medição do potencial entre o montante da fundação da torre de transmissão e um eletrodo de referência constituído de cobre/ sulfato de cobre ( $\text{Cu}/\text{CuSO}_4$ ), onde os valores medidos são associados ao estado de corrosão da fundação. Este método será descrito detalhadamente no decorrer deste trabalho [8].

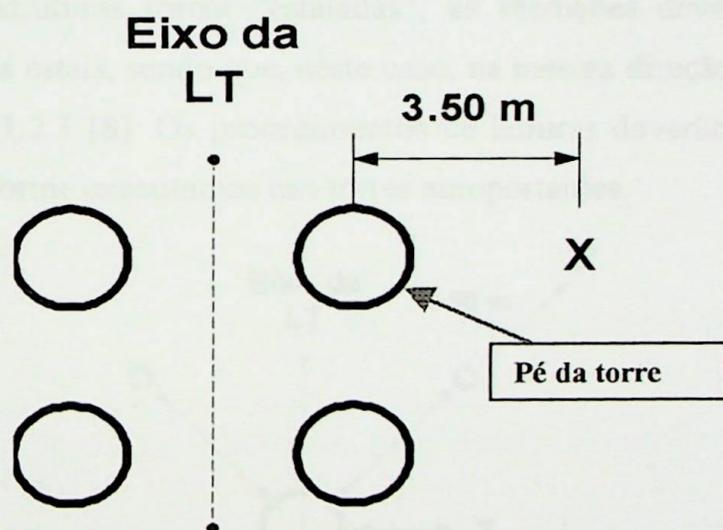
##### **4.1.2.1 PROCEDIMENTO DE MEDIÇÃO**

O eletrodo de referência ( $\text{Cu}/\text{CuSO}_4$ ) deve ser instalado no solo, ligando-se um voltímetro entre o mesmo e a estrutura a ser ensaiada. O terminal “comum/terra/negativo” do voltímetro deve estar conectado no eletrodo de referência e o outro na estrutura. Com este critério a leitura é direta.

O contato da ponta porosa do eletrodo com o solo deve ser firme, e o solo deve estar úmido, isento de vegetação e cascalho. Se necessário, fazer uma pequena escavação (5 a 10 cm de profundidade) e umedecer o solo.

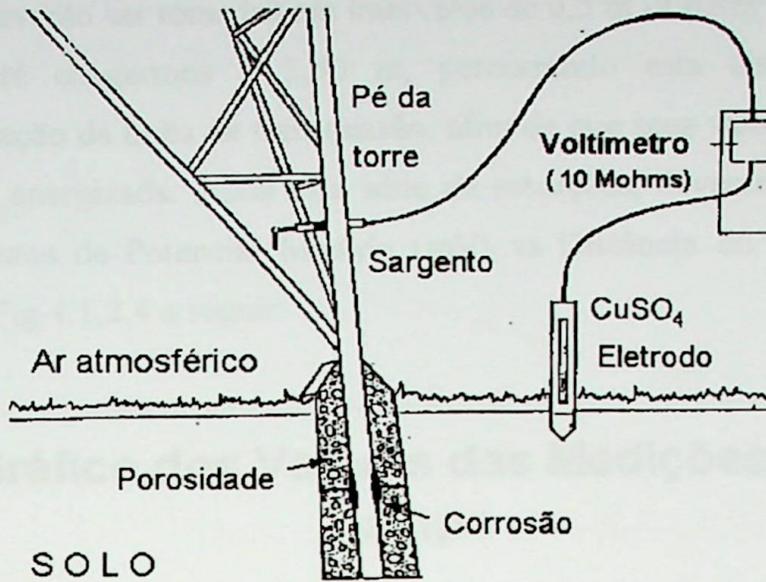
Eventualmente poderão ser necessárias a utilização de lixas, escovas de aço ou espátulas para retirada de produtos de corrosão e revestimentos orgânicos (tintas) da estrutura, possibilitando assim um melhor contato.

Para ligação do voltímetro à estrutura, recomenda-se o uso de garras tipo “jacaré” ou também chamada de “sargento”. Recomenda-se o posicionamento do eletrodo no sentido perpendicular ao eixo da linha. A distância entre a estrutura e o eletrodo é função da profundidade da fundação dessa estrutura, ou seja, quanto mais profunda a fundação maior a distância. Recomenda-se como orientação, adotar a distância de 1,50 m com uma distância mínima para que não haja interferência na medição até uma distância de 3,50m, como mostra a Fig.4.1.2.1 [8].



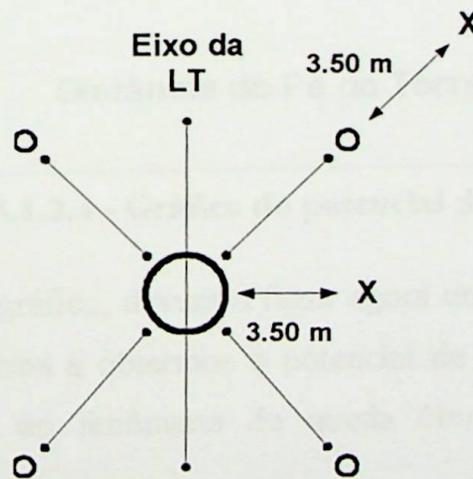
**Fig.4.1.2.1 - Posição da medição nas estruturas autoportantes**

Nas estruturas autoportantes, a medição deve ser feita nos pés das torres conforme a Fig.4.1.2.2 [8] e segundo a orientação da Fig.4.1.2.1.



**Fig.4.1.2.2 - Diagrama demonstrativo para a medição do potencial de eletrodo nas torres autoportantes**

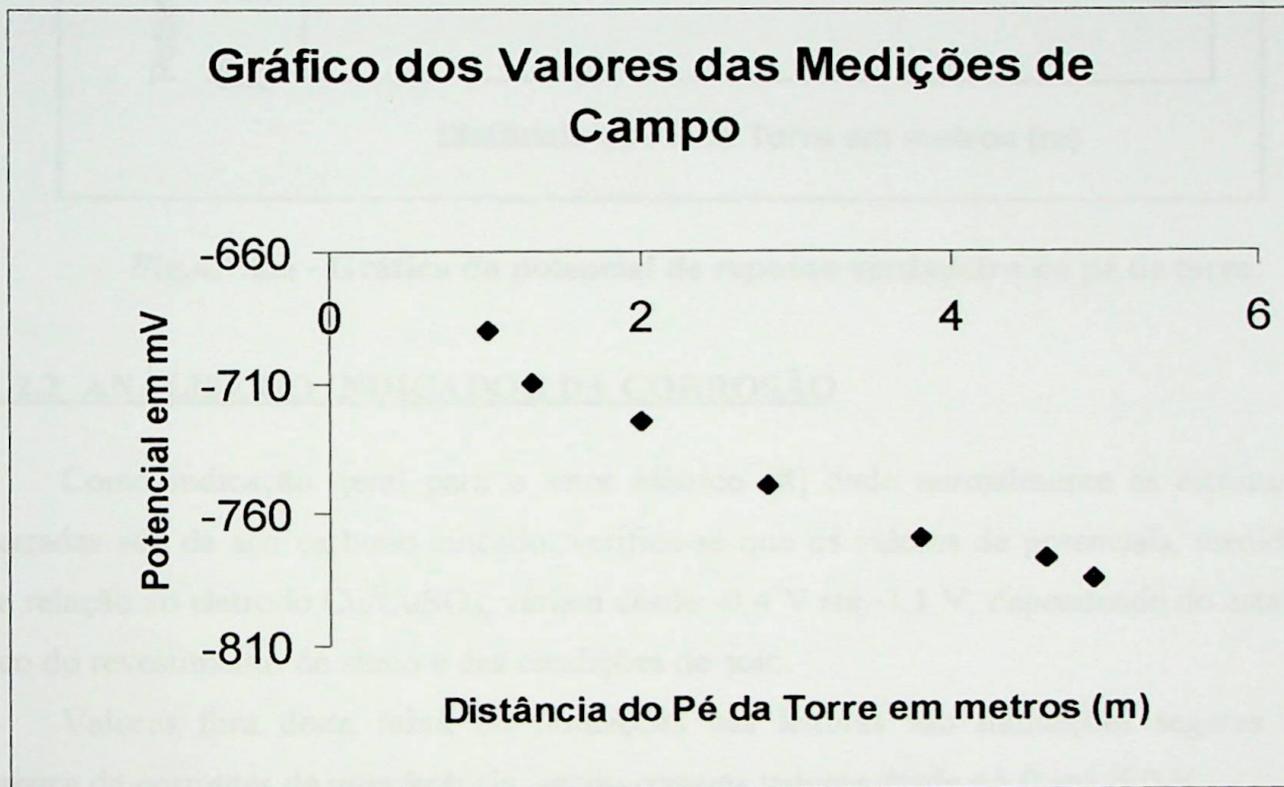
Quando as estruturas forem “estaiadas”, as medições devem ser realizadas na fundação central e nos estais, sendo que, neste caso, na mesma direção dos estais conforme é mostrado na Fig.4.1.2.3 [8]. Os procedimentos de leituras deverão ser iguais para este tipo de estrutura conforme executamos nas torres autoportantes.



**Fig.4.1.2.3 - Posição da medição nas estruturas estaiadas**

O registro da leitura do potencial, deve ser feito somente quando o valor do mesmo estabilizar, normalmente em torno de um período de até 5 minutos, após os procedimentos acima descritos. Eventualmente, quando o solo é muito seco e de alta resistividade, este tempo de estabilização pode aumentar bastante, podendo chegar a horas.

As leituras deverão ser tomadas em intervalos de 0,5 m (a partir de 1,50 m – região de interferência) até chegarmos a 3,50 m, percorrendo esta distância na direção perpendicular da direção da linha de transmissão, afim de que seus valores sofram a menor interferência da LT energizada. Após esta série de medições, deveremos então construir um gráfico dos Pontos de Potencial Medido (mV) vs Distância do Pé da Torre (m) , conforme mostra a Fig.4.1.2.4 a seguir.



**Fig. 4.1.2.4 - Gráfico do potencial do pé de torre**

Uma vez obtido este gráfico, devemos fazer agora uma extrapolação da reta obtida até a “distância zero” de forma a obtermos o potencial de repouso verdadeiro, isto é, o potencial de repouso livre do fenômeno de queda ôhmica ocasionado pela grande resistência do solo.

A Fig.4.1.2.5 mostra a tendência dos pontos medidos, na direção da distância tendendo a zero, de modo que, neste exemplo, o potencial de repouso verdadeiro, se pudesse ser medido, apresentaria valor da ordem de  $-690$  mV [8].

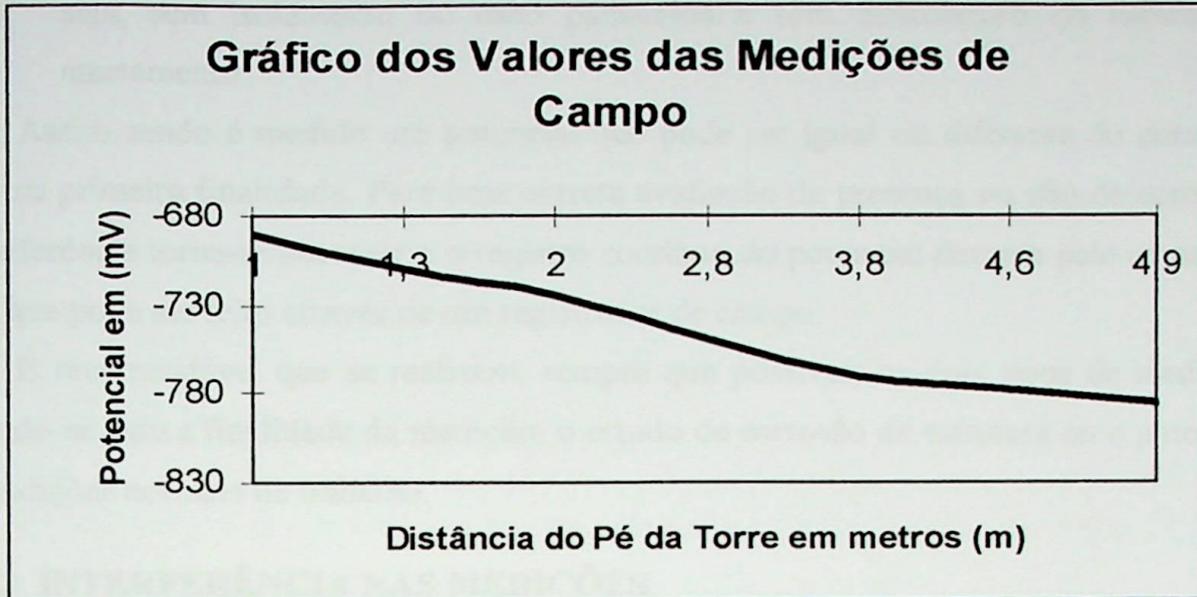


Fig.4.1.2.5 - Gráfico do potencial de repouso verdadeiro do pé de torre

#### 4.1.2.2 ANÁLISE DO INDICADOR DA CORROSÃO

Como indicação geral para o setor elétrico [8] onde normalmente as estruturas enterradas são de aço carbono zincado, verifica-se que os valores de potenciais, medidos com relação ao eletrodo Cu/CuSO<sub>4</sub>, variam desde -0,4 V até -1,1 V, dependendo do estado físico do revestimento de zinco e das condições do solo.

Valores fora desta faixa ou flutuações nas leituras são indicações seguras da presença de correntes de interferência, sendo comuns valores desde +5,0 até -5,0 V.

Potenciais positivos são extremamente nocivos para a estrutura metálica, uma vez que indicam a existência de fluxos de corrente diretamente para o solo, ou seja, que a estrutura encontra-se funcionando como anodo de uma célula eletrolítica, sofrendo corrosão severa.

Portanto a técnica de medição do potencial de corrosão em estruturas metálicas pode ter duas finalidades:

- Uma delas é verificar o estado físico da estrutura metálica enterrada quanto a existência ou não de um processo de corrosão acentuado, isto é, se a estrutura está corroída ou não, para este objetivo a medição deve ser feita após o isolamento dos pára-raios, e a desconexão do sistema de aterramento;
- A outra finalidade é a avaliação da presença de correntes de interferência. Neste caso a leitura deve ser realizada nas condições normais de trabalho da linha, ou

seja, sem isolamento do cabo pára-raios e sem desconexão do sistema de aterramento.

Assim sendo é medido um potencial que pode ser igual ou diferente do potencial obtido na primeira finalidade. Para uma correta avaliação da presença ou não de correntes de interferência torna-se necessário o registro contínuo do potencial durante pelo menos 24 horas, que pode ser feito através de um registrador de campo.

É recomendável que se realizem, sempre que possível, os dois tipos de medição, atentando-se para a finalidade da medição: o estudo de corrosão da estrutura ou o potencial nas condições normais de trabalho.

#### 4.1.2.3 INTERFERÊNCIA NAS MEDICÕES

Há diversos fatores que podem influenciar os resultados da medição do potencial de corrosão, dentre os quais destacam-se [8]:

- **Sistemas de proteção catódica** - esses sistemas, quando instalados próximos às linhas de transmissão, podem alterar o potencial das estruturas, elevando-o em algumas torres e baixando-o em outras, durante o período de sua atuação;
- **Estradas de ferro eletrificadas** - agem de modo análogo ao item anterior, durante o trânsito de composições próximo a linha;
- **Material do sistema de aterramento** - o uso de materiais diferentes ao da torre como por exemplo, hastes ou contrapesos de cobre, conectores dos cabos contrapesos de latão, alteram sensivelmente o potencial medido devido a formação de pilhas galvânicas;
- **Concreto** - o uso do concreto nas fundações com finalidade mecânica ou de revestimento também implica em alteração do potencial;
- **Revestimentos** - outros revestimentos, como por exemplo tintas, podem também influenciar nas medições;
- **Cabos pára-raios** - a interligação da torre sob medição com outras através dos cabos pára-raios pode influenciar as medições devido a formação de pilhas de longo alcance.

No caso específico de estruturas de aço em solo, os potenciais de corrosão dos revestimentos de zinco novos se situam em torno de -1,0 V em relação ao eletrodo de Cu/CuSO<sub>4</sub>. Por outro lado o potenciais de corrosão do aço sem revestimento estão normalmente entre -0,5 V e -0,4 V em relação ao eletrodo de Cu/CuSO<sub>4</sub>, mas devemos

estudar caso a caso e verificar a tendência à corrosão se está para uma condição anódica ou catódica.

Conforme vai ocorrendo a corrosão da camada de zinco o potencial de corrosão da estrutura se desloca em direção ao potencial do aço até que todo o zinco tenha sido consumido restando apenas o aço em contato com o solo, com o seu respectivo potencial de corrosão.

#### 4.1.2.4 CRITÉRIOS DE AVALIAÇÃO

Para avaliação dos resultados das medições são utilizados pelas empresas do Setor Elétrico Brasileiro, coordenados pelo GCOI [8], os seguintes critérios:

- a. Nas estruturas com potencial de corrosão mais negativo que  $-1,1$  V em relação ao eletrodo de  $\text{Cu}/\text{CuSO}_4$  a estrutura metálica está protegida pela camada de zinco;
- b. Nas estruturas com potenciais entre  $-1,1$  V e  $-0,7$  V em relação ao eletrodo de  $\text{Cu}/\text{CuSO}_4$  o revestimento de zinco encontra-se em boas condições e protegendo de forma adequada o aço;
- c. Nas estruturas com potenciais entre  $-0,7$  V e  $-0,4$  V em relação ao eletrodo de  $\text{Cu}/\text{CuSO}_4$ , devem existir áreas substanciais de aço expostas ao solo, apresentando corrosão vermelha;
- d. Nas estruturas com potenciais menos negativos que  $-0,4$  V em relação ao eletrodo  $\text{Cu}/\text{CuSO}_4$ , a estrutura metálica está provavelmente sob influência de correntes de interferência, sofrendo corrosão severa.

**Nota:** Foram constatados alguns casos em que, apesar dos potenciais das estruturas estarem entre  $-0,4$  V e  $0,0$  V em relação ao eletrodo de  $\text{Cu}/\text{CuSO}_4$ , a corrosão das mesmas não era significativa. Uma das prováveis causas para este fato pode ser as características específicas do solo no local (concentração do pH, aeração, outros), que necessitaria uma análise mais aprofundada. Por esta razão recomenda-se que, sempre que o potencial das estruturas se situe entre  $-0,4$  e  $0,0$  V em relação ao eletrodo de  $\text{Cu}/\text{CuSO}_4$ , se faça uma inspeção visual das mesmas para se avaliar o estado de corrosão das peças.

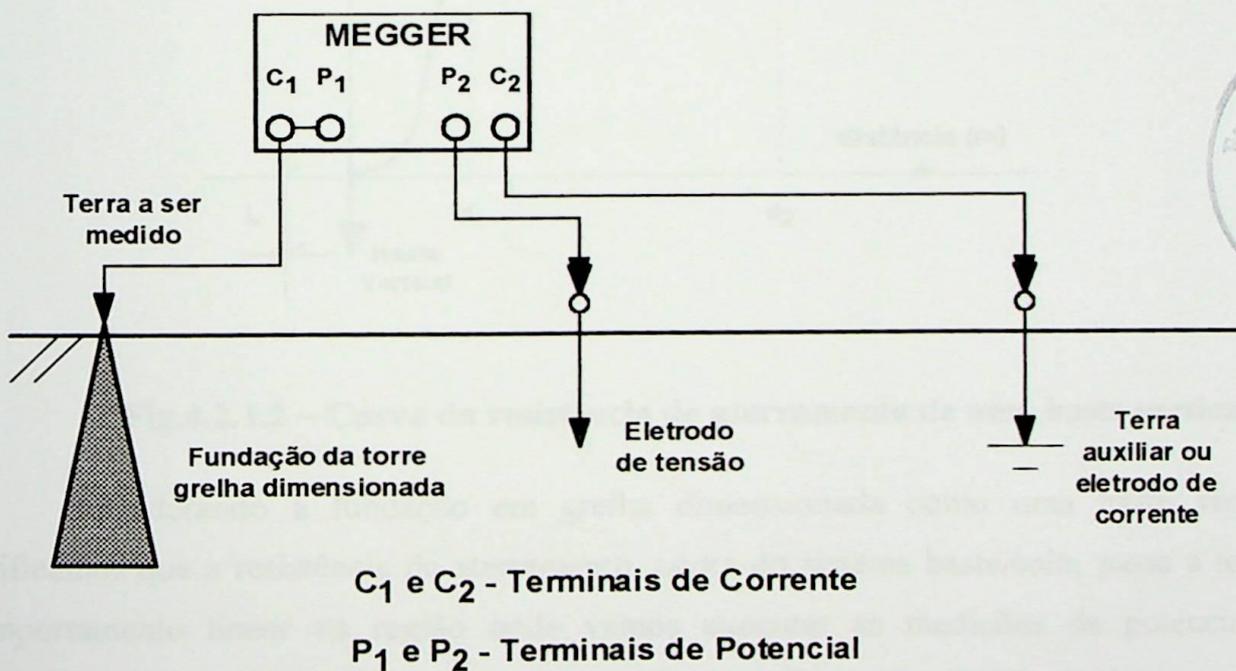
## 4.2 MEDICÃO DO POTENCIAL DE CORROSÃO EM DOIS PONTOS

### 4.2.1 MEDICÃO DA RESISTÊNCIA DE ATERRAMENTO DAS FUNDAÇÕES EM GRELHA DIMENSIONADA

Consideramos a fundação em grelha dimensionada das torres de transmissão como sendo um conjunto “haste vertical de aterramento”, pois estas fundações encontram-se enterradas no solo, são metálicas (aço carbono galvanizado) e, além de ter uma função mecânica de sustentação da torre, atuam como caminhos para escoamentos de sobretensões oriundos de descargas atmosféricas para o solo.

Há um método clássico de medição de resistência a quatro pontos, método de Wenner [18], onde medimos o valor da resistência de aterramento da haste vertical enterrada no solo, em nosso caso, a fundação em grelha dimensionada.

A Fig.4.2.1.1 mostra o método prático de medição a quatro pontos, medido com um instrumento denominado Megger [18].



**Fig.4.2.1.1 – Medição de resistência de aterramento da fundação em grelha dimensionada – Método de Wenner**

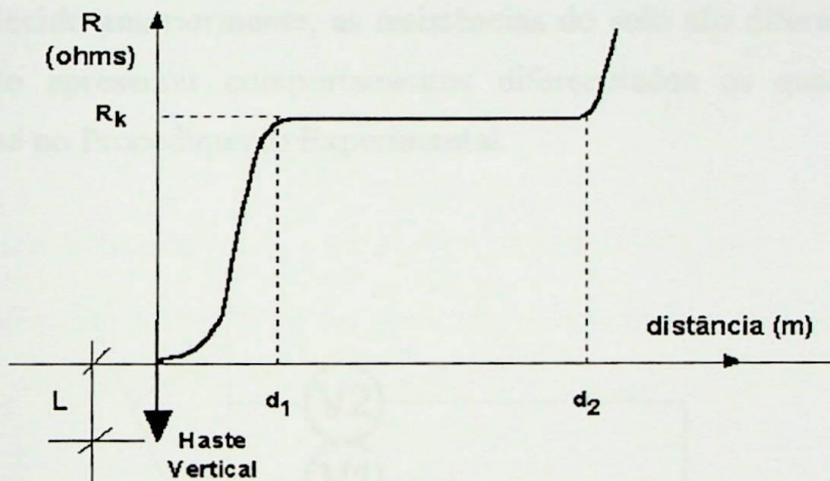
Conforme a Fig.4.2.1.1, para efetuar uma medição de resistência de aterramento é necessário que se tenha um ponto onde se injeta a corrente que é o ponto do sistema a ser medido, em nosso caso a fundação da torre, e um ponto onde se retira esta corrente, chamado terra auxiliar. Pela lei de Ohm, a corrente injetada circula pela terra e provoca na

superfície da mesma uma tensão resultante, função da resistência de terra, até o ponto a ser medido pela corrente injetada.

A Fig.4.2.1.2 [18,23], mostra a curva da resistência de aterramento de uma haste vertical enterrada no solo, de **comprimento L** (metros).

Considerando, a **resistividade** ( $\zeta$ ) como um valor constante (dependente de cada solo) e a **seção** (**S**) da haste circular (fundação em grelha dimensionada) também como uma constante, a resistência variará proporcionalmente à **distância d**.

Na prática, verificamos que a **distância  $d_1$**  se verifica entre 2 a 3 vezes o comprimento da **haste L** chegando a estabilizar-se neste patamar, voltando a crescer quando atinge um limiar de 5 vezes o valor da **haste L**, onde chamamos de **distância  $d_2$** .



**Fig.4.2.1.2 – Curva da resistência de aterramento de uma haste vertical**

Considerando a fundação em grelha dimensionada como uma haste vertical, verificamos que a resistência de aterramento, agora do sistema haste/solo, passa a ter um comportamento linear na região onde vamos executar as medições de potencial de corrosão. Esta região encontra-se entre zero (a própria fundação) e duas vezes o comprimento da fundação, que em média, tem um valor próximo a 9,0m. Sabemos da prática que o comprimento médio das fundações é de 4,5m [23].

#### 4.2.2 MÉTODO DE MEDIÇÃO DO POTENCIAL EM DOIS PONTOS

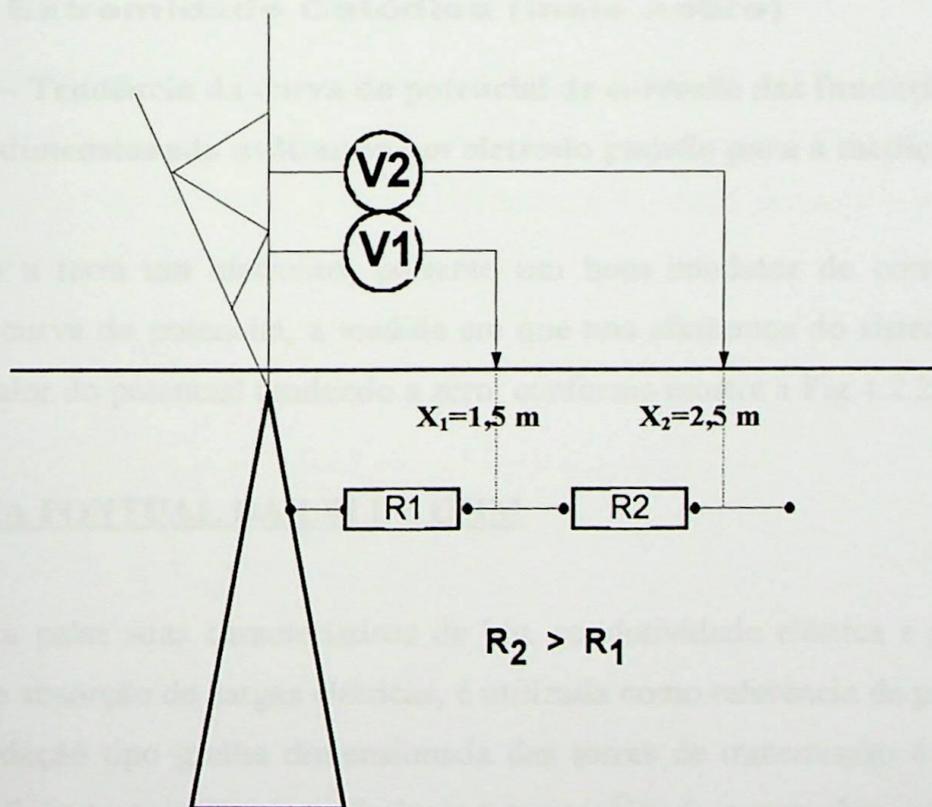
A recomendação do GCOI [8], propunha a medição de potencial em apenas um ponto, cerca de 1,5 m, visto que o resultado da medição, em mV neste ponto, daria uma

idéia do estado de corrosão da fundação não havendo a necessidade de escavá-la para a constatação e emissão de um parecer técnico do processo corrosivo que se encontram estas fundações.

Optou-se em analisar em dois pontos, a 1,5 m e a 2,5 m, pois a haste vertical, nossa fundação da torre em grelha dimensionada, apresenta uma resistência de aterramento a qual está inserida num circuito elétrico de corrente por onde circula a corrente de fuga.

Os pontos onde são medidos os potenciais estão rigorosamente dentro deste intervalo linear da resistência de aterramento oferecida pela fundação em grelha dimensionada, pois estamos medindo a 1,5 m e a 2,5 m, perpendicularmente, ao eixo da linha de transmissão.

A Fig.4.2.2.1 [23], mostra que na medição do potencial executada no interior do intervalo estabelecido anteriormente, as resistências do solo são diferentes e os potenciais medidos deverão apresentar comportamentos diferenciados os quais serão objeto de medição e análise no Procedimento Experimental.

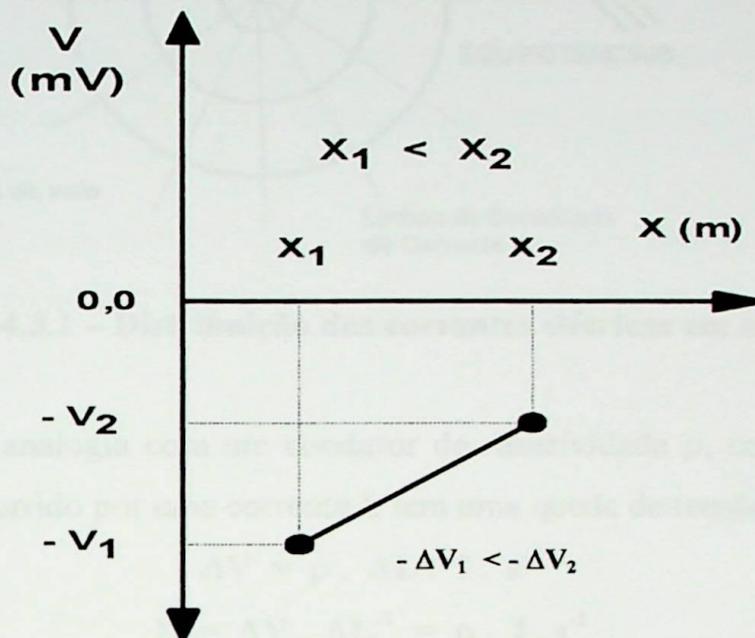


**Fig.4.2.2.1 – Medição de potencial de corrosão das fundações utilizando um eletrodo padrão de  $\text{Cu}/\text{CuSO}_4$**

Já na Fig.4.2.2.2 [23], notamos que para o ponto  $X_1$  teremos um potencial  $V_1$  e para o ponto  $X_2$  teremos um potencial  $V_2$ . Como a resistência é praticamente linear, neste

intervalo como vimos anteriormente, o potencial também se apresentará praticamente linear, pois será função da corrente circulante no solo.

**Extremidade Anódica (menos nobre)**



**Extremidade Catódica (mais nobre)**

**Fig.4.2.2.2 – Tendência da curva do potencial de corrosão das fundações em grelha dimensionada utilizando um eletrodo padrão para a medição**

Sendo a terra um eletrólito, portanto um bom condutor de corrente elétrica, a tendência da curva do potencial, a medida em que nos afastamos do sistema torre-solo, é aumentar o valor do potencial tendendo a zero, conforme mostra a Fig.4.2.2.2.

**4.3 FORMA PONTUAL DA LEI DE OHM**

A terra pelas suas características de boa condutividade elétrica e por sua infinita capacidade de absorção de cargas elétricas, é utilizada como referência de potencial ZERO.

A fundação tipo grelha dimensionada das torres de transmissão é um sistema de aterramento eficiente pois dá uma referência à terra, além de eventualmente e efetivamente escovar sobretensões para o solo.

A corrente de fuga ao ser injetada no solo por este sistema de aterramento torre-solo se dispersará no solo conforme a Fig.4.3.1 [20] a seguir:

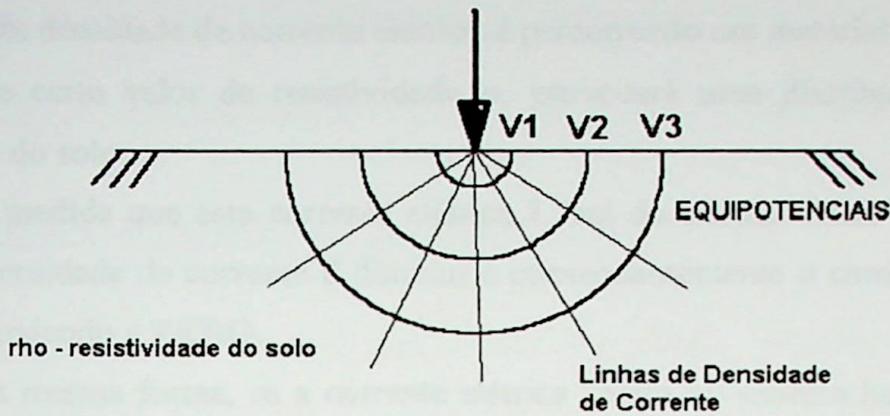


Fig.4.3.1 – Distribuição das correntes elétricas em solo

Fazendo-se uma analogia com um condutor de resistividade  $\rho$ , comprimento  $\Delta L$ , seção transversal  $s$ , percorrido por uma corrente  $I$ , tem uma queda de tensão dada por:

$$\Delta V = \rho \cdot \Delta L \cdot I \cdot s^{-1}$$

$$E = \Delta V \cdot \Delta L^{-1} = \rho \cdot I \cdot s^{-1}$$

$$E = \rho \cdot J \quad (1)$$

A expressão (1) é conhecida como a forma Pontual da Lei de Ohm, onde o campo elétrico  $E$  é igual ao produto da resistividade  $\rho$  pela densidade de corrente  $J$ .

A dispersão da corrente de fuga através do solo, transforma-se em uma densidade de corrente elétrica  $J$ , conforme a Fig.4.3.2 [20].

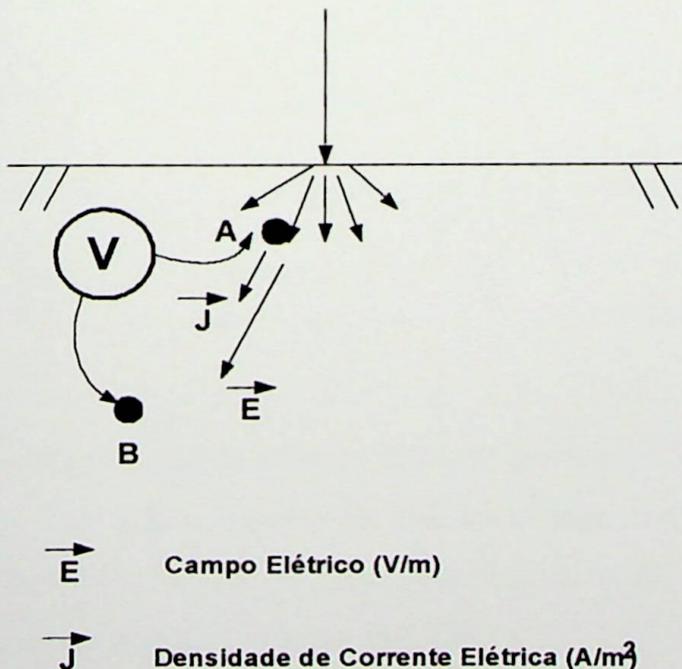


Fig.4.3.2 – Distribuição das correntes de fuga no solo

Esta densidade de corrente elétrica **J** percorrendo um material condutor volumétrico (**terra**) de certo valor de resistividade  $\rho$ , provocará uma distribuição de potencial na superfície do solo.

A medida que esta corrente elétrica **I** “sai do sistema haste-solo” e é injetada no solo, a densidade de corrente **J** diminui e conseqüentemente o campo elétrico **E** também diminui tendendo a **ZERO**.

Da mesma forma, se a corrente elétrica “entra no sistema haste-solo” a densidade de corrente **J** aumenta e conseqüentemente o campo elétrico **E** também aumentará.

medida instrumental de  $E_x$  e  $E_y$ , através condutores  $L_x$  e  $L_y$ , com pontos  
retardos, para que o sinal seja registrado e lido eletronicamente  
Assim em cada ponto de medição,  $E_x$  e  $E_y$ , possuem duas componentes a considerar,  
uma componente direta de “componente de distribuição” -  $E_{x,direta}$  - e a componente  
de “componente de retorno da terra” -  $E_{x,retorno}$ , de qual há uma “terra” ou “terra  
adjacente” onde se encontra o modelo de Dutra (12,13) de Fig. 3.1.1 a seguir.

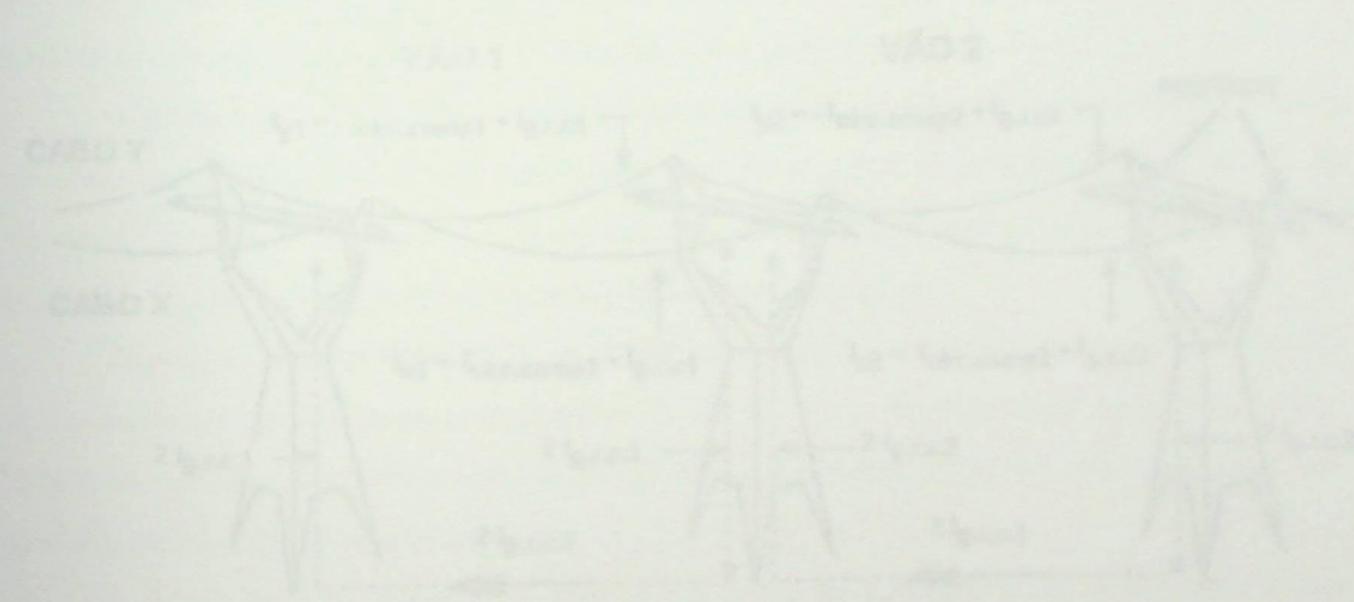


Fig. 3.1.1 - Modelo proposto por Dutra para a circulação de corrente de fuga  
nas linhas de energia de transmissão.  
Para a obtenção dos valores das equações (1) e (2), as condições consideradas  
são as seguintes, segundo Dutra (12,13):

AS CORRENTES DE FUGA E A CORROSÃO ELETROLÍTICA

5.1 CORRENTE DE FUGA – MODELO DE BURNETT

Segundo Burnett [12,13], com a linha energizada, circulam através dos cabos de cobertura correntes alternadas - CA - induzidas em 60 Hz (associados aos campos magnéticos) e correntes contínuas - CC (associadas aos campos elétricos), os quais em seu modelo matemático denominou de  $I_x$  e  $I_y$ . Burnett considerou  $I_x$  e  $I_y$  como grandezas vetoriais, uma vez que possuem módulo e ângulo respectivamente.

Ainda em seu modelo matemático,  $I_x$  e  $I_y$  possuem duas componentes a considerar, uma componente chamada de “componente de circulação” -  $I_{circ.comp}$  - e a outra chamada de “componente de retorno de terra” -  $I_{g.r.c}$  , as quais fecham seus “laços nas torres adjacentes” conforme mostra o modelo de Burnett [12,13] na Fig.5.1.1 a seguir:

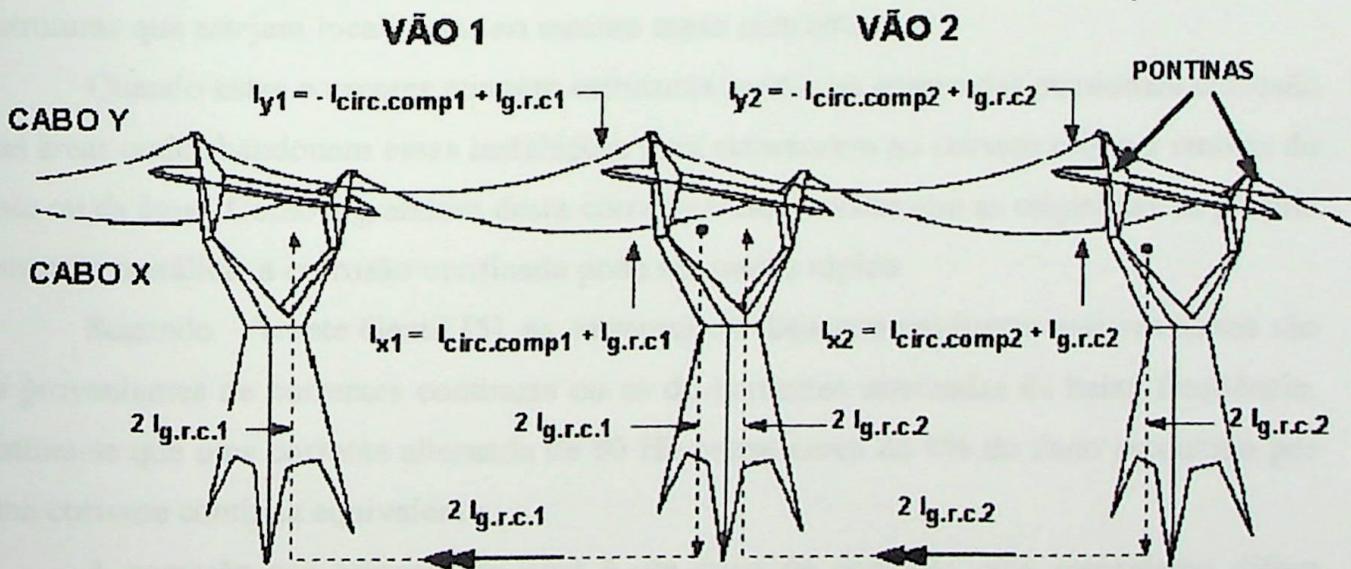


Fig.5.1.1 – Modelo proposto por Burnett para a circulação da corrente de fuga em fundações de linhas de transmissão

Para a obtenção dos valores das correntes  $I_x$  e  $I_y$ , as seguintes considerações teóricas são verificadas, segundo Burnett [12,13]:

$$I_{x1} = I_{\text{circ.comp.1}} + I_{\text{g.r.c.1}}$$

$$I_{y1} = - I_{\text{circ.comp.1}} + I_{\text{g.r.c.1}}$$

$$I_{x2} = I_{\text{circ.comp.2}} + I_{\text{g.r.c.2}}$$

$$I_{y2} = - I_{\text{circ.comp.2}} + I_{\text{g.r.c.2}}$$

Portanto temos, para o Vão 1:

$$I_{\text{circ.comp.1}} = (I_{x1} - I_{y1})/2$$

$$I_{\text{g.r.c.1}} = (I_{x1} + I_{y1})/2$$

e para o Vão 2

$$I_{\text{circ.comp.2}} = (I_{x2} - I_{y2})/2$$

$$I_{\text{g.r.c.2}} = (I_{x2} + I_{y2})/2$$

## 5.2 CORROSÃO POR CORRENTES DE FUGA

As correntes de fuga, também chamadas de “stray currents”, provenientes de aterramentos elétricos, sistemas de tração elétrica de trens e metrô, sistemas de proteção catódica de dutos ou outros sistemas, provocam corrosão localizada por eletrólise em estruturas que estejam localizadas no mesmo meio eletrolítico.

Quando estas correntes atingem estruturas metálicas enterradas ocasionam corrosão nas áreas onde abandonam essas instalações para retornarem ao circuito original através do solo ou da água. Como a grandeza destas correntes são maiores que as originadas na própria estrutura metálica, a corrosão verificada pode ser muito rápida.

Segundo Vicente Gentil [5], as correntes de fuga que produzem maiores danos são as provenientes de correntes contínuas ou as de correntes alternadas de baixa frequência. Estima-se que uma corrente alternada de 60 Hz cause cerca de 1% do dano produzido por uma corrente contínua equivalente.

A corrosão por corrente de fuga é um caso de corrosão cujo mecanismo difere substancialmente dos tipos analisados até o momento. Neste caso a corrosão é provocada pela passagem de corrente parasita, proveniente de um gerador, normalmente, de corrente contínua. No caso dos pára-raios das linhas de transmissão, estas correntes são provenientes dos campos elétricos e magnéticos da fonte primária quando as linhas estão energizadas. Como o carregamento (MW) e a tensão (kV) de transmissão são variáveis ao longo do tempo (s) nos sistemas de transmissão, a intensidade dos campos elétricos e

magnéticos também o são e por conseguinte as correntes induzidas provenientes destes campos.

A Fig.5.2.1 mostra uma proteção catódica muito utilizada nas proteções das tubulações de gasodutos, oleodutos e outras instalações enterradas.

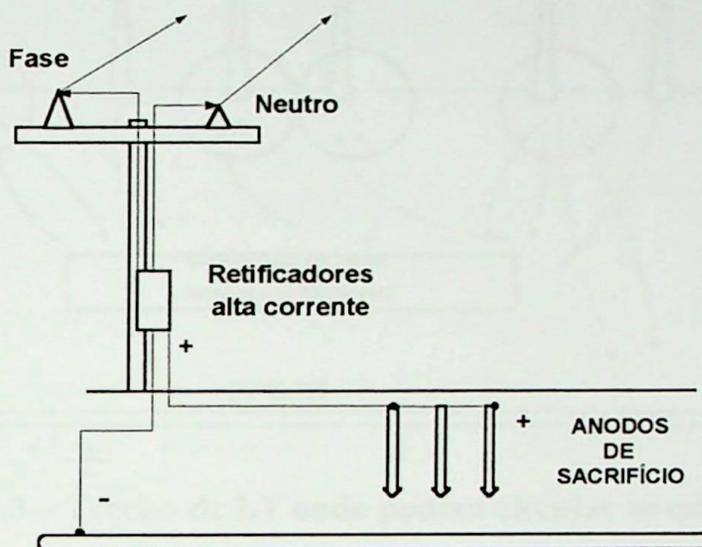


Fig.5.2.1 - Detalhe da proteção catódica por corrente impressa

Os sistemas de PC (proteção catódica por corrente impressa) instalados ao longo do trecho das tubulações, são consideradas verdadeiras “usinas” de Corrente Contínua (CC) e que utilizam baixa tensão, 40 a 60 Vcc, todavia com valores de correntes elevados da ordem de 20, 40, 60, 150, 300 e de até 500 A.

O polo negativo é conectado, solidamente, à tubulação, enquanto que o polo positivo, geralmente, localizado à uma razoável distância da tubulação, pode chegar as vezes, a cerca de algumas dezenas de Km da tubulação, afim de ampliar a cobertura de corrente, diminuindo com isso as instalações dos retificadores as quais são consideradas estações de “bombeamento de elétrons”. Na Fig.5.2.2 está representado um trecho qualquer de uma tubulação protegidos por esta corrente impressa.

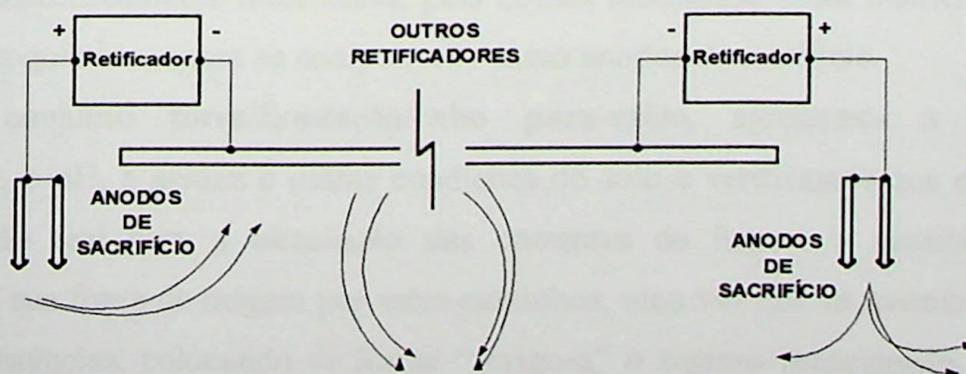


Fig.5.2.2 - Detalhe da PC por corrente impressa ao longo da tubulação

Na Fig.5.2.3 está representado um trecho qualquer de uma Linha de Transmissão, por onde cruza uma tubulação qualquer protegida por PC.

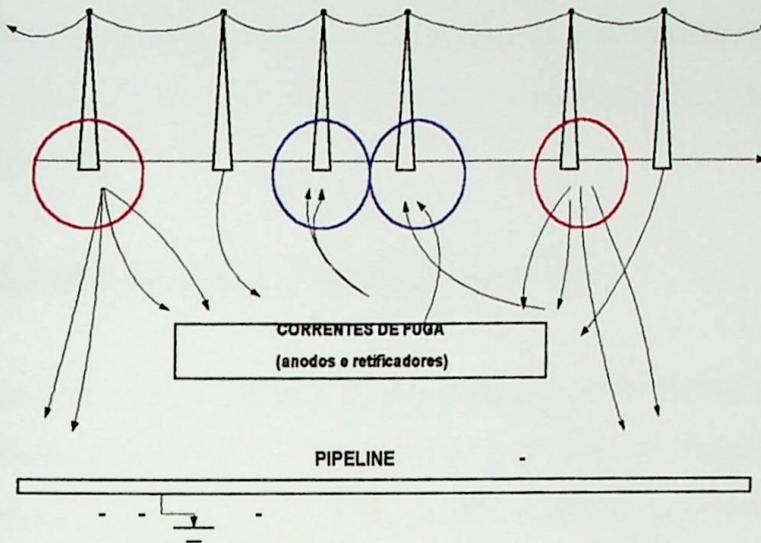


Fig.5.2.3 – Trecho de LT onde podem circular as corrente de fuga

Como podemos observar na Fig.5.2.3, tanto a tubulação como as fundações poderão servir como condutores de corrente afim de que os elétrons retornem à sua fonte de origem. Na região onde estas corrente de fuga, “entram nas fundações” para o retorno à fonte (circuito elétrico favorável ao retorno das correntes às fontes geradoras devido a sua baixa resistência elétrica), nestas fundações específicas, teremos um processo catódico, de caráter benéfico, protegendo as nossas fundações contra a corrosão porém nos pontos onde estas correntes de fuga “saírem das fundações” ao encontro de suas fontes ou mesmo para se dirigirem à tubulação, nestes locais, teremos uma profunda ação anódica. A corrosão nestes pontos será uma função direta do somatório de correntes de fuga captadas ao longo do trajeto, podendo apresentar valores de corrente elétrica significativos, havendo nestes pontos uma aceleração expressiva da corrosão onde estaremos colocando em risco estas fundações, especificamente localizadas, pois nossas fundações, neste momento sob ponto de vista eletroquímico, agora se comportarão como anodos de sacrificio.

Ao conjunto **torre/fundação/cabo pára-raios**, agregamos a umidade, a resistividade, o pH, a acidez e outras condições do solo e verificamos que eles oferecem uma condição real para a circulação das correntes de fuga e a possibilidade delas retornarem à sua fonte de origem por estes caminhos, uma vez que os mesmos apresentam menores resistências, colocando de forma “perigosa” o sistema mencionado. Em geral as linhas de transmissão cruzam as tubulações ao longo de suas trajetórias. Sendo os materiais

metálicos condutores de mais baixa resistividade que solo qualquer estrutura metálica enterrada na zona de influência destes sistemas será o caminho preferencial para a corrente elétrica.

A rigor, não há necessidade de que a corrente seja efetivamente contínua, podendo ser inclusive alternada. Para se evitar este tipo de corrosão a única solução é eliminar a corrente de fuga [3].

### **5.3 DISCUSSÕES SOBRE A CORRENTE DE FUGA**

Ruedisueli et all [15] afirmam em suas pesquisas que “a corrente alternada CA tem um efeito depassivante sobre a região normalmente passiva”. Região dita “passiva”, segundo Pourbaix [3], o autor afirma ser a região onde não há corrosão, onde o metal encontra-se imune a este processo. Neste caso, em nossas fundações em grelha dimensionada há a presença de corrente CA, portanto temos um efeito “depassivante” presente sobre a ferrugem da grelha levando à completa destruição do filme passivo protetor, conseqüentemente à corrosão ativa do metal.

Ainda segundo Ruedisueli et all [15] afirmam “que o efeito da depassivação aumenta com o aumento da densidade do sinal CA superposto, mas diminui com o aumento da freqüência”.

De acordo com J.Uruchurtu [11], a faixa das freqüências dos sinais CA que colaboram para a corrosão do aço está situada entre 50 e 120 Hz. Freqüências acima deste espectro não causam a manifestação eletroquímica da corrosão.

Segundo Jones [16], afirma em sua pesquisa que “a taxa de corrosão de algumas ligas de aço e de aço carbono, num eletrólito específico de 0.1 N de NaCl, a corrosão foi acelerada por fatores de 4 a 6 vezes a uma densidade de corrente alternada de 30 mA/cm<sup>2</sup>, na freqüência de 60 Hz”.

Ainda segundo Jones [16], afirma também que, “no semi ciclo anódico da corrente CA, há uma “perda” no potencial de polarização de TAFEL, que se refletirá em perda de material através de corrosão das ligas, o qual não é recuperado no semi ciclo catódico da corrente CA”, tendo portanto um efeito retificador na corrente resultante colaborando para o processo corrosivo.

Como base nas afirmações de Jones [16], verificamos que nas fundações em grelha dimensionada o eletrólito é o solo, que é diferente do eletrólito pesquisado por Jones mas,

percebemos do mesmo modo que o pesquisador que há uma aceleração da corrosão em nossas fundações. Verificamos que a presença da corrente de fuga CA na fundação em grelha dimensionada neste eletrólito, o solo, há evidências da aceleração do processo corrosivo devido a esta circulação de corrente.

Em um outro artigo publicado por Jones e Wilde [17], afirmam que "...aço carbono e suas ligas são usados de maneira muito comum em tubulações metálicas, condutos (combustíveis, água, petróleo) e outras estruturas onde a corrente de fuga e correntes alternadas induzidas, são frequentemente encontradas. Poucos estudos no mundo foram feitos sobre os efeitos da corrente alternada - CA, na corrosão dos aços carbono. Geralmente, tem se observado que a corrente CA tem uma influência sobre a corrosão, mas os mecanismos de sua aceleração são até aqui desconhecidos", concluem os pesquisadores.

Jones e Wilde [17], efetuaram medições de resistência de polarização em juntas metálicas aparafusadas, em torres de transmissão, sob a ação das intempéries atmosféricas e demonstraram uma tendência à corrosão da corrente CA nestas juntas.

Ambos os aumentos, o da taxa de corrosão e o deslocamento negativo do potencial de corrosão, sugerem ou apontam para uma despolarização da reação anódica pela circulação da corrente CA.

Jones e Wilde [17] neste artigo comentam que, "...ligas de aço são frequentemente usadas na construção de torres de transmissão de energia elétrica. Algumas falhas por acúmulo de material nas frestas dos materiais, em climas úmidos, tem provocado perguntas se há uma contribuição da corrente de fuga CA circulando através dos pés das torres. A fig. 1 é um exemplo de acúmulo de material nas fresta localizado nas suas juntas entre o pé da torre de transmissão e uma junção de sustentação mecânica...", nesta ação corrosiva por eles estudado. Ficou constatado que o processo é acelerado pela presença da circulação da componente CA através da ferragem estudada.

Embora a pesquisa de Jones e Wilde [17], não esteja direcionada exatamente na condição em que estamos estudando, podemos prever seus efeitos em nossas fundações, considerando as mais adversas condições nas fundações onde há a combinação de um metal galvanizado enterrado diretamente no solo, sofrendo mecanismos de corrosão extremamente diversificados e muito mais complexos.

Na Fig.5.3.1, Jones e Wilde [17], mostram o efeito da corrente alternada CA sobre a corrosão, onde a derivada, na curva em estudo, representa a taxa de corrosão com um valor acentuado no aço, devido a ação da componente CA.

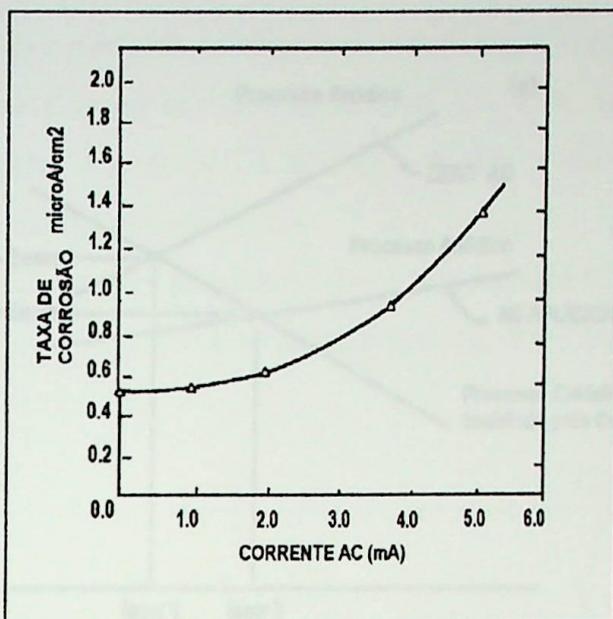


Fig.5.3.1 – Efeito da corrente CA na taxa de corrosão

Na Fig.5.3.2 [17], vemos como se comporta a taxa de corrosão em  $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ , frente a circulação de corrente CA, numa situação com umidade presente.

É importante lembrar que as fundações das LT encontram-se enterradas no solo e o fator umidade está normalmente presente na maioria dos casos.

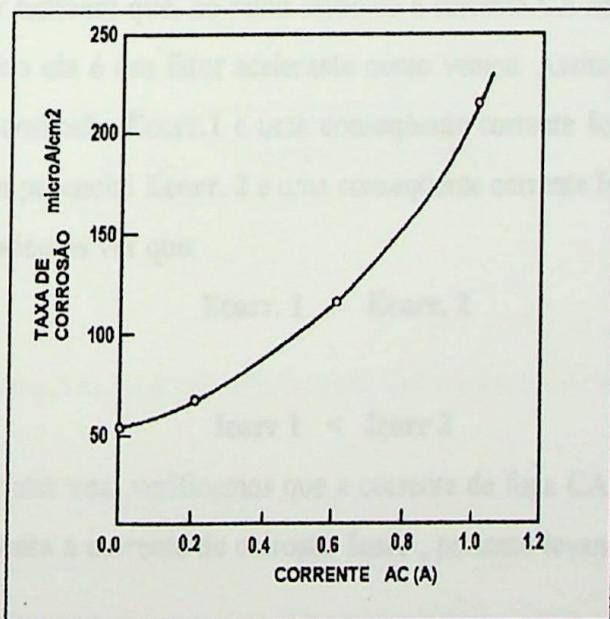
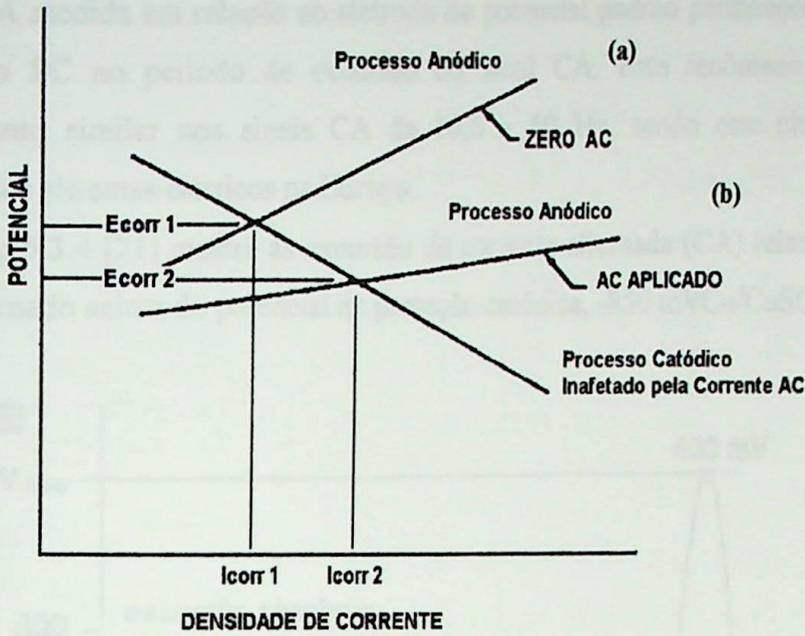


Fig.5.3.2 – Efeito da corrente CA na taxa de corrosão – ambiente úmido

A Fig.5.3.3, mostra o mecanismo da corrosão, sugerido por Jones e Wilde [17], onde há uma aceleração da corrosão pela inserção de corrente CA, requerendo uma despolarização na reação anódica.



**Fig.5.3.3 – Diagrama de TAFEL para um processo corrosivo:  
(a) sem componente CA; (b) com componente CA**

Podemos notar também que, no ramo catódico a corrente CA não afeta à corrosão, porém no ramo anódico ela é um fator acelerante como vemos. Assim com “ZERO CA” temos o potencial de corrosão  $E_{corr.1}$  e uma conseqüente corrente  $I_{corr. 1}$  e com sinal CA aplicado temos um potencial  $E_{corr. 2}$  e uma conseqüente corrente  $I_{corr. 2}$ .

Pelo gráfico podemos ver que:

$$E_{corr. 1} > E_{corr. 2}$$

e

$$I_{corr 1} < I_{corr 2}$$

Portanto, mais uma vez, verificamos que a corrente de fuga CA quando circulante em aços carbono, aumenta a corrente de corrosão  $I_{corr}$ , portanto levando à aceleração do processo corrosivo.

Segundo Carpentiers e Pourbaix [21], em suas recentes pesquisas, embora as tubulações estivessem protegidas com uma Proteção Catódica por Corrente Impressa (PC), os resultados mostraram que há uma significativa corrosão quando o pico da corrente alternada (CA) medida em relação ao eletrodo de potencial padrão for maior que  $-850 \text{ mV}_{\text{Cu/CuSO}_4}$  que é o nível do sinal do PC. Constataram também que não há corrosão quando

o pico da CA medida em relação ao eletrodo de potencial padrão permanece abaixo deste potencial do PC no período de excursão do sinal CA. Este fenômeno surge e tem comportamento similar nos sinais CA de 16,6 a 50 Hz, sendo este último valor da frequência dos sistemas elétricos na Europa.

A Fig.5.3.4 [21] mostra as excursão da corrente alternada (CA) relativa e absoluta do sinal alternado acima do potencial de proteção catódica,  $-850 \text{ mV}_{\text{Cu/CuSO}_4}$ .

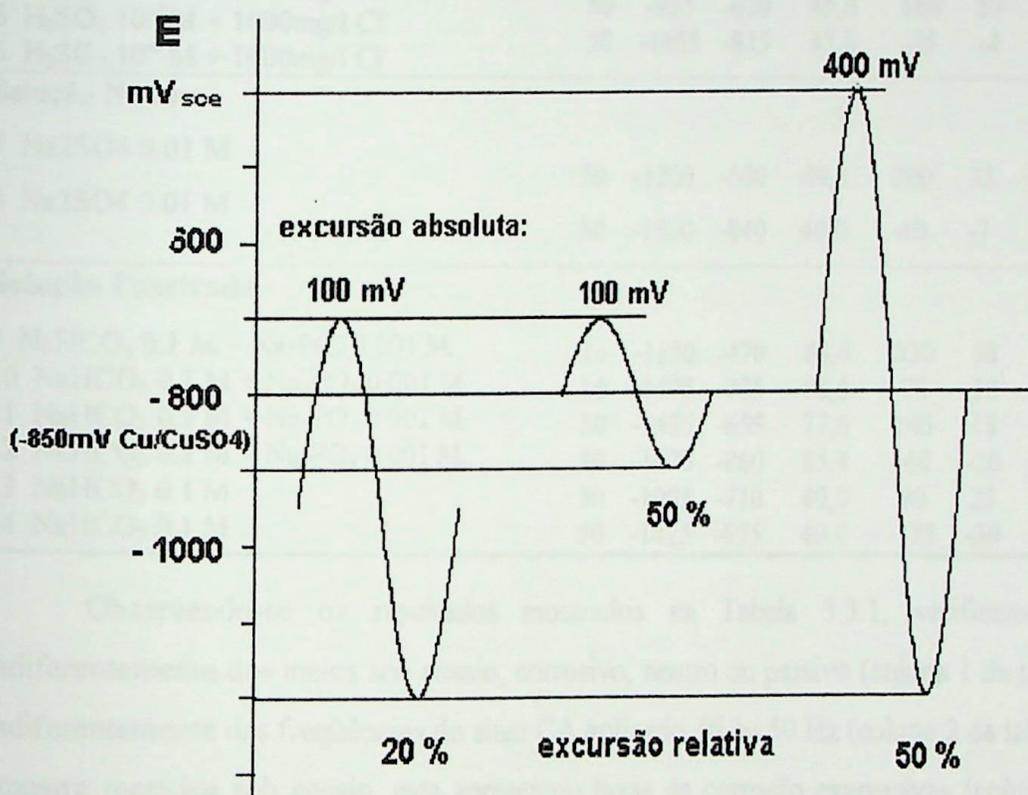


Fig.5.3.4 – Excursão do sinal CA relativa e absoluta

Já na Tabela 5.3.1, Carpentiers e Pourbaix [21] registram os resultados encontrados em seus testes para diferentes condições de polarização efetuados em solução corrosiva, solução neutra e solução passiva.

Tabela 5.3.1 – Resultados dos testes de laboratório

| Tipo de Solução   | f<br>Hz | Potencial CA              |      | I <sub>CA</sub><br>mA/cm <sup>2</sup> | Excursão Potencial |           | Taxa<br>corrosão<br>mm/y |
|---|---------|---------------------------|------|---------------------------------------|--------------------|-----------|--------------------------|
|   |         | mín.<br>mV <sub>sce</sub> | máx. |                                       | abs.<br>mV         | Rel.<br>% |                          |
| <b>Solução Corrosiva</b>  |         |                           |      |                                       |                    |           |                          |
| 1 Ácido acético 0.001N +500mg/l Cl <sup>-</sup>                                 | 50      | -1380                     | -885 | 30,0                                  | -                  | -         | 0,0                      |
| 2 H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> .10 <sup>-4</sup> M + 1000mg/l Cl <sup>-</sup> | 16      | -900                      | -725 | 44,5                                  | 75                 | 43        | 25,59                    |
| 3 H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> .10 <sup>-4</sup> M + 1000mg/l Cl <sup>-</sup> | 16      | -1225                     | -600 | 44,8                                  | 140                | 25        | 3,97                     |
| 4 H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> .10 <sup>-4</sup> M + 1000mg/l Cl <sup>-</sup> | 16      | -1489                     | -815 | 47,5                                  | -15                | -2        | 0,18                     |
| 5 H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> .10 <sup>-4</sup> M + 1000mg/l Cl <sup>-</sup> | 50      | -935                      | -620 | 45,6                                  | 180                | 57        | 19,11                    |
| 6 H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> .10 <sup>-4</sup> M + 1000mg/l Cl <sup>-</sup> | 50      | -1455                     | -825 | 45,6                                  | -25                | -4        | 0,2                      |
| <b>Solução Neutra</b>   |         |                           |      |                                       |                    |           |                          |
| 7 Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> 0.01 M  | 50      | -1200                     | -600 | 40,0                                  | 200                | 33        | 0,36                     |
| 8 Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> 0.01 M  | 50      | -1390                     | -840 | 40,0                                  | -40                | -7        | 0,06                     |
| <b>Solução Passivada</b>  |         |                           |      |                                       |                    |           |                          |
| 9 NaHCO <sub>3</sub> 0.1 M + Na <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> 0.001 M            | 16      | -1150                     | -470 | 68,6                                  | 330                | 48        | 2,08                     |
| 10 NaHCO <sub>3</sub> 0.1 M + Na <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> 0.001 M           | 16      | -1475                     | -725 | 88,5                                  | 75                 | 10        | 0,26                     |
| 11 NaHCO <sub>3</sub> 0.1 M + Na <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> 0.001 M           | 50      | -1435                     | -655 | 77,6                                  | 145                | 18        | 1,81                     |
| 12 NaHCO <sub>3</sub> 0.1 M + Na <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> 0.001 M           | 50      | -1470                     | -860 | 85,4                                  | -60                | -10       | 0,16                     |
| 13 NaHCO <sub>3</sub> 0.1 M   | 50      | -1095                     | -710 | 40,0                                  | 90                 | 23        | 0,05                     |
| 14 NaHCO <sub>3</sub> 0.1 M   | 50      | -1425                     | -975 | 40,0                                  | -175               | -39       | 0,04                     |

Observando-se os resultados mostrados na Tabela 5.3.1, verificamos que indiferentemente dos meios sob ensaio, corrosivo, neutro ou passivo (coluna 1 da tabela) e indiferentemente das frequências do sinal CA aplicado 16 ou 50 Hz (coluna 2 da tabela) na amostra metálica sob ensaio, esta apresentou taxas de corrosão expressivas (coluna 8 da tabela) quando o sinal CA aplicado ultrapassou o limite do potencial protegido catódicamente que era de -850 mV<sub>Cu/CuSO<sub>4</sub></sub> (coluna 4 da tabela). Isto revela que existe corrosão significativa somente quando o valor da CA é maior do que o potencial crítico da proteção catódica e comprova, da mesma forma, que não há corrosão quando o valor permanece abaixo deste potencial crítico [21].

## **PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL**

### **6.1 GENERALIDADES**

Com a implantação do sistema de transmissão em alta e extra alta tensão principalmente a partir de 525 kV, verifica-se que num intervalo de tempo, de apenas 2 anos, o aparecimento precoce da corrosão nestas fundações em aço revestidos por zinco. Estas constatações foram corroboradas por medições do potencial do sistema torre-solo, em campo, com a utilização do eletrodo padrão Cu/CuSO<sub>4</sub>.

A medida que os níveis de tensão foram sendo elevados para maximizar a transmissão e minimizar as perdas, as estruturas de madeira e concreto foram cedendo lugar às de metal galvanizadas por inúmeras facilidades. Estas estruturas metálicas galvanizadas, do tipo grelha dimensionada, construídas com a mesma ferragem empregada na montagem das demais partes constituintes de uma torre, são projetadas para suportarem um período de 12 anos em atmosferas agressivas e de até 24 anos em atmosferas rurais de serviço [1,2,3,4,6].

Estas fundações são soterradas, portanto estão em contato direto com diversos tipos de solos, ficando deste modo sujeitas a diferentes processos de corrosão, nos solos.

O sistema de transmissão das Empresa Transmissora de Energia Elétrica do Sul do Brasil – S.A. - Eletrosul é composto de 8.570 km de linhas de transmissão, em sua grande maioria com torres do tipo metálica nas tensões de 69 kV, 138 kV, 230 kV e 525 kV , suprindo os estados do Rio Grande do Sul, Santa Catarina, Paraná e Mato Grosso do Sul correspondendo a 11,1 % do mercado elétrico brasileiro.

As torres são fabricadas, baseadas nas especificações normativas da ABNT, com perfis de aço galvanizado, processo este obtido através de imersão a quente em banho de zinco [1,2]. As especificações técnicas da Eletrosul exigem uma espessura média de 80 µm de camada de proteção em zinco em seus perfis de aço.

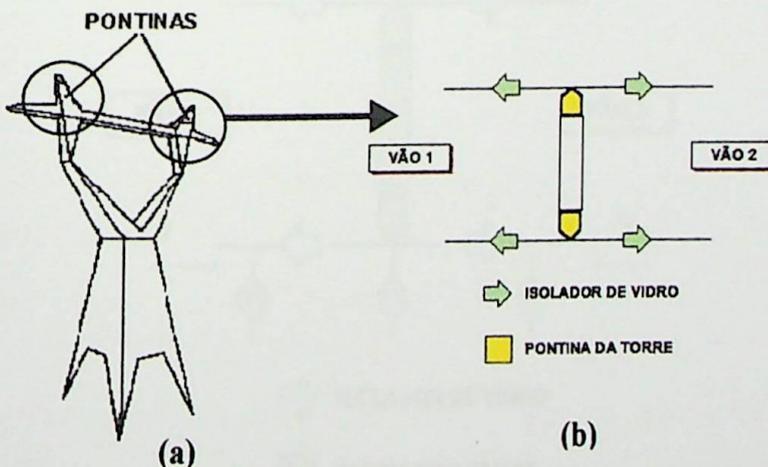
Sabe-se que o principal problema de corrosão em torres de transmissão está localizado nas fundações onde se verificam fenômenos como a aeração diferencial, pH, umidade do solo, acrescidos ainda das correntes de fuga.

## 6.2 ROTEIRO DOS ENSAIOS REALIZADOS PARA A MEDIÇÃO EM CAMPO DA CORRENTE DE FUGA

Com o objetivo de estudar e medir a corrente  $I_x$ , relativa ao cabo X, e  $I_y$  relativa ao cabo Y e conseqüentemente as “componentes de circulação” –  $I_{circ.comp.}$  e a “componente de retorno por terra” –  $I_{g.r.c.}$  - foi elaborado um Roteiro de Testes [19] os quais foram aplicados em campo, em duas torres de transmissão do Sistema Elétrico da ELETROSUL, especificamente na LT Curitiba-Blumenau 525 kV, mais precisamente, na Torre 306 (localizada na saída da LT na SE Blumenau a 3 km da subestação) e na Torre 260 (localizada a 12 km da SE Blumenau).

Os cabos pára-raios X e Y são solidamente conectados à ferragem na parte superior da torre. A esta ferragem específica da torre de transmissão onde são conectados os cabos pára-raios, através de grampos especiais de conexão, é chamada de pontina.

Seguindo a proposta de Burnett [12,13], conforme mostrado no Capítulo 5.1, a Fig.6.2.1 (a), mostra uma torre de transmissão onde está indicado o local físico das pontinas pois existem, uma pontina no lado direito da torre e uma no lado esquerdo da torre e na Fig.6.2.1. (b), mostra um diagrama esquemático específico da pontina da torre 306, em vista de planta (topo), a qual deverá ser ensaiada. É na pontina onde os cabos pára-raios encontram-se solidamente conectados à torre.

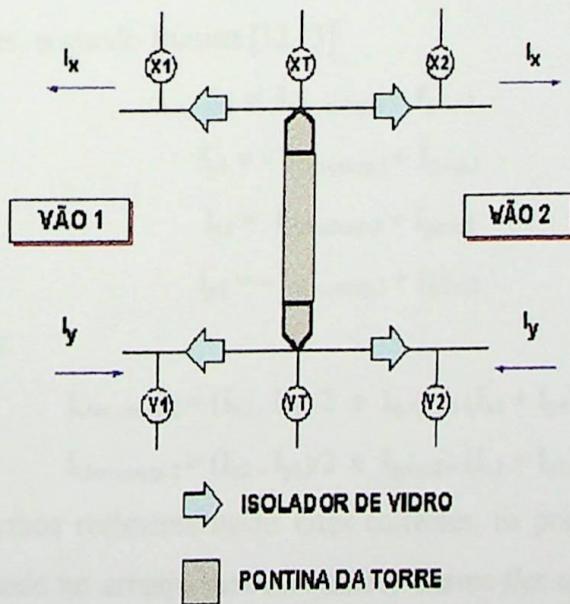


**Fig.6.2.1 – (a) Localização física das pontinas; (b) Desenho esquemático das pontinas em planta com instalação de isoladores de vidro**

A Fig.6.2.1 (b), mostra algumas modificações que foram introduzidas, especificamente para estes testes, nos cabos pára-raios X e Y os quais estão conectados a

estas pontinas. Foram inseridos isoladores de vidro de forma a isolarmos, da torre, os cabos pára-raios e conseqüentemente isolando as correntes  $I_x$  e  $I_y$  advindas pelos cabos pára-raios, as quais são normalmente injetadas na torre. Neste arranjo, a “**componente de circulação –  $I_{circ.comp.}$** ” destas correntes circula somente entre os vãos superiores de duas torres adjacentes, enquanto que a outra “**componente de retorno por terra–  $I_{g.r.c.}$** ” não circulará através do solo, pois o fechamento do circuito elétrico entre as torres adjacentes encontra-se aberto.

Com a isolação da corrente de fuga garantida através destes isoladores, foram conectados 06 (seis) cabos especiais, com blindagem, identificados como: X1, X2, XT, Y1, Y2 e YT, sendo os mesmos, X1, X2, Y1 e Y2 conectados aos cabos pára-raios X e Y respectivamente e os cabos XT e YT nas pontinas, direita e esquerda respectivamente, sendo levados a um laboratório de medidas elétricas de campo, com instrumentação adequada junto à base da torre, no solo, de modo a efetuarmos a medição destas correntes de fuga em módulo e ângulo. É importante lembrarmos que estas torres tem, em média, 30m de altura em relação ao solo, sendo a operação de instalação dos isoladores de vidro para o isolamento da corrente e as conexões dos cabos blindados, uma manobra complexa e delicada feita por equipe altamente especializada.



**Fig.6.2.2 – Diagrama esquemático da corrente de fuga  $I_x$  e  $I_y$**

Considerando a Fig.5.1.1 do Capítulo 5.1, onde mostra a circulação da corrente de fuga e a Fig.6.2.2 onde mostra, em detalhe, o diagrama esquemático das conexões dos cabos blindados, e a condição proposta por Burnett [12,13], temos:

$I_x$  - Corrente no cabo X , onde  $I_x = I_{\text{circ.comp.1}} + I_{\text{g.r.c.1}}$ ;

$I_y$  - Corrente no cabo Y , onde  $I_y = - I_{\text{circ.comp.1}} + I_{\text{g.r.c.1}}$ ;

Onde:

**X1, X2 e XT** – são os pontos de conexão dos cabos especiais, com blindagem, que foram conectados especialmente neste caso em estudo para as medições da corrente, no cabo X e na pontina correspondente;

**Y1, Y2 e YT** – são os pontos de conexão dos cabos especiais, com blindagem, que foram conectados especialmente neste caso em estudo para as medições da corrente, no cabo Y e na pontina correspondente.

Considerando os cabos pára-raios já isolados no VÃO 1 e no VÃO 2, conforme mostra a Fig.6.2.2, ao interligarmos os cabos X1 e Y1, do VÃO 1, a corrente circulará somente nos cabos pára-raios deste VÃO 1, uma vez que os cabos estão isolados da torre. Situação idêntica pode ser realizada no VÃO 2, desta vez interligando-se o cabo X2 ao cabo Y2. Nesta condição, não haverá circulação de corrente através da torre de transmissão para o solo, uma vez que ela se encontra isolada do circuito elétrico através dos isoladores de vidro.

Para a obtenção dos valores das correntes  $I_x$  e  $I_y$ , as seguintes considerações teóricas são verificadas, segundo Burnett [12,13]:

$$I_{x1} = I_{\text{circ.comp.1}} + I_{\text{g.r.c.1}}$$

$$I_{y1} = - I_{\text{circ.comp.1}} + I_{\text{g.r.c.1}}$$

$$I_{x2} = I_{\text{circ.comp.2}} + I_{\text{g.r.c.2}}$$

$$I_{y2} = - I_{\text{circ.comp.2}} + I_{\text{g.r.c.2}}$$

Portanto temos:

$$I_{\text{circ.comp.1}} = (I_{x1} - I_{y1})/2 \text{ e } I_{\text{g.r.c.1}} = (I_{x1} + I_{y1})/2$$

$$I_{\text{circ.comp.2}} = (I_{x2} - I_{y2})/2 \text{ e } I_{\text{g.r.c.2}} = (I_{x2} + I_{y2})/2$$

Afim de podermos realmente medir estas correntes, na prática, foi montado um protótipo de ensaio, onde no arranjo temos instalados chaves *flex test* (micro chaves tipo faca), transformadores de corrente, resistores *shunt* (resistores especiais para medição da corrente) e conectores tipo “sindal” (régua de bornes para conexão de cabos).

A Fig.6.2.3, mostra o diagrama esquemático montado em uma plataforma de madeira, onde foram montados os circuitos para a medição das correntes em discussão.

Os pontos neste circuito onde serão conectados os cabos especiais blindados vindos

da parte superior da torre, das pontinas, estão identificados na régua tipo “sindal”, de modo que as conexões propostas nos testes sejam executadas permitindo aos cabos pára-raios se interligarem neste circuito.

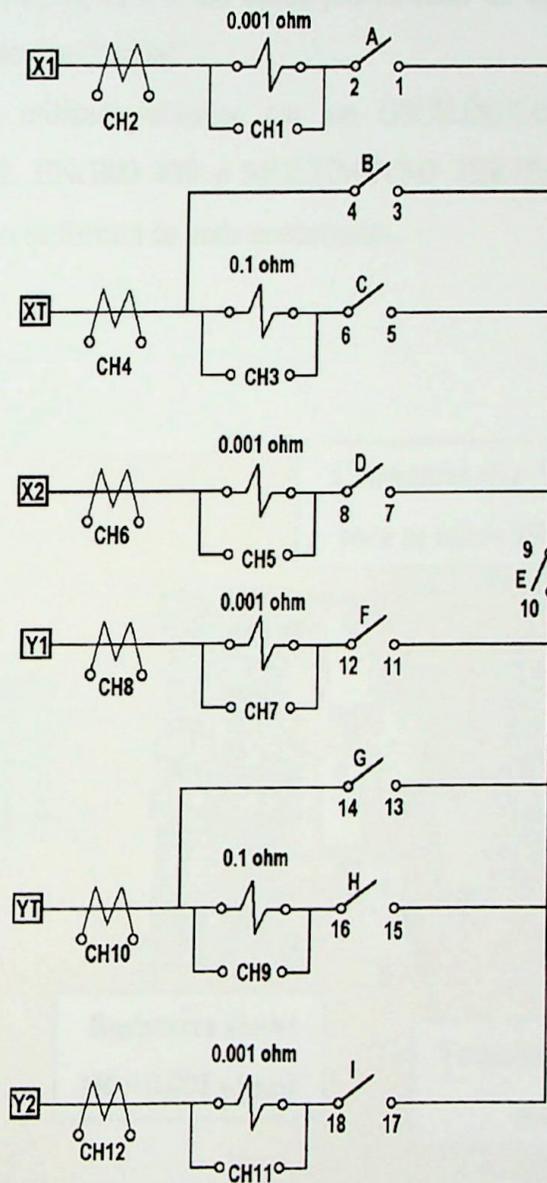


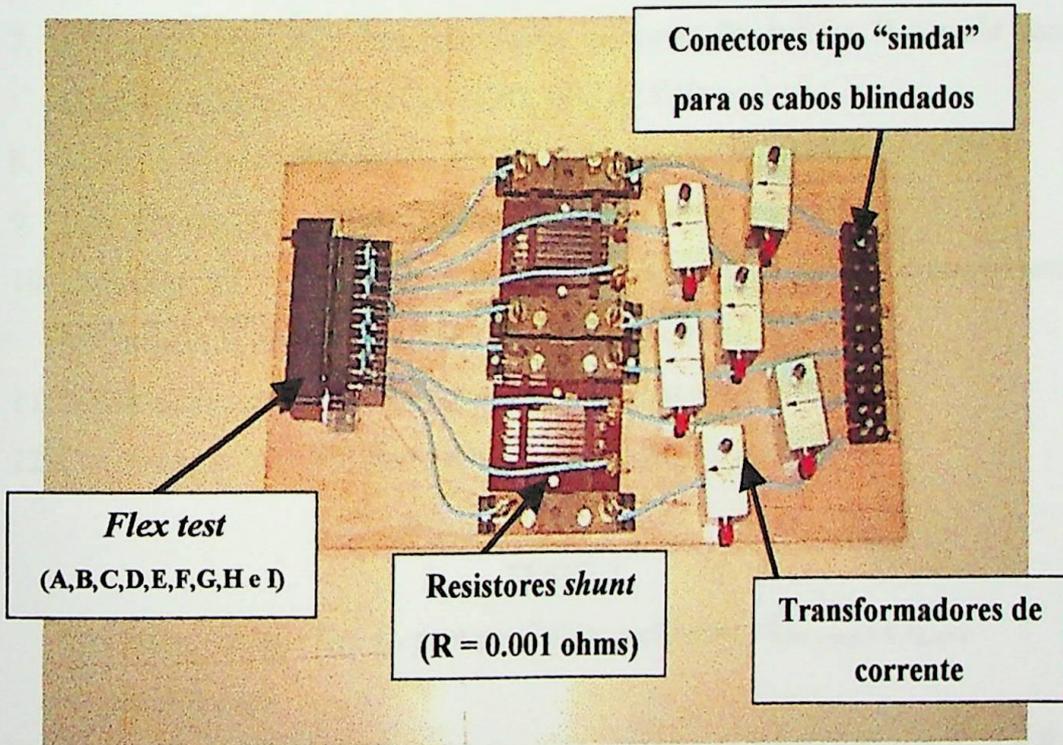
Fig.6.2.3 – Esquemático do circuito para a medição de  $I_x$  e  $I_y$

Os cabos especiais blindados X1, X2, XT, Y1, Y2 e YT oriundos da parte superior da torre são conectados no circuito da Fig.6.2.3 em seus pontos respectivamente identificados no circuito montado. Como as chaves *flex-test* estão todas abertas, o circuito continua aberto, i.e., não há a circulação de corrente entre os VÃOS 1 e 2 tão pouco

circulação de corrente para o solo, via torre de transmissão.

A Fig.6.2.4 [19,22], mostra a foto da montagem do circuito da Fig.6.2.3, onde podemos ver instalados os transformadores de correntes (CH2, CH4, CH6, CH8, CH10 e CH12), os resistores *shunt* ( $R = 0.001$  ohms) e do conjunto de chaves *flex-test* onde estão as chaves A, B, C, D, E, F, G, H e I. Os cabos provenientes do topo da torre, foram conectados nos terminais do tipo “sindal”.

A instrumentação utilizada consiste em um OSCILÓGRAFO HIOKI 8825, MULTÍMETRO DIGITAL ENGRO 820 e MULTÍMETRO TEKTRONIX DMM 252, para o tratamento adequado às formas de onda encontradas.



**Fig.6.2.4 – Foto do circuito para a medição da corrente de fuga  $I_x$  e  $I_y$**

### **6.3 ROTEIRO DE TESTES**

O Roteiro de Testes [22] proposto tem o intuito de determinarmos a grandeza das correntes de fuga  $I_x$  e  $I_y$ , em módulo e em ângulo, de acordo com a proposta de Burnett [12,13]:

### TESTE 1

**Objetivo** – medir  $I_{g.r.c.1}$  e  $I_{g.r.c.2}$  de modo a obtermos a grandeza dessas correntes.

**Procedimento:**

1. Conectar X1 - XT . Para tanto fechar as chaves *flex-test* A e C e medir com os instrumentos nos pontos CH1, CH2, CH3 e CH4;
2. Medir a corrente e potencial em XT, verificar os sinais CA/CC;
3. Desconectar X1 - XT . Para tanto abrir as chaves *flex-test* A e C;
4. Conectar X2 - XT. Para tanto fechar as chaves *flex-test* C e D e medir com os instrumentos nos pontos CH3, CH4, CH5 e CH6;
5. Medir a corrente e potencial em XT, verificar os sinais CA/CC;
6. Desconectar X2 - XT. Para tanto abrir as chaves *flex-test* C e D;
7. Conectar Y1 – YT. Para tanto fechar as chaves *flex-test* F e H e medir com os instrumentos nos pontos CH7, CH8, CH9 e CH10;
8. Medir a corrente e potencial em YT, verificar os sinais CA/CC;
9. Desconectar Y1 – YT. Para tanto abrir as chaves *flex-test* F e H;
10. Conectar Y2 – YT. Para tanto fechar as chaves *flex-test* H e I e medir com os instrumentos nos pontos CH9, CH10, CH11 e CH12;
11. Medir a corrente e potencial em YT, verificar os sinais CA/CC;
12. Desconectar Y2– YT. Para tanto abrir as chaves *flex-test* H e I.

### TESTE 2

**Objetivo** – medir  $I_{x1}$  e  $I_{y1}$  para possibilitar o cálculo de  $I_{circ.comp.1}$  e  $I_{g.r.c.1}$ .

**Procedimento:**

1. Conectar X1 - XT e Y1 – YT. Para tanto fechar as chaves *flex-test* A, B e F,G e medir com os instrumentos nos pontos CH4 e CH10;
2. Medir a corrente e potencial em XT e YT, verificar os sinais CA/CC;
3. Desconectar X1 - XT e Y1 – YT. Para tanto abrir as chaves *flex-test* A, B, F e G.

### TESTE 3

**Objetivo** – medir  $I_{x2}$  e  $I_{y2}$  para possibilitar o cálculo de  $I_{circ.comp.2}$  e  $I_{g.r.c.2}$  .

**Procedimento:**

1. Conectar X2 - XT e Y2 – YT. Para tanto fechar as chaves *flex-test* B, D e G, I e

- medir com os instrumentos nos pontos CH6 e CH12;
2. Medir a corrente e potencial em XT e YT, verificar os sinais CA/CC;
  3. Desconectar X2 - XT e Y2 - YT. Para tanto abrir as chaves *flex-test* B, D, G e I.

#### TESTE 4

**Objetivo** – medir  $I_{x1}$  e  $I_{y1}$ ,  $I_{x2}$  e  $I_{y2}$  e XT e YT, com todas as conexões realizadas, para verificar o comportamento sob condições normais de operação (interação das diversas correntes).

**Procedimento:**

1. Conectar X1 – XT – X2 e Y1 – YT – Y2. Para tanto fechar as chaves *flex-test* A, C, D e F, H, I e medir com os instrumentos nos pontos CH2, CH4, CH6 e CH8, CH, CH10 e CH12;
2. Medir a corrente e potencial em X1, XT, X2, Y1, YT e Y2, verificar os sinais CA/CC;
3. Desconectar X1 – XT – X2 e Y1 – YT – Y2. Para tanto abrir as chaves *flex-test* A, C, D e F, H e I.

Os resultados e discussões destas medições efetuadas da corrente de fuga, serão apresentados no Capítulo 7 desta dissertação.

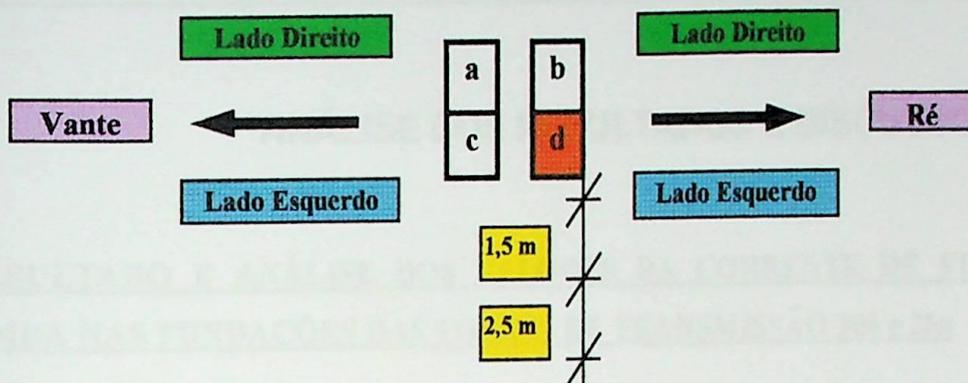
#### **6.4 MEDICÃO DOS POTENCIAIS EM CAMPO UTILIZANDO O MÉTODO - ELETRODO PADRÃO DE Cu/CuSO<sub>4</sub> – MEDICÃO EM DOIS PONTOS**

As medições de potencial foram orientadas para que em campo seja escolhido o mesmo “pé de torre”.

As medidas foram efetuadas por um técnico devidamente treinado para efetuar a referida medição e o escolhido foi o “pé D”.

A seguir, mostraremos a medição efetuada no pé D de uma torre qualquer, com o eletrodo padrão de Cu/CuSO<sub>4</sub> nas distâncias pré-determinadas de 1,5 m e 2,5 m de distância do pé da torre, na direção perpendicular ao eixo da linha de transmissão, de acordo como apresentado no Item 4.1.2.1, Capítulo 4, em Procedimento de Medição.

A Fig.6.4.1, mostra o procedimento efetuado nas medições realizadas em campo:



**Fig.6.4.1 – Esquemático da medição de potencial com o eletrodo padrão de  $\text{Cu/CuSO}_4$ , utilizando o método em dois pontos**

## ANÁLISE DOS RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 7.1 RESULTADO E ANÁLISE DOS VALORES DA CORRENTE DE FUGA MEDIDA NAS FUNDAÇÕES DAS TORRES DE TRANSMISSÃO 306 e 260

Inicialmente serão discutidos os resultados das medições da corrente de fuga no Sistema de Transmissão da ELETROSUL, mais precisamente nos cabos pára-raios X e Y da LT Curitiba - Blumenau 525 kV, especificamente nas Torres 306 (distante 3 Km da SE Blumenau) e 260 (distante 12 Km da SE Blumenau).

As correntes nos cabos pára-raios X e Y foram medidas através de transformadores de corrente e resistores *shunt* monitorados por um osciloscópio onde verificamos que não existe componente de Corrente Contínua (CC) nas correntes  $I_x$  e  $I_y$  circulando nos cabos pára-raios, bem como não existe também componente CC circulante para a terra, neste caso estudado, contrariando a proposta de Burnett [12,13].

Podemos observar claramente nas formas de ondas resultantes da monitoração dos transformadores de corrente e dos resistores *shunt*, quando as formas de ondas obtidas são exatamente sobrepostas, à ausência da componente de Corrente Contínua (CC).

Associamos a ausência desta componente de CC nos cabos pára-raios devido ao baixo valor do acoplamento do campo elétrico em função das distâncias entre os cabos pára-raios e os cabos principais de energia.

Entretanto, há a circulação de uma Corrente Alternada (CA) advinda dos cabos pára-raios X e Y, onde estas correntes  $I_x$  e  $I_y$ , tem a forma de onda senoidal e há circulação de corrente para a terra neste caso estudado, confirmando os relatos de Burnett [12,13].

O módulo e o ângulo desta corrente foram obtidos analiticamente através da soma fasorial de todas as correntes existentes no nó da torre (Lei de Kirchoff), com os cabos pára-raios X e Y conectados à **pontina** da Torre, conforme ilustra a Fig. 7.1.1 [22] a seguir:

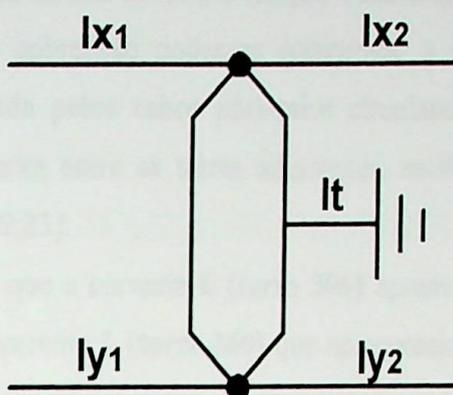


Fig.7.1.1 – Esquemático simplificado do circuito medido

Assim,

$$I_{x1} + I_{x2} + I_{y1} + I_{y2} + I_t = 0$$

A torre 306, a primeira sob ensaio, apresentou os seguintes resultados das correntes CA medidas em campo:

$$I_{x1} = 52,9 \angle 359,5^\circ \text{ A}$$

$$I_{x2} = 50,3 \angle 179,4^\circ \text{ A}$$

$$I_{y1} = 51,4 \angle 198,9^\circ \text{ A}$$

$$I_{y2} = 48,7 \angle 19,6^\circ \text{ A}$$

Portanto, o valor de  $I_t$  nesta soma fasorial para a torre 306 é:

$$I_{t(\text{Torre 306})} = -(52,9 \angle 359,5^\circ + 50,3 \angle 179,4^\circ + 51,4 \angle 198,9^\circ + 48,7 \angle 19,6^\circ) =$$

$$I_{t(\text{Torre 306})} = 0,2895 \angle 58,84^\circ \text{ A}$$

Já na torre 260, os resultados apresentados na medição das correntes CA foram os seguintes:

$$I_{x1} = 41,9 \angle 359,8^\circ \text{ A}$$

$$I_{x2} = 35,6 \angle 181,2^\circ \text{ A}$$

$$I_{y1} = 45,2 \angle 162,6^\circ \text{ A}$$

$$I_{y2} = 38,5 \angle 338,7^\circ \text{ A}$$

Portanto, o valor de  $I_t$  nesta soma fasorial para a torre 260 é:

$$I_{t(\text{Torre 260})} = -(41,9 \angle 359,8^\circ + 35,6 \angle 181,2^\circ + 45,2 \angle 162,6^\circ + 38,5 \angle 338,7^\circ) =$$

$$I_{t(\text{Torre 260})} = 1,6615 \angle 54,95^\circ \text{ A}$$

Estes dados corroboram com o modelo proposto por Burnett [12,13] para as correntes de fuga CA, cuja intensidade é função da distância (não constantes entre os vãos

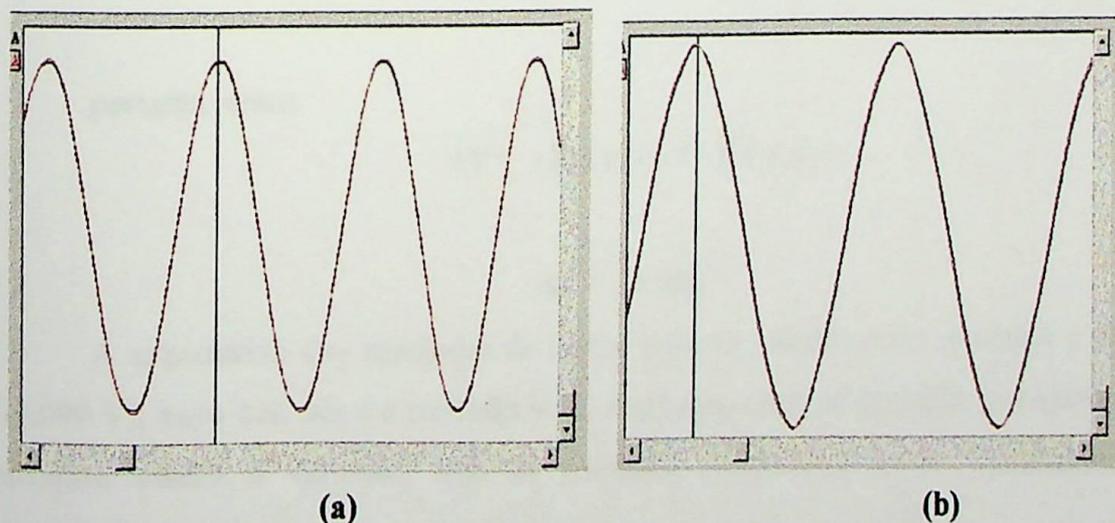
adjacentes), da localização física das torres em relação a subestação, das características do solo e outros fatores, mas sobretudo podemos comprovar a existência de valores de corrente de fuga CA advinda pelos cabos pára-raios circulando para o solo, as quais fecham seus laços de corrente entre as torres adjacentes, estabelecendo deste modo o circuito de corrente [12,13,19,23].

Podemos comprovar que a corrente  $I_t$  (torre 306) apresentou o valor de 289 mA (em módulo) em relação a corrente  $I_t$  (torre 260) que apresentou cerca de 1.660 mA (em módulo). Estes valores de correntes indicam eletroquimicamente que nestes dois casos a corrente de fuga, por apresentar um valor menor na torre 306, cerca de 5 vezes menos corrente, exerce pouca influência na ação corrosiva da fundação em grelha dimensionada e exerce uma grande influência na ação corrosiva da fundação da torre 260, devido ao valor da corrente encontrada nesta fundação.

## 7.2 ANÁLISE DA FORMA DE ONDA DA CORRENTE DE FUGA MEDIDA NAS FUNDACÕES DAS TORRES DE TRANSMISSÃO 306 e 260

A forma de onda da corrente de fuga encontrada circulando nas fundações da torres estudadas, foi a forma **senoidal** [19,22,23], de mesma frequência da fundamental – 60 Hz, mostrando neste estudo a ausência da componente contínua, contrariamente a proposta de Burnett [12,13].

A Fig.7.2.1 [22,23,24] mostra a tela do osciloscópio, o qual registrou a ilustração típica da forma de onda da corrente de fuga encontrada nas fundações das torres 306 e 260.



**Fig.7.2.1 – Ilustração típica da forma de onda da corrente de fuga; (a) na fundação da torre 306 e (b) na fundação da torre 260**

Comprovamos também que a frequência desta corrente de fuga é a mesma da corrente de transmissão do sistema elétrico ou seja 60 Hz.

### 7.3 RESULTADOS DAS MEDIÇÕES DE POTENCIAL MEDIDAS EM CAMPO NAS FUNDAÇÕES DAS TORRES DE TRANSMISSÃO DO SISTEMA ELETROSUL

Foram efetuadas medições de campo em 2.171 fundações do tipo **grelha dimensionada** das torres do sistema de transmissão da Eletrosul em 230 e 525 kV, conforme mostra a Tabela 7.3.1, onde o método de medição de potencial aplicado foi “em dois pontos” com o eletrodo de Cu/CuSO<sub>4</sub>.

Como os potenciais foram medidos em relação ao eletrodo padrão de Cu/CuSO<sub>4</sub>, os valores apresentados de  $\Delta V$  foram negativos.

Supondo que a fundação em **grelha dimensionada** esteja totalmente galvanizada, em ótimas condições, seu potencial deverá ser o potencial do Zinco (Zn) ou seja -762 mV (Tabela 2.2.1 Capítulo 2).

Já o potencial do eletrodo padrão de Cu/CuSO<sub>4</sub>, tem seu valor em + 337 mV (Tabela 2.2.1 Capítulo 2). Como estamos medindo, conforme o Item 4.1.2.1 do Capítulo 4, o resultado medido é a diferença de potencial entre a fundação e o eletrodo padrão, logo teremos:

$$\Delta V = V_{\text{ZINCO}} - V_{\text{ELETRODO PADRÃO}}$$

portanto temos:

$$\Delta V = - 762 \text{ mV} - (+ 337 \text{ mV})$$

$$\Delta V = - 1,099 \text{ V}$$

A expectativa dos resultados de campo eram de valores muito próximos a este (-1,099 V), visto que esta é a condição ideal, ainda com zinco na fundação, protegendo a estrutura contra a corrosão. Mas os resultados encontrados foram extremamente surpreendentes.

A totalidade dos resultados encontrados em campo das fundações das torres de transmissão ficaram no intervalo entre -650 mV e -300 mV, indicando conforme

recomendação do GCOI [8], estado de corrosão ativa nas fundações.

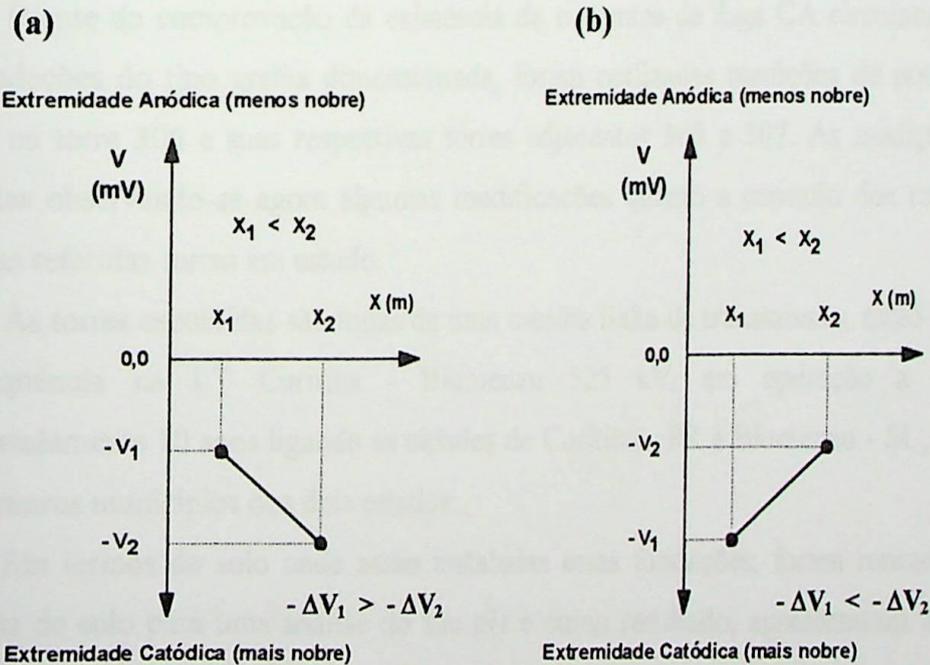
Como as medições foram realizadas “em dois pontos”, a Tabela 7.3.1 [23], mostra o quantitativo de fundações das torres medidas que apresentaram um comportamento de  $\Delta V_1$  e  $\Delta V_2$  diferenciados nas fundações [23].

**Tabela 7.3.1 –Quantidade de fundações medidas e o perfil de potencial encontrado**

| TENSÃO (kV) | No. torres                  | %     | No. torres                  | %     | Total torres medidas |
|-------------|-----------------------------|-------|-----------------------------|-------|----------------------|
|             | $-\Delta V_1 < -\Delta V_2$ | Total | $-\Delta V_1 > -\Delta V_2$ | Total |                      |
| 525         | 1.014                       | 80,1  | 251                         | 19,8  | 1.265                |
| 230         | 729                         | 80,4  | 177                         | 19,5  | 906                  |
|             | 1.743                       | 80,2  | 428                         | 19,7  | 2.171                |

De acordo com a Tabela 7.3.1, cerca de aproximadamente 80 % das fundações das torres de transmissão apresentaram o valor de potencial  $\Delta V$  de acordo com o perfil  $-\Delta V_1 < -\Delta V_2$  e menos de 20 % restante destas fundações estudadas, apresentaram-se com o potencial  $-\Delta V_1 > -\Delta V_2$  [22,23].

A Fig.7.3.1[23] mostra plotado o perfil de potencial obtido nas medições de campo.



**Fig.7.3.1 - (a) Inclinação negativa; (b) Inclinação positiva**

A curva esperada de tendência do potencial, mostrada na Fig.4.2.4 do Capítulo 4,

não se verificou em sua totalidade, conforme mostra a Fig.7.3.1, assim cerca de aproximadamente **80 % das medições** apresentaram uma **inclinação positiva (b)** (esperada de acordo com a Fig.4.2.4) e menos de **20 % das medições** apresentaram uma **inclinação negativa (a)** [23].

Para se verificar o estado de conservação das fundações e correlacionar com os resultados da inclinação, diversas fundações foram selecionadas e escavadas afim de se realizar uma pesquisa mais abrangente dos motivos destas diferenças na inclinação do potencial  $\Delta V$ .

Quando escavadas as fundações com **inclinação positiva** apresentaram corrosão vermelha e quanto mais acentuada a inclinação da curva, maior a área com corrosão na fundação em inspeção.

Já nas fundações com **inclinação negativa** foi verificado que o estado de corrosão era infinitamente inferior e, em certos casos, o processo de corrosão ainda não tinha se verificado e muitos casos apresentava traços de apassivação (esbranquiçado característico).

#### 7.4 ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA CORRENTE DE FUGA NA MEDIÇÃO DE POTENCIAL, MEDIDA EM CAMPO, NA FUNDAÇÃO DA TORRE 306

Diante da comprovação da existência de correntes de fuga CA circulando através das fundações do tipo grelha dimensionada, foram realizadas medições de potencial em campo na torre 306 e suas respectivas torres adjacentes 305 e 307. As medições foram efetuadas observando-se agora algumas modificações quanto a conexão dos cabos pára-raios nas referidas torres em estudo.

As torres escolhidas são todas de uma mesma linha de transmissão, estão instaladas em seqüência na LT Curitiba - Blumenau 525 kV, em operação a cerca de aproximadamente 10 anos ligando as cidades de Curitiba - PR à Blumenau - SC, passando por inúmeros municípios dos dois estados.

Em termos de solo onde estão instaladas estas fundações, foram retiradas várias amostras de solo para uma análise do seu pH e como resultado, apresentaram um pH na faixa de 5,5, portanto solos ácidos.

As medições de potencial foram feitas, em campo, no **pé D** das torres, com o eletrodo padrão de Cu/CuSO<sub>4</sub> nas mesmas distâncias já determinadas anteriormente, a 1,5m e 2,5m do pé da torre, na direção perpendicular, pelo método apresentado no

item 4.1.2.1 do Capítulo 4.

Na análise descrita a seguir, a linha de transmissão encontrava-se **energizada** com carregamento de aproximadamente 1.000 MW.

A Fig.7.4.1 mostra o arranjo e os resultados das medições encontradas do potencial  $\Delta V$ , no pé D das torres 305, 306 e 307, na condição em que os **cabos pára-raios direito e esquerdo estavam conectados às pontinas em ambos os lados**, nas referidas torres.

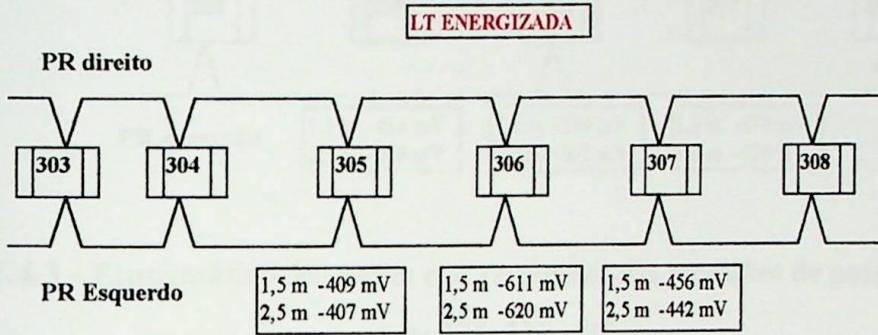


Fig.7.4.1 - Esquemático das torres e os resultados das medições de potencial nas torres 305, 306 e 307

A Fig.7.4.2 mostra o arranjo e o resultado das medições encontradas do potencial  $\Delta V$ , no pé D da torre 306, na condição do **cabo pára-raios conectado à pontina somente no Lado Direito** na referida torre, estando os demais cabos pára-raios desconectados das torres 305 e 307, conforme podemos verificar a seguir:

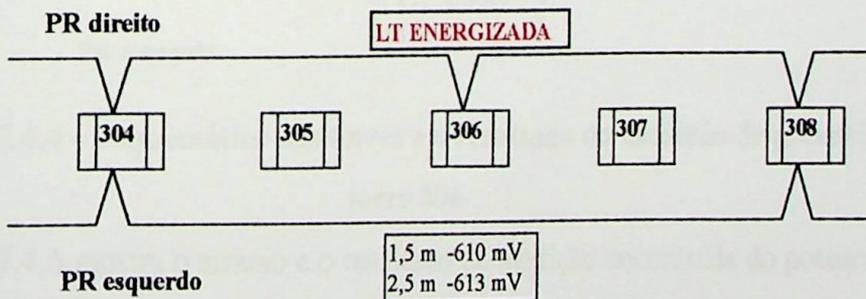
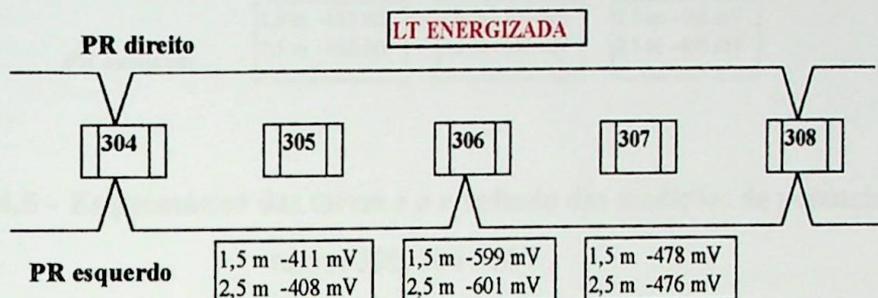


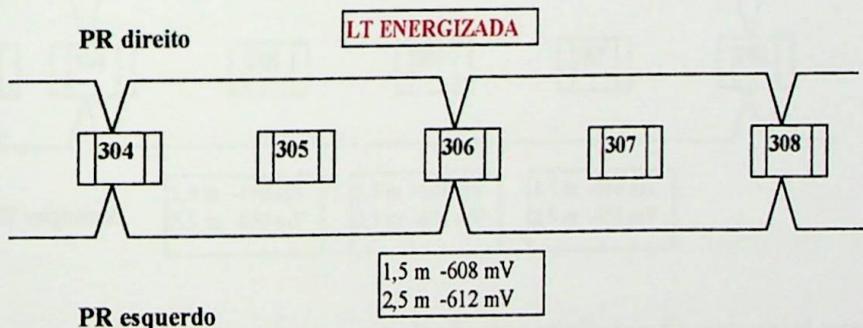
Fig.7.4.2 - Esquemático das torres e os resultados das medições de potencial na torre 306

A Fig.7.4.3 mostra o arranjo e os resultados das medições encontradas do potencial  $\Delta V$ , no pé D da torre 306, agora na condição do **cabo pára-raios conectado à pontina somente no Lado Esquerdo** na referida torre, estando os demais cabos pára-raios desconectados das torres 305 e 307.



**Fig.7.4.3 - Esquemático das torres e os resultados das medições de potencial nas torres 305, 306 e 307**

A Fig.7.4.4 mostra o arranjo e os resultados das medições encontradas do potencial  $\Delta V$ , no pé D da torre 306, na condição dos **cabo pára-raios conectados à pontina em ambos os lados, Direito e Esquerdo** na referida torre, mantendo os cabos pára-raios desconectados das torres 305 e 307.



**Fig.7.4.4 - Esquemático das torres e o resultado da medição de potencial na torre 306**

A Fig.7.4.5 mostra o arranjo e o resultado da medição encontrada do potencial  $\Delta V$ , no pé D da torre 306, na condição dos **cabos pára-raios desconectados das pontinas em ambos os lados, Direito e Esquerdo** na referida torre, mantendo os cabos pára-raios desconectados das torres 305 e 307:

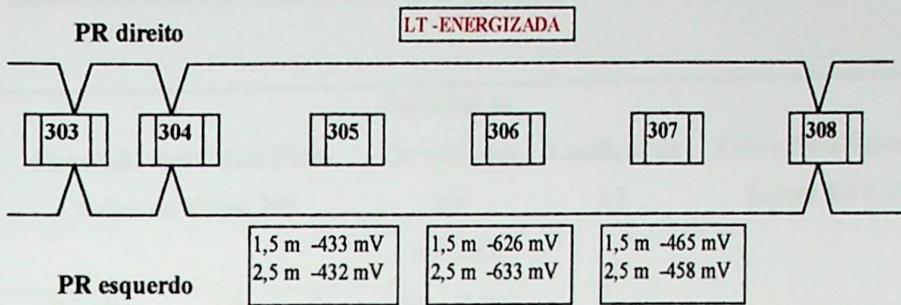


Fig.7.4.5 - Esquemático das torres e o resultado das medições de potencial nas torres 305, 306 e 307

A Fig.7.4.6 mostra o arranjo e o resultado da medição encontrada do potencial  $\Delta V$ , no pé D da torre 306, na condição dos **cabos pára-raios desconectados das pontinas em ambos os lados, Direito e Esquerdo** na referida torre, mantendo os cabos pára-raios desconectados das torres 305 e 307, porém com a **Linha Desenergizada – Aberta**:

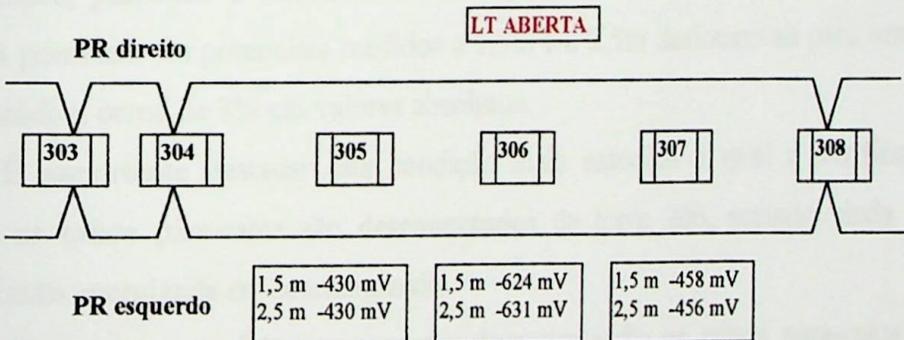


Fig.7.4.6 - Esquemático das torres e o resultado das medições de potencial nas torres 305, 306 e 307

Dos arranjos e condições mostradas nas Fig. 7.4.1 a 7.4.6, resulta na Tabela 7.4.1.

Tabela 7.4.1 – Resumos dos resultados das medições de potencial relativo à torre 306

| No. Torre | No. Figura | Condição dos Cabos Pára-Raios na Torre 306 |                     | Potencial de         |             | Condição da LT | Cabos Pára-Raios das Torres 305 e 307 |
|-----------|------------|--|---------------------|----------------------|-------------|----------------|---------------------------------------|
|           |            |  |                     | Corrosão em          |             |                |                                       |
|           |            |  |                     | mV                   |             |                |                                       |
|           |            |  |                     | Cu/CuSO <sub>4</sub> |             |                |                                       |
|           |            |  |                     | 1,5m                 | 2,5m        |                |                                       |
| 306       | 7.4.1      | Conectado                                  | Conectado           | -611                 | -620        | Energizada     | Ambos Conectados                      |
| 306       | 7.4.2      | Conectado                                  | Desconectado        | -610                 | -613        | Energizada     | Ambos Desconectados                   |
| 306       | 7.4.3      | Desconectado                               | Conectado           | -599                 | -601        | Energizada     | Ambos Desconectados                   |
| 306       | 7.4.4      | Conectado                                  | Conectado           | -608                 | -612        | Energizada     | Ambos Desconectados                   |
| 306       | 7.4.5      | <b>Desconectado</b>                        | <b>Desconectado</b> | <b>-626</b>          | <b>-633</b> | Energizada     | <b>Ambos Desconectados</b>            |
| 306       | 7.4.6      | <b>Desconectado</b>                        | <b>Desconectado</b> | <b>-624</b>          | <b>-631</b> | Desenergizada  | <b>Ambos Desconectados</b>            |

Os resultados encontrados nas medições da Tabela 7.4.1 mostram que o potencial de corrosão é alterado quando ambos os cabos pára-raios da torre 306 são desconectados da estrutura, passando à condição de cabos pára-raios isolados da torre de transmissão junto às pontinas. Os potenciais medidos a 1,5m e a 2,5m deslocam-se para uma condição mais catódica cerca de 3% em valores absolutos.

É importante destacar esta condição mais catódica a qual é verificada quando **ambos** os cabos pára-raios são **desconectados** da torre 306, estando ainda a linha de transmissão energizada ou desenergizada.

Observamos também que mesmo desconectando os cabos pára-raios das torres adjacentes ( torre 305 e 307), mas mantendo-se os cabos pára-raios conectados na torre 306, os valores de potencial não são alterados, permanecendo em uma condição mais anódica.

Estas variações nos potenciais revelam a influência da corrente de fuga CA sobre o potencial de medição, uma vez que ao desconectarmos os cabos pára-raios da torre 306 há a imediata interrupção da circulação da corrente de fuga CA através da fundação, em consequência há o deslocamento efetivo do potencial para uma condição mais catódica, portanto mais favorável sob ponto de vista eletroquímico.

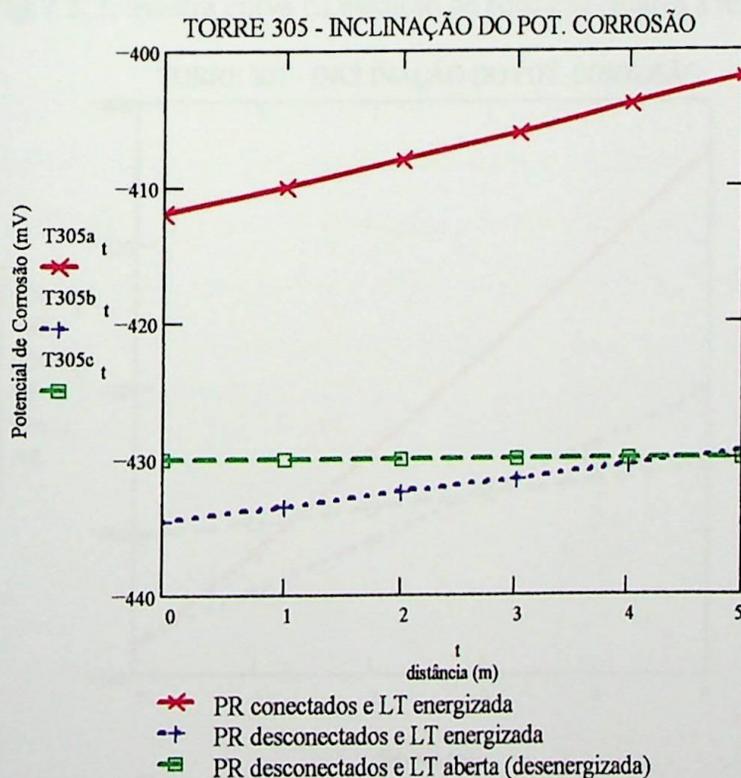
## 7.5 ANÁLISE DA INCLINAÇÃO DAS CURVAS DE MEDIÇÃO DE POTENCIAL, MEDIDAS EM CAMPO, NAS FUNDAÇÕES DAS TORRES 305, 306 e 307

A seguir mostraremos as curvas relativas às medições de potencial nas fundações das torres 305, 306 e 307, individualizadas, cuja obtenção das mesmas foi pelo método “em dois pontos” conforme o item 4.2.2 do Capítulo 4. As retas plotadas oriundas dos “dois pontos” de potencial medidos em campo foram extrapoladas para obtermos, analiticamente, o potencial de repouso destas fundações.

As curvas plotadas nas Fig.7.5.1, 7.5.2. e 7.5.3. a seguir, referem-se as torres em análise e com as seguintes condições :

- Cabos pára-raios conectados e LT energizada (Fig.7.4.1) (curva em vermelho);
- Cabos pára-raios desconectados e LT energizada (Fig.7.4.5) (curva em azul) e;
- Cabos pára-raios desconectados e LT aberta (desenergizada) (Fig.7.4.6)(curva em verde).

A Fig.7.5.1, mostra as curvas da medição de potencial relativo à fundação da torre 305.



**Fig.7.5.1 – Curvas de potencial da fundação da torre 305**

A Fig.7.5.2 mostra curvas da medição de potencial relativo à fundação da torre 306.

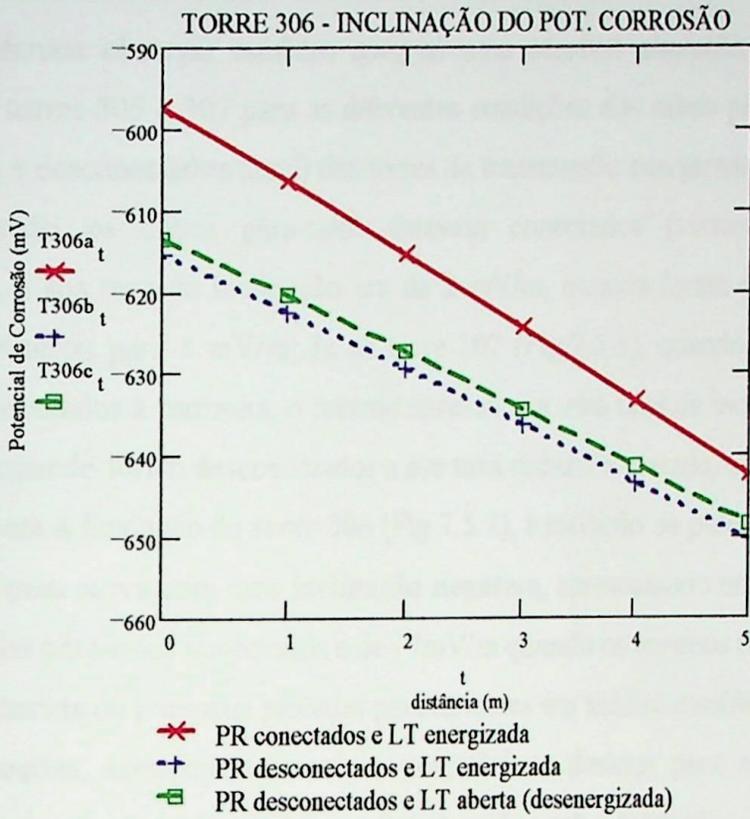


Fig.7.5.2 – Curvas de potencial da fundação da torre 306

A Fig.7.5.3, mostra curva da medição de potencial relativo à fundação da torre 307.

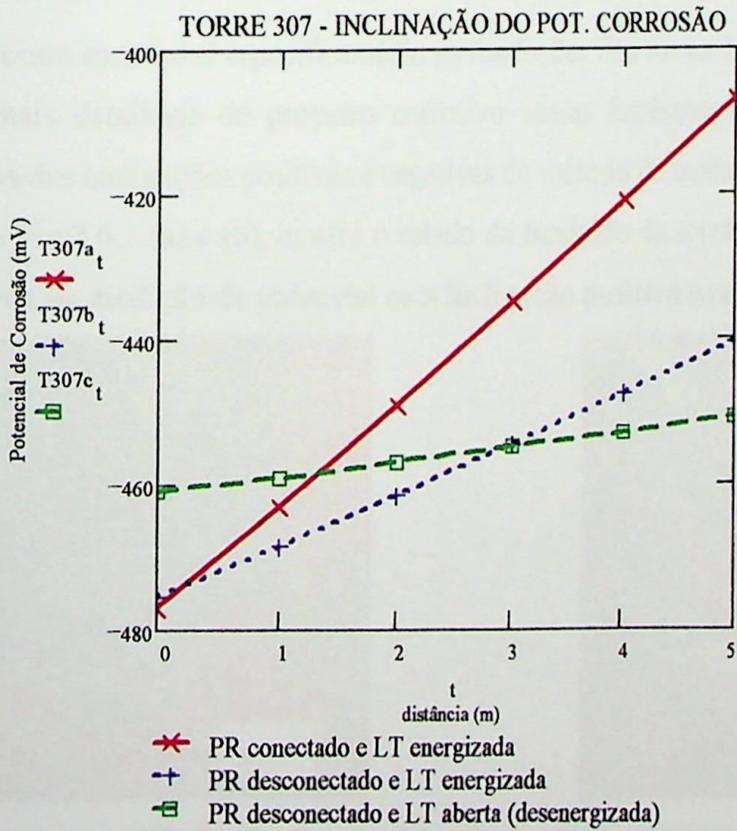


Fig.7.5.3 – Curvas de potencial da fundação da torre 307

As curvas da medição de potencial de corrosão relativo às fundações das torres 305

e 307, apresentam um comportamento de  $\Delta V_1$  e  $\Delta V_2$  com uma inclinação positiva.

Podemos observar também que, há uma sensível alteração na declividade das curvas nas torres 305 e 307 para as diferentes condições dos cabos pára-raios, conectados (vermelho) e desconectados (azul) das torres de transmissão energizadas sob ensaio.

Quando os cabos pára-raios estavam conectados (vermelho) na torre 305 (Fig.7.5.1), a sua taxa de inclinação era de 2 mV/m, quando foram desconectados (azul) este valor alterou para 1 mV/m. Já na torre 307 (Fig.7.5.3), quando os cabos pára-raios estavam conectados à estrutura, o mesmo apresentava uma taxa de inclinação da ordem de 14 mV/m, quando foram desconectados a sua taxa reduziu a metade, ou seja, 7 mV/m.

Já para a fundação da torre 306 (Fig.7.5.2), a medição de potencial desta fundação, apresentou uma curva com uma **inclinação negativa**, apresentando uma taxa de  $-9$  mV/m com os cabos pára-raios conectados e de  $-7$  mV/m quando os mesmos foram isolados.

As curvas de potencial plotadas para as torres em análise mostram que, ao alterarem suas inclinações, conseqüentemente, o potencial se desloca para a extremidade mais catódica, portanto proporcionando um efeito benéfico sob a fundação.

## 7.6 INSPEÇÃO DAS FUNDACÕES DAS TORRES 305, 306 e 307 [14,23,24]

Foram escavadas especificamente as fundações das torres 305, 306 e 307 para uma análise mais detalhada do processo corrosivo nestas fundações e compará-las com os resultados das inclinações positivas e negativas do método de medição “em dois pontos”.

A Fig.7.6.1 (a) e (b), mostra o estado da fundação da torre 305, a qual apresenta uma curva de medição de potencial com inclinação positiva e taxa de 2mV/m.



**Fig.7.6.1 – Estado físico da fundação da torre 305**

A Fig.7.6.2 (a) e (b), mostra o estado da fundação da torre 307, a qual, também, apresenta uma curva de medição de potencial com inclinação positiva porém a sua taxa é de  $14\text{mV/m}$ .



Fig.7.6.2 – Estado físico da fundação da torre 307

A taxa de inclinação da curva de potencial medida para a torre 307 ( $14\text{ mV/m}$ ) é maior que a taxa na torre 305 ( $2\text{mV/m}$ ), quando inspecionadas visualmente as fundações citadas, verificamos que o estado da fundação da torre 307 apresentava-se  **muito mais anódica** do que a fundação da torre 305.

Já a Fig.7.6.3 (a) e (b), mostra o estado da fundação da torre 306, a qual apresenta uma curva de medição de potencial com inclinação negativa, e taxa de  $-9\text{mV/m}$ .

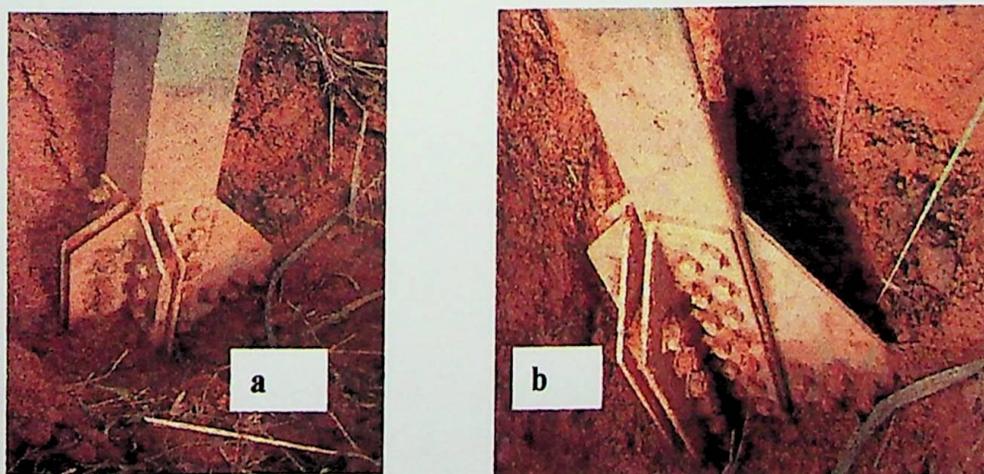


Fig.7.6.3 – Estado físico da fundação da torre 306

As escavações comprovam que a **inclinação positiva** indicado pelo método “em



dois pontos” do potencial de medição, está associada a um **estágio anódico** da fundação e a **inclinação negativa** está associada a um **estágio catódico** da fundação, onde o próprio estado das ferragens inspecionadas revelaram esta condição aqui proposta [14,23,24].

## CONCLUSÕES

- O modelo proposto por Burnett [12,13] referente à circulação das correntes  $I_x$  e  $I_y$  nos cabos pára-raios de qualquer linha de transmissão, originadas pela indução dos campos eletromagnéticos provenientes dos condutores do circuito principal de corrente, foi comprovado e as correntes elétricas foram medidas em campo, junto as torres 306 e 260 da LT Curitiba – Blumenau - 525 kV, onde verificamos que há componente de corrente elétrica de circulação -  $I_{\text{circ.comp.}}$  e a componente de corrente elétrica de retorno por terra -  $I_{\text{g.r.c.}}$ , obtidas com seus valores em módulo e ângulo respectivamente;
- A componente de retorno por terra -  $I_{\text{g.r.c.}}$ , tem sua frequência idêntica a frequência da fundamental – 60 Hz –, tendo esta corrente um caráter eletrolítico para as fundações das torres de transmissão, a qual foi denominada de **corrente de fuga**, sendo ela uma componente atuante no processo anódico (corrosão) das fundações nas bases destas torres de transmissão;
- A corrente referente a **componente de circulação** -  $I_{\text{circ.comp.}}$ , a qual circula na parte superior das torres em circuito fechado (espira superior) entre as ferragens superiores das torres de transmissão e os cabos pára-raios X e Y, podendo a mesma atingir valores expressivos de corrente, cerca de 50 a 60 A de acordo com as medições efetuadas em campo [14,19]. Já os valores da **componente de retorno por terra** -  $I_{\text{g.r.c.}}$  circulam para o solo e podem oscilar num intervalo entre **mA** até **A** [14,19];
- Das 2.171 fundações das torres do sistema de transmissão da Eletrosul medidas, aproximadamente **80%**, ou seja, cerca de 1.743 fundações **encontram-se em processo anódico** e os **20%** restantes, ou seja, cerca de 428 fundações **encontram-se em processo catódico** de acordo com o método de análise “em dois pontos”. Foram devidamente comprovados através de escavações para uma inspeção visual de seu estado físico. Este percentual se aplica nas fundações das torres de transmissão tanto para 230 kV como para 525 kV, pois nestes níveis de tensão de transmissão, há a presença de campos eletromagnéticos induzidos responsáveis pela origem da **corrente de fuga** circulante para o solo;

- Das fundações inspecionadas por escavação, **todas as fundações com inclinação positiva** indicadas em suas curvas de medição de potencial, **apresentaram sua fundação em processos anódicos (corrosão vermelha)**, ao passo que **todas as fundações com inclinação negativa** indicada em suas curvas de medição de potencial, **apresentaram sua fundação em processo catódico ou em estado de apassivação** (esbraquiçado característico);
- Verifica-se que, com a simples desconexão dos cabos pára-raios das pontinas da torre de transmissão, há o deslocamento do valor, em módulo, da medição do potencial de corrosão para um valor mais catódico, portanto mais favorável sob ponto de vista eletroquímico.

## RECOMENDAÇÕES E SUGESTÕES

- Sugerimos a utilização do método “em dois pontos”, onde a curva deverá ser obtida através de medições de potencial com mais pontos, preferencialmente, mais de cinco pontos medidos em campo, perpendicularmente ao eixo da torre, de modo a obtermos com mais acuracidade a inclinação da curva de potencial de corrosão;
- Recomenda-se a medição dos valores da corrente e potencial CA nas fundações, verificando-se o nível do sinal CA encontrado nas estruturas uma vez que, estes sinais CA de baixa frequência (60Hz) são responsáveis pela aceleração do processo anódico nas fundações em grelha dimensionada;
- Recomenda-se a isolação dos cabos pára-raios das torres de transmissão, através da utilização de isoladores de vidro temperado devidamente adaptados, de modo a isolar as correntes de fuga CA da circulação para a terra, correntes estas que somadas as características físico-químicas dos solos colaboram para com o processo anódico das fundações tipo grelha dimensionada;
- As adaptações para a inclusão dos isoladores, levam em conta que os atuais arranjos das ferragens montadas nas pontinas das torres para a fixação dos cabos pára-raios podem ser facilmente re-arranjadas e, inicialmente, os custos para esta isolação dos cabos pára-raios estariam estimados em R\$ 70,00 em materiais e de R\$ 50,00 em H/h para a instalação modificação em campo, num total de R\$ 120,00 por torre;
- Recomenda-se no caso de utilização de Proteção Catódica por Corrente Impressa (PC) ou somente Proteção Catódica (anodos de sacrifício de magnésio, zinco, outros) o isolamento imediato dos sinais CA circulantes para o solo nestas fundações protegidas, uma vez que os mesmos exercerão um processo anódico quando a excursão dos sinais CA ultrapassarem os valores da Proteção Catódica .

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

---

1. **EVA RAIMANN CABRAL e WALTER ARNO MANNHEIMER.** Galvanização sua Aplicação em Equipamento Elétrico, Princípios e Processos, Normalização e Controle de Qualidade, Aplicação e Situação no Brasil – CEPEL – Centro de Pesquisas de Energia Elétrica. Ao Livro Técnico S/A, Rio de Janeiro, pg. 7-37, 57-89 1979;
2. **ALBERTO PAULO RIBBE, ALEXANDRE G. FOLDES, ARNALDO CORRÊA, CÉLIO HUGENNEYER, PLETER BAUER, FRIEDRICH REUSS, HERBERT LICHTENFELD, GERALDO AGOSTI, JOSÉ DIAS FERREIRA, LUDWIG RUDOLF SPIER, ROLF HERBERT ETT e WERNER GRUNDIG.** Corrosão e Tratamentos Superficiais dos Metais, Edição da Associação Brasileira de Metais, pg. 13, 22-24, 83-87, 1964;
3. **ALDO CORDEIRO DUTRA e LAERCE DE PAULA NUNES.** Proteção Catódica – Técnica de Combate à Corrosão. Editora Técnica Ltda, Rio de Janeiro, pg. 2-26, 126-136, 1987;
4. **DENIOL K. TANAKA, CÉLIO FENILI, FRANCISCO DI GIORGI, GODOFREDO E. WINNISCHOFER, JOSÉ CARLOS OLIVIERI, MUNIR JOSÉ, RISOMA CHAVES, STEPHAN WOLYNEC e ZEBHOUR PANOSSIAN.** Corrosão e Proteção Contra Corrosão de Metais, IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, pg. 3-5, 8-21, 36-38, 52-58, 165-171, 1981;
5. **VICENTE GENTIL.** Corrosão, Segunda Edição – Guanabara Dois, pg. 1-7, 21-44, 163-181, 1987;
6. **HERBERT H. UHLIG.** Corrosion Y Control de Corrosion, Traducido por Eduardo Aguilar, URMO, S.A. de Ediciones, Bilbao, pg. 47-67, 175-192, 201-215, 1975;
7. **VOLKMAR ETT.** Carta de Recomendações Práticas, VE/hh. D.035/94;
8. **GCOI – GRUPO COORDENADOR PARA A OPERAÇÃO INTERLIGADA.** Técnica de Medição de Potencial de Corrosão em Estruturas Metálicas Enterradas – Subcomitê de Manutenção – SCM 104; pg.1-15, Aprovação 57º R.O. SCM - Novembro 94.

9. **RAMÓN S. CORTÉS PAREDES.** Proposta de TESE, Desenvolvimento da Tecnologia de Aspersão Térmica com Alumínio para Proteção Contra Corrosão, UFSC Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, pg. 1-16, 1996;
10. **HERBERT H. UHLIG, PH.D.** Corrosion Handbook, John Wiley & Sons, Inc, New York, pg. 923-950, 1958;
11. **E. GARCÍA, J. M. MALO and J. URUCHURTU.** Corrosion Monitoring of Electric Transmission Line Tower Legs by Electrochemical Methods. Go to On-line Conferencing Forum, 1996;
12. **L. E. BURNETT, B. RAMRATNAM, J. W. CARTWRIGHT and V. CALECA.** Safety Considerations of Joints in Towers Utilizing Corrosion Resistant Alloy Steels. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-97, No. 5, Sep/Oct 1978;
13. **DALE E. HEDMAN and HENRY C. SAMPERS.** 345 kV Line 60-Hz Ground Wire Losses. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-87, No.2, February 1968;
14. **F. R. WOJCICKI, M. E. M. NEGRISOLI e C. V. FRANCO.** Corrosion Analysis and The Stray Current Influence from Overhead Grounded Cable in Power Tranmissions Lines in Steel Structure Foundation. 3<sup>rd</sup> Latin American Region Corrosion Congress and 6<sup>o</sup> Congreso Iberoamericano de Corrosión y Protección - Latincorr 98, México, Cancun, 1998;
15. **R. L. RUEDISUELI, H. E. HAGER and C. J. SANDWITH.** An Aplication of a State-of-the-Art Corrosion Measurement System to a Study of the effects of Alternating Current on Corrosion. NACE- National Association os Corrosion Engineers, Vol.43, No. 6, June 1987;
16. **D. A. JONES.** Effect of Alternating Current on Corrosion of Low Alloy and Carbon Steels. NACE – National Association of Corrosion Engineers, Vol. 34, No. 12, December 1978;
17. **D. A. JONES and B. E. WILDE.** Effect of Alternating Current on the Atmospheric Corrosion of Low-Alloy Weathering Steel in Bolted Lap Joints. NACE – National Associations of Corrosion Engineers, Vol.43, No. 2, February 1987;

18. **DAISY S. F. GOMES, FERNANDO FERRO MACEDO e SÔNIA DE MIRANDA GUILLIOD.** Aterramento e Proteção Contra Sobretensões em Sistemas Aéreos de Distribuição. Coleção Distribuição de Energia Elétrica, ELETROBRÁS. Editora Universitária, Niterói – RJ, pg.143-178, 323-327, 1990;
19. **F. R. WOJCICKI, HAMILTON L. SELL e RENIEIRI P. SALAI.** Método de Ensaio para a Determinação das Grandezas Elétricas Envolvidas no Processo de Corrosão Galvânica em Torres de Transmissão. XV SNTPEE – XV Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica – 1999, Foz do Iguaçu – PR;
20. **MANOEL E. M. NEGRISOLI.** Corrosão em Sistemas de Aterramento. Apostila do Curso de Corrosão - Núcleo Tecnologia, 1986, Itajubá – MG;
21. **PHILIPPE CARPENTIER and ANTOINE POURBAIX.** Detection and Assessment of AC Induced Corrosion, 14<sup>th</sup> ICC - International Corrosion Congress, 26<sup>th</sup> September to 1 October 1999, Cape Town, South Africa;
22. **HAMILTON SELL, RENIERI P. SALAI, ADOLAR W e ADENILSON AURINO LAPA.** Relatório de Viagem Eletrosul DOLT-010/99. Execução de Medições Elétricas nas Torres de 525 kV da LT 8300 Curitiba- Blumenau, 01/03 a 04/03/99;
23. **F. R. WOJCICKI, CÉSAR VITORIO FRANCO, MANOEL E. M. NEGRISOLI e VALNER BRUSAMARELLO.** The Influence of Interference Currents from Lightning-Rod Cables of Grid Steel Power Lines on the Corrosion Process of Tower Foundations, 14<sup>th</sup> ICC - International Corrosion Congress, 26<sup>th</sup> September to 1 October 1999, Cape Town, South Africa;
24. **F. R. WOJCICKI, MANOEL E. M. NEGRISOLI, CÉSAR VITORIO FRANCO e VALNER BRUSAMARELLO.** Análise da Corrosão e a Influência da Corrente de Fuga Advinda dos Cabos Pára-Raios nas Fundações das Linhas de Transmissão que Utilizam Grelha Dimensionada. 2º Seminário Nacional de Manutenção do Setor Elétrico - 2º SEMASE , Grupo III – Manutenção de Linhas de Transmissão. 09 a 13/11/99, Curitiba – PR.