

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 Sacrifício.....	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 ₂ O, a 25 °C, 1 atm de pressão e concentração de Fe ²⁺ igual a 10 ⁻⁶ íons/l.....	40
Figura 2.15	Diagrama E-pH esquemático do sistema Cu-H ₂ O, a 25 °C, 1 atm de pressão e concentração de Cu ²⁺ igual a 10 ⁻⁶ 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 ₂ H ⁺ Zn ²⁺ 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 Na_2SO_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	Varição 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 ₄	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