

Sumário

1	Introdução	1
2	Corrosão	3
2.1	– Mecanismo Eletroquímico da Corrosão	6
2.2	– Potencial de Eletrodo ou Potencial Eletroquímico	7
2.3	– Pilhas de Corrosão	14
2.4	– Tipos de Corrosão	21
2.4.1	– Corrosão galvânica	21
2.4.2	– Corrosão em frestas	21
2.4.3	– Corrosão atmosférica	21
2.4.4	– Corrosão pelo solo	22
2.4.5	– Corrosão pela água	23
2.4.6	– Corrosão por bactérias ou corrosão microbológica	23
2.4.7	– Corrosão eletrolítica	24
2.4.8	– Corrosão intergranular	24
2.4.9	– Corrosão por compostos de enxofre	25
2.4.10	– Corrosão grafítica	25
2.4.11	– Dezincificação	25
2.4.12	– Corrosão em concreto	25
2.4.13	– Corrosão sob fagida	26
2.4.14	– Corrosão sob tensão	26
2.5	– Formas e Taxas de Corrosão	26
2.6	– Diagrama de Pourbaix	28
2.7	– Mecanismo Químico da Corrosão	32
	Referências	33
3	Polarização	35
3.1	– Causas da Polarização	37
3.2	– Ensaios de Polarização	37
	Referências	42

4	Métodos de Combate à Corrosão	43
4.1	– Proteção contra a Corrosão Eletroquímica	43
4.1.1	– Métodos de proteção baseados no material metálico.	43
4.1.2	– Práticas de projeto	44
4.1.3	– Modificações do meio corrosivo	45
4.1.4	– Revestimentos protetores	47
4.1.5	– Proteção catódica	56
4.1.6	– Proteção anódica	56
4.1.7	– Métodos de controle relacionados com processos corrosivos	58
4.2	– Proteção contra a Corrosão Química em Altas Temperaturas.	62
4.2.1	– Seleção de metais e ligas metálicas – influência de elementos de liga	63
4.2.2	– Emprego de revestimentos refratários e isolantes	64
	Referências	65
5	Princípios Básicos de Proteção Catódica	67
5.1	– História	67
5.2	– Campo de Aplicação	69
5.3	– Mecanismo Básico	69
5.4	– Tipos de Proteção	78
5.4.1	– Proteção catódica galvânica	79
5.4.2	– Proteção catódica por corrente impressa	80
5.5	– Influência dos Revestimentos Protetores	82
5.6	– Critérios de Proteção	84
5.7	– Medição do Potencial.	86
5.8	– Superproteção	89
	Referências	91
6	Levantamento de Dados para Projeto	93
6.1	– Levantamento de Campo.	93
6.1.1	– Levantamento de resistividade	94
6.1.2	– Levantamento de potencial	97
6.1.3	– Potencial redox	100
6.1.4	– Pesquisa de corrente de interferência	101
6.1.5	– Teste de eficiência de revestimentos e determinação da corrente necessária à proteção	101
6.1.6	– Pesquisa para local de retificadores e de leitões galvânicos	102
6.2	– Levantamento de Dados da Estrutura	102

6.3 – Seleção do Tipo de Proteção	102
6.3.1 – Sistema galvânico	103
6.3.2 – Sistema de corrente impressa	104
Referências	104
7 Corrente Requerida para Proteção.	107
7.1 – Densidade de Corrente de Proteção	107
7.2 – Eficiência dos Revestimentos	110
7.3 – Fator de Velocidade	112
7.4 – Cálculo da Corrente Requerida.	114
Referências	117
8 Proteção Catódica Galvânica.	119
8.1 – Dimensionamento do Sistema Galvânico para Estruturas Marítimas	120
8.2 – Dimensionamento do Sistema Galvânico para a Proteção de Estruturas Enterradas	128
8.2.1 – Enchimento condutor.	129
8.2.2 – Cálculo da corrente liberada por um anodo enterrado no solo.	130
Referências	133
9 Proteção Catódica por Corrente Impressa.	135
9.1 – Dimensionamento do Sistema por Corrente Impressa	136
9.2 – Seleção do Equipamento de Impressão de Corrente	136
9.3 – Seleção dos Anodos	137
9.4 – Escolha do Arranjo e Disposição dos Anodos	139
9.5 – Verificação da Resistência do Circuito	141
9.5.1 – Resistência de contato do catodo/eletrólito – R_c	141
9.5.2 – Resistência do catodo – R_c'	142
9.5.3 – Resistência dos cabos – R_{ca}	143
9.5.4 – Resistência de contato do leito – R_n – para anodos instalados na superfície	145
9.5.5 – Resistência de contato do leito – R_n – para leitões de anodos profundos.	152
9.6 – Comentários sobre a Verificação da Resistência do Circuito	153
9.7 – Anodo Polimérico Contínuo	153
Referências	154

10 Aplicações de Proteção Catódica	155
10.1 – Proteção de Dutos, Adutoras e Tribulações Industriais	155
10.1.1 – Proteção externa	156
10.1.2 – Proteção interna de tubulações de água	156
10.1.3 – Métodos de proteção catódica para tubulações enterradas ou submersas	157
10.1.4 – Proteção catódica para emissários submarinos e tubulações de pequena extensão no mar	163
10.1.5 – Proteção catódica de tubos-camisa em poços profundos para produção de petróleo e água	165
10.2 – Proteção Catódica de Tanques de Armazenamento	165
10.2.1 – Proteção interna	165
10.2.2 – Proteção externa	166
10.3 – Proteção Catódica de Navios, Embarcações e Plataformas Semi-submersíveis	173
10.3.1 – Proteção do casco	174
10.3.2 – Proteção dos tanques de lastro	177
10.4 – Proteção Catódica de Instalações Portuárias (Piers, Cais e Plataformas)	178
10.5 – Plataformas Marítimas Fixas para Produção de Petróleo	180
10.6 – Proteção Catódica em Unidades Industriais	183
10.7 – Proteção Catódica de Estruturas de Concreto	183
10.8 – Proteção Catódica de Permutadores de Calor	184
10.9 – Proteção Catódica de Bases de Torres de Linhas de Transmissão.	186
10.9.1 – Influência do aterramento elétrico.	187
10.9.2 – Proteção com anodos galvânicos	187
10.9.3 – Proteção por corrente impressa	188
Referências	188
11 Corrente de Interferência.	191
11.1 – Origem	191
11.2 – Consequências	195
11.3 – Pesquisa.	196
11.4 – Meios de Combate	199
11.5 – Equipamentos de Drenagem Elétrica	204
Referências	205
12 Interferências por Correntes Alternadas.	207
12.1 – Análise do Fenômeno Elétrico.	208
12.2 – Interferências por Corrente Alternada de Elevado Potencial	209
12.2.1 – Metodologia de cálculo	210
12.2.2 – Meios de proteção	212

12.3 – Interferências por Corrente Alternada Induzida de Baixa Tensão . . .	213
12.3.1 – A retificação da corrente de injeção	213
12.3.2 – A retificação da corrente de indução no duto	215
12.3.3 – Corrente injetada involuntariamente no duto	215
12.3.4 – Meios de proteção	216
12.4 – Interferências por Corrente Alternada de Alta Densidade e/ou	
Baixa Frequência	220
12.4.1 – Meios de proteção	221
Referências	221
13 Instalações Auxiliares	223
13.1 – Suprimento de Energia	223
13.2 – Pontos de Testes	224
13.3 – Juntas Isolantes	227
13.4 – Cupons de Teste e Eletrodos de Referência Permanentes	227
13.5 – Dispositivos de Proteção de Juntas Isolantes	229
Referências	230
14 Instalação de Sistemas de Proteção Catódica	231
14.1 – Instalação de Sistemas Galvânicos	231
14.1.1 – Instalação de sistema galvânico em estruturas submersas . .	231
14.1.2 – Instalação de sistema galvânico em estruturas enterradas . .	233
14.2 – Instalação de Sistema por Corrente Impressa	234
14.2.1 – Instalação da fonte de corrente contínua	234
14.2.2 – Instalação de cabos elétricos	235
14.2.3 – Instalação de anodos	239
Referências	242
15 Inspeção – Operação – Manutenção de Sistemas de	
Proteção Catódica	243
15.1 – Partida e Ajustes	243
15.2 – Inspeção e Acompanhamento de Sistemas	246
15.2.1 – Necessidade de inspeção	246
15.2.2 – Frequência de inspeção	247
15.2.3 – Levantamento de campo para inspeção e acompanhamento . .	248
15.2.4 – Registro das inspeções	250
15.3 – Confiabilidade das Medições Realizadas – Metrologia Industrial . . .	252
15.4 – Técnicas Complementares de Inspeção Aplicáveis a Dutos	252
15.5 – Sistemas de Monitoramento	253
15.6 – Manutenção de Sistemas de Proteção Catódica	254
Referências	255

16 Equipamentos de Proteção Catódica	257
16.1 – Retificadores	257
16.2 – Outras Fontes de Corrente Contínua	259
16.2.1 – Conjunto motor–gerador	259
16.2.2 – Baterias solares ou células foto-voltaicas	259
16.2.3 – Gerador de energia eólica	260
16.2.4 – Termogeradores	260
16.2.5 – Gerador acionado por turbina a gás	260
16.2.6 – Gerador de energia induzida	260
16.3 – Equipamento de Drenagem	260
Referências	262
17 Materiais de Proteção Catódica	263
17.1 – Anodos Galvânicos	263
17.2 – Anodos Inertes	265
17.3 – Enchimento Condutor (<i>Backfill</i>)	267
17.4 – Cabos Elétricos	268
17.5 – Conectores	270
17.6 – Caixas de Medição e de Interconexão (Caixas MI)	270
17.7 – Juntas Isolantes	270
17.8 – Materiais Diversos	271
17.8.1 – Resistores	271
17.8.2 – Solda aluminotérmica (<i>cadweld</i>)	271
17.8.3 – Massa epóxi	272
17.8.4 – Supressores de transientes e desacopladores	272
Referências	272
18 Instrumentos para Proteção Catódica	273
18.1 – Medidores Eletrônicos de Múltiplas Funções (Multímetros Digitais)	273
18.2 – Medidores de Resistividade Elétrica (Terrômetro ou Telurímetro)	274
18.3 – Registradores	275
18.4 – Interruptores Automáticos de Corrente	275
18.5 – Eletrodos de Referência	276
18.6 – Carretéis e Fios	278
18.7 – Outros Instrumentos e Acessórios	279
Referências	279
19 Aspectos Econômicos	281
19.1 – Estruturas Marítimas	283
19.2 – Instalações Enterradas	284

19.3 – Custos de Operação, Inspeção e Manutenção	284
19.3.1 – Custo de operação	285
19.3.2 – Custo de inspeção.	285
19.3.3 – Custo de manutenção.	285
Referências	286

APÊNDICE I Princípios Básicos de Metrologia 287

I.1 – Definições e Conceitos	287
I.2 – As Categorias da Metrologia	290
I.2.1 – Metrologia científica.	290
I.2.2 – Metrologia industrial	290
I.2.3 – Metrologia legal	290
I.3 – A Estrutura Metrológica Mundial	290
I.4 – A Estrutura Metrológica Brasileira.	292
I.4.1 – O Sinmetro	292
I.4.2 – O Conmetro.	293
I.4.3 – O Inmetro.	294
I.5 – Importância da Metrologia para a Proteção Catódica	295
Referências	296

APÊNDICE II Técnicas de Inspeção de Revestimentos e de Proteção Catódica de Dutos Enterrados. . . 297

II.1 – Introdução	297
II.2 – Inspeção de Falhas de Revestimento pelo Método de Mapeamento de Corrente – (Pipeline Current Mapper-PCM)	298
II.2.1 – Descrição do método de PCM	298
II.2.2 – Interpretação dos sinais	299
II.2.3 – Vantagens e limitações do método PCM	304
II.3 – Inspeção de Falhas no Revestimento pelo Método de Pearson	304
II.3.1 – Descrição do método de Pearson.	304
II.3.2 – Interpretação dos sinais	306
II.3.3 – Aplicações do método de Pearson	307
II.3.4 – Vantagens e limitações do método	307
II.4 – Inspeção pelo Método de Potencial Passo a Passo.	308
II.4.1 – Considerações gerais	308
II.4.2 – Conceituação de potencial de energização (<i>on potential</i>) de potencial de polarização (<i>off potential</i>) e queda ôhmica (IR)	308
II.4.3 – Descrição do método de potencial passo a passo	309
II.4.4 – Avaliação possível pelo método potencial passo a passo	312
II.4.5 – Interpretação gráfica dos resultados	312
II.4.6 – Vantagens e limitações do método	313

II.5 – Inspeção pelo Método Gradiente de Potencial (DGVG)	314
II.5.1 – Considerações gerais	314
II.5.2 – Descrição do método do DCVG	314
II.5.3 – Procedimentos de inspeção	316
II.5.4 – Vantagens e limitações do método do DCVG	318
II.6 – Conclusões	319
APÊNDICE III – Exercícios e Problemas de Proteção	
Catódica	321
Índice Remissivo	339