

## Prefácio

Para mim foi uma honra muito grande receber o convite do amigo Dr. Eduardo Torres Serra, para prefaciá-lo seu importante livro sobre o tema de corrosão pelo solo. Conheci o Dr. Eduardo quando ele iniciava o curso de mestrado na COPPE e depois, como colega de trabalho no Centro de Pesquisas de Energia Elétrica – CEPEL, mantendo estreita convivência, onde militamos na área de materiais, na qual estava inserido o segmento relativo à corrosão e à proteção anticorrosiva. Desde muito cedo ele preocupava-se com o estudo da corrosão pelo solo, realizando análise das suas propriedades, ensaios eletroquímicos de avaliação de sua agressividade, dentre outros estudos. Agora ele traz a público, sob a forma de uma obra bem estruturada, a essência da sua experiência no campo da corrosão em geral e de corrosão pelo solo, em particular. Ele trata da proteção anticorrosiva e da pesquisa associada, tendo como área de aplicação prioritária a proteção de estruturas metálicas enterradas, e são muitas, no setor elétrico brasileiro.

Trata-se de um livro bem ilustrado e bem fundamentado, especialmente nos aspectos relacionados com os princípios da corrosão, com destaque para a corrosão eletroquímica, onde expõe os mecanismos que embasam os processos corrosivos predominantes que afetam as estruturas metálicas enterradas, incluindo os métodos de proteção mais largamente adotados.

Por oportuno, vale lembrar que o solo é um dos três mais importantes meios corrosivos do planeta. Certamente o principal é a atmosfera, seguida do meio aquoso, com destaque para

a corrosão pela água do mar e, finalmente o outro grande meio corrosivo é o solo. E sobre este tema, tanto quanto sei, são muito poucos os livros existentes no mundo, quase esquecido como um importante meio corrosivo. Fala-se muito de corrosão pelo solo, mas muito pouca gente cuida do estudo das suas características e propriedades como um enorme meio corrosivo.

Lembro-me muito bem da consulta feita frequentemente à monografia de autoria de Melvin Romanoff, publicada em 1957 pelo então National Bureau of Standards (NBS) – hoje NIST – sob a forma de uma circular – Circular 579, intitulada Underground Corrosion. Também consultávamos muito a monografia de autoria de Th. Rosenqvist, publicada em 1961, pelo Instituto Geotécnico Norueguês, sob o título Subsoil Corrosion of Steel. E fora isto, o estudo do assunto se fazia por meio de artigos publicados em revistas técnicas e em anais de congressos. Além disso, a corrosão pelo solo era tratada em capítulos de livros especializados em corrosão, a exemplo do Corrosion Handbook, editado pelo Prof. H. H. Uhlig, do MIT. Nos congressos americanos promovidos pela NACE há sempre uma sessão dedicada ao tema Underground Corrosion, onde os assuntos tratados são relacionados mais a problemas de proteção catódica do que mesmo ao estudo do meio agressivo (solo).

Daí a grande importância de se dispor, em língua portuguesa, de um livro tratando da corrosão pelo solo, escrito por quem trabalhou muito neste assunto e estudou muito suas implicações. Assim, a comunidade de corrosionistas, os centros de pesquisa e desenvolvimento que tratam da corrosão, bem como as instituições de ensino, poderão beneficiar-se desta excelente obra.

Rio de Janeiro, junho de 2006

**Aldo Cordeiro Dutra**

Presidente do Conselho Deliberativo da ABRACO

# Índice

Agradecimentos .....	VII
Prefácio da Edição Revisada .....	IX
Prefácio .....	XI
CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO .....	1
1.1 Definição da Corrosão .....	1
1.2 Importância Econômica da Corrosão .....	3
1.3 Análise Econômica da Corrosão .....	11
1.4 Referências .....	17
CAPÍTULO 2 FUNDAMENTOS DO FENÔMENO DE CORROSÃO .....	19
2.1 Natureza Eletroquímica da Corrosão .....	19
2.2 Células Eletroquímicas .....	24
2.3 Eletrodos e Potenciais de Eletrodo .....	29
2.4 Termodinâmica do Processo de Corrosão .....	37
2.5 Velocidade de Corrosão .....	43
2.6 Referências .....	55
CAPÍTULO 3 CORROSÃO PELO SOLO .....	57
3.1 Definição e Descrição .....	57
3.2 Fatores que Afetam a Agressividade dos Solos ...	58
3.3 Referências .....	76
CAPÍTULO 4 CARACTERÍSTICAS DOS SOLOS .....	79
4.1 Propriedades Químicas .....	81
4.2 Propriedades Físicas .....	82

4.3	Ensaio para Caracterização das Propriedades dos Solos .....	83
4.3.1	Determinação do Teor de Umidade.....	83
4.3.2	Determinação da Capacidade de Retenção ou de Absorção de Água.....	84
4.3.3	Determinação da Resistividade Elétrica do Solo .....	85
4.3.4	Determinação do Valor da Resistividade Mínima do Solo.....	90
4.3.5	Determinação do pH do Solo.....	92
4.3.6	Determinação do Potencial de Eletrodo de Estruturas no Solo.....	94
4.3.7	Preparação do Extrato Aquoso do Solo .....	96
4.3.8	Determinação da Acidez e da Alcalinidade do Solo .....	97
4.3.9	Determinação da Concentração de Carbonatos no Solo .....	102
4.3.10	Determinação da Concentração de Bicarbonato no Solo.....	103
4.3.11	Determinação da Concentração de Íons Cloreto no Solo .....	104
4.3.12	Determinação da Concentração de Íons Sulfato no Extrato Aquoso do Solo.....	104
4.3.13	Determinação da Concentração de Íons de Cálcio, Magnésio, Sódio e Potássio no Extrato Aquoso do Solo.....	104
4.3.14	Determinação do Potencial Redox do Solo ..	105
4.4	Referências .....	109
CAPÍTULO 5 AVALIAÇÃO DA AGRESSIVIDADE DOS SOLOS .....		
		111
5.1	Critérios Baseados nas Propriedades dos Solos ..	111
5.2	Critérios Baseados em Métodos Eletroquímicos..	117

5.2.1	Método de Resistência de Polarização.....	119
5.2.2	Método dos Três Pontos .....	120
5.2.3	Método dos Dois Eletrodos .....	120
5.2.4	Método da Extrapolação das Tangentes de Tafel.....	121
5.2.5	Método de Impedância Eletroquímica.....	124
5.2.6	Técnica de Ruído Eletroquímico .....	128
5.2.7	Técnica de Injeção de Corrente.....	129
5.3	Referências .....	130
CAPÍTULO 6 REVESTIMENTOS PROTETORES .....		133
6.1	Revestimentos Anticorrosivos para Estruturas Isoladas de Pequeno Porte e para Armazenagem ou Transporte de Fluidos Não perigosos.....	134
6.1.1	Revestimentos Metálicos .....	134
6.1.2	Revestimentos Orgânicos .....	141
6.2	Revestimentos Orgânicos para Estruturas de Grande Porte ou para Armazenagem ou Transporte de Fluidos Perigosos.....	143
6.3	Referências .....	152
CAPÍTULO 7 PROTEÇÃO CATÓDICA.....		155
7.1	Sistemas de Proteção Catódica.....	155
7.2	Fundamentos da Proteção Catódica .....	160
7.2.1	Proteção Catódica por Corrente Impressa.....	161
7.2.2	Proteção por Anodos de Sacrificio.....	163
7.3	Critérios de Proteção Catódica.....	165
7.4	Proteção Catódica com Base em Critério Eletroquímico .....	168
7.5	Projeto de Sistemas de Proteção Catódica.....	170
7.6	Referências .....	172
ANEXO 1 SISTEMA INTERNACIONAL DE UNIDADES ...		173

ANEXO 2	FATORES DE CONVERSÃO.....	175
ANEXO 3	RELAÇÃO ENTRE ALGUMAS UNIDADES UTILIZADAS PARA INDICAÇÃO DE TAXAS DE CORROSÃO.....	177
ANEXO 4	MASSA ESPECÍFICA E EQUIVALENTE ELETROQUÍMICO DE METAIS E LIGAS DE USO CORRENTE EM ENGENHARIA .....	179
ANEXO 5	FATORES DE MULTIPLICAÇÃO.....	181

### Índice de Figuras

Figura 1.1	Ciclo esquemático da produção e deterioração do aço.....	2
Figura 1.2	Fatores que definem a seleção de um material .	9
Figura 1.3	Fatores que influenciam a resistência à corrosão dos metais e ligas metálicas .....	9
Figura 2.1	Representação esquemática da corrosão (oxidação) do zinco em ácido clorídrico, na ausência de oxigênio .....	20
Figura 2.2	Representação esquemática da corrosão do ferro em solução aerada de ácido clorídrico .	22
Figura 2.3	Representação esquemática da corrosão do ferro em solução neutra de cloreto de sódio aerado .....	22
Figura 2.4	Representação esquemática da corrosão do ferro e deposição de cobre metálico a partir de uma solução de sulfato de cobre.....	23
Figura 2.5	Representação esquemática de uma célula de corrosão de eletrodos diferentes, constituídos por metais dissimilares .....	24

Figura 2.6	Representação esquemática das células de ação local na superfície metálica.....	25
Figura 2.7	Representação esquemática de uma célula de concentração iônica.....	26
Figura 2.8	Representação esquemática de uma célula de aeração diferencial.....	27
Figura 2.9	Representação esquemática de situações práticas nas quais observa-se a ocorrência de células de aeração diferencial. a) superposição de chapas; b) formação de depósitos sobre superfícies metálicas; c) diferença de aeração na região próxima a interface atmosfera/meio líquido em uma estaca submersa.....	28
Figura 2.10	Representação esquemática do eletrodo padrão de hidrogênio.....	30
Figura 2.11	Determinação do potencial de eletrodo de um metal.....	31
Figura 2.12	Determinação do potencial padrão de uma reação de oxirredução.....	32
Figura 2.13	Diagrama E-pH da água a 25 °C e a 1 atm de pressão.....	38
Figura 2.14	Diagrama E-pH esquemático do sistema Fe-H <sub>2</sub> O, a 25 °C, 1 atm de pressão e concentração de Fe <sup>2+</sup> igual a 10 <sup>-6</sup> íons/l.....	40
Figura 2.15	Diagrama E-pH esquemático do sistema Cu-H <sub>2</sub> O, a 25 °C, 1 atm de pressão e concentração de Cu <sup>2+</sup> igual a 10 <sup>-6</sup> íons/l....	42
Figura 2.16	Célula eletroquímica formada por um eletrodo de zinco e o eletrodo padrão de hidrogênio.....	45
Figura 2.17	Diagrama de Evans para a célula Pt; H <sub>2</sub>  H <sup>+</sup>   Zn <sup>2+</sup>  Zn.....	46

Figura 2.18	Curvas de polarização de eletrodos sujeitos à polarização por ativação .....	48
Figura 2.19	Diagrama esquemático dos gradientes de concentração durante a redução do oxigênio .	49
Figura 2.20	Polarização por concentração em uma reação catódica.....	50
Figura 2.21	Combinação de polarização por ativação e por concentração .....	51
Figura 2.22	Curva de polarização anódica, característica de um metal que apresente passividade ....	52
Figura 2.23	Representação das reações na dissolução do zinco em solução diluída de ácido clorídrico.....	53
Figura 2.24	Corrosão do metal M, controlada por difusão catódica.....	54
Figura 2.25	Comportamento de um metal M, com transição ativa-passiva em função da polarização catódica.....	54
Figura 3.1	Pilha de longo alcance devido a diferentes composições químicas do solo.....	59
Figura 3.2	Formação de uma pilha de concentração devido a solos com texturas diferentes .....	59
Figura 3.3	Desenho esquemático de uma fundação de torre de transmissão com emprego de hastes de ancoragem .....	60
Figura 3.4	Aspecto de uma haste de ancoragem com corrosão acentuada na interface concreto/solo.....	61
Figura 3.5	Pilha (célula) galvânica formada pela ligação de metais dissimilares em contato com o solo .	62
Figura 3.6	Corrosão galvânica do aço galvanizado de fundações de torres de transmissão devido ao aterramento com cobre .....	62



Figura 3.7	Corrosão galvânica em fundação em grelha de torre de transmissão causada pelo aterramento com cobre .....	63
Figura 3.8	Corrosão eletrolítica causada por correntes de fuga originadas de sistemas de proteção catódica interferentes .....	64
Figura 3.9	Eliminação da corrosão eletrolítica em estruturas enterradas .....	65
Figura 3.10	Efeito da densidade de corrente alternada na corrosão do alumínio.....	66
Figura 3.11	Efeito da densidade de corrente alternada na corrosão do cobre.....	67
Figura 3.12	Efeito da corrente alternada no processo de corrosão do aço galvanizado em uma solução de $\text{Na}_2\text{SO}_4$ 0,5N .....	68
Figura 3.13	Efeito do grau de aeração do solo na profundidade de pite no aço .....	73
Figura 4.1	Classificação do solo de acordo com percentagem das partículas presentes.....	81
Figura 4.2	Montagem esquemática do método de Wenner (Quatro Pontos) para determinação da resistividade elétrica do solo.....	86
Figura 4.3	Ilustração da medida da resistividade elétrica do solo, em campo, pelo método dos quatro pontos .....	87
Figura 4.4	Montagem esquemática do ensaio para determinação da resistividade elétrica de amostras de solo, utilizando uma caixa de solo.....	88
Figura 4.5	Vista da montagem experimental para determinação da resistividade utilizando-se uma caixa de solo .....	89

Figura 4.6	Variação da resistividade elétrica em função do teor de água presente no solo.....	92
Figura 4.7	Dispositivo esquemático de fixação dos eletrodos para medições de pH em campo ....	93
Figura 4.8	Determinação do pH de uma amostra de solo, utilizando-se uma mistura de solo e água destilada em partes iguais.....	94
Figura 4.9	Desenho construtivo esquemático de um eletrodo de Cu/CuSO <sub>4</sub> .....	95
Figura 4.10	Procedimento de medida do potencial de eletrodo de uma estrutura enterrada.....	95
Figura 4.11	Medição de potencial de eletrodo em campo .	96
Figura 4.12	Desenho construtivo esquemático do dispositivo para determinação do potencial redox dos solos .....	106
Figura 4.13	Medida de potencial redox em campo.....	108
Figura 5.1	Taxa de corrosão do aço em solos ácidos ou alcalinos.....	114
Figura 5.2	Célula de aeração diferencial de Denison ....	115
Figura 5.3	Curvas de polarização para: a) ferro fundido e b) aço inoxidável .....	117
Figura 5.4	Curva típica de sobretensão <i>versus</i> corrente em um ensaio de resistência de polarização .	119
Figura 5.5	Determinação da corrente de corrosão por extrapolação das tangentes de Tafel.....	122
Figura 5.6	Evolução da taxa de corrosão do aço galvanizado em quatro tipos de solo.....	123
Figura 5.7	Circuito eletroquímico equivalente .....	124
Figura 5.8	Diagrama esquemático de Nyquist para o circuito equivalente apresentado na figura 5.7.	125

Figura 5.9	Evolução do potencial de eletrodo e do diagrama de impedância do aço galvanizado em contato com amostra de solo (frequências em Hz) .....	126
Figura 5.10	Diagrama de impedância do aço galvanizado previamente corroído, em contato com amostra de solo (frequências em Hz).....	128
Figura 6.1	Tempo de perfuração de condutos fabricados com chapas de aço galvanizado, em contato com o solo.....	137
Figura 6.2	Fundação de torres de transmissão de energia elétrica com perfis de aço galvanizado e proteção suplementar por pintura .....	138
Figura 6.3	Aspecto superficial típico de esfoliação em perfil de aço submetido à sobregalvanização.	139
Figura 6.4	Corte transversal de um perfil de aço galvanizado apresentando esfoliação do revestimento metálico (microscopia ótica, aumento 200 X) .....	140
Figura 6.5	Corte transversal de um perfil de aço galvanizado apresentando tendência à esfoliação do revestimento metálico (microscopia eletrônica de varredura) .....	140
Figura 7.1	Representação esquemática de um sistema de proteção catódica por anodos de sacrifício.	156
Figura 7.2	Representação esquemática de um sistema de proteção catódica por corrente impressa..	158
Figura 7.3	Processo de corrosão generalizada em uma estrutura de aço enterrada.....	160

Figura 7.4	Representação esquemática das reações eletroquímicas .....	161
Figura 7.5	Representação esquemática da proteção catódica por corrente impressa .....	162
Figura 7.6	Representação esquemática das reações eletroquímicas em um sistema de proteção catódica com anodos de sacrifício.....	164

### Índice de Tabelas

Tabela 1.1	Elementos do custo da corrosão.....	5
Tabela 1.2	Custo da corrosão em alguns países .....	6
Tabela 1.3	Parâmetros para a análise econômica .....	15
Tabela 2.1	Eletrodos de referência mais utilizados .....	32
Tabela 2.2	Série eletroquímica .....	33
Tabela 2.3	Série galvânica de metais e ligas metálicas em água do mar .....	36
Tabela 3.1	Comparação entre as propriedades físico-químicas e a corrosividade .....	70
Tabela 3.2	Relação entre acidez total do solo e o índice de reparos.....	71
Tabela 3.3	Corrosividade relativa em função das propriedades físico-químicas e de resistividade.	72
Tabela 3.4	Micro-organismos e suas características .....	75
Tabela 4.1	Classificação das partículas do solo .....	80
Tabela 4.2	Possibilidade de corrosão microbiológica em função do potencial redox .....	108
Tabela 5.1	Critério de agressividade do solo, segundo Gotlieb e Vieira (aço baixo carbono e ferro fundido) .....	112
Tabela 5.2	Critério de agressividade do solo, segundo Both <i>et alii</i> .....	112

Tabela 5.3	Critério de agressividade do solo, segundo Girard.....	113
Tabela 5.4	Agressividade do solo em função da resistividade e do potencial de eletrodo do aço, segundo o NBS .....	115
Tabela 5.5	Índices parciais de agressividade do solo, segundo TrabANELLI.....	116
Tabela 5.6	Critério de agressividade do solo, segundo TrabANELLI.....	117
Tabela 5.7	Comparação das técnicas eletroquímicas de determinação de taxas de corrosão do aço em solo .....	123
Tabela 5.8	Características dos solos empregados na avaliação da evolução da taxa de corrosão através de técnicas eletroquímicas .....	124
Tabela 6.1	Taxas de corrosão de revestimentos de zinco sobre o aço.....	135
Tabela 6.2	Taxa de corrosão de tubos de aço galvanizado em diferentes solos após 12,7 anos de exposição .....	136
Tabela 6.3	Temperatura máxima de operação de revestimentos.....	146
Tabela 6.4	Classificação comparativa de revestimentos com base em características pré-selecionadas .	149
Tabela 6.5	Avaliação qualitativa de revestimentos com base em características pré-selecionadas .....	150
Tabela 6.6	Propriedades relativas ao transporte, manuseio e lançamento de tubos .....	150
Tabela 6.7	Propriedades relativas à proteção anticorrosiva do revestimento.....	151
Tabela 6.8	Propriedades durante a operação e instalação .....	151

Tabela 6.9	Custo relativo entre diferentes revestimentos..	151
Tabela 7.1	Anodos galvânicos para uso em solos.....	157
Tabela 7.2	Composição do enchimento para anodos galvânicos .....	157
Tabela 7.3	Anodos inertes para uso em solos .....	159
Tabela 7.4	Critérios recomendados para proteção catódica .	166