

## SUMÁRIO

<b>1. Introdução</b>	9
<b>2. Mecanismos reativos básicos da corrosão de materiais metálicos</b>	14
2.1. Transferência de cargas elétricas	14
2.2. Pilha eletroquímica	18
2.3. Principais reações parciais em meios aquosos	21
2.4. Lei de Faraday	23
2.5. Lei de Ohm	25
<b>3. Potencial elétrico</b>	31
3.1. Potencial reversível	36
3.2. Potencial reversível padrão	45
3.3. Potencial de corrosão	57
3.4. Medidas do potencial de corrosão	64
<b>4. Polarização</b>	68
4.1. Gráficos de polarização	68
4.2. Fenômenos de polarização	74
4.2.1. Controle por ativação	79
4.2.2. Controle por difusão	84
4.2.2.1. Densidade de corrente limite	85
4.2.2.2. Eletrodos rotatórios	89
4.2.3. Controle por ativação-difusão	92
4.2.4. Controle por resistência	96
<b>5. Ensaios de polarização</b>	100
5.1. Técnica/metodologia de ensaio	100
5.2. Avaliação qualitativa da resistência à corrosão generalizada	107
5.2.1. Avaliação qualitativa do comportamento à corrosão de um material	107
5.2.2. Avaliação qualitativa da resistência à corrosão entre materiais diferentes	108
5.3. Avaliação quantitativa da resistência à corrosão generalizada	110
5.3.1. Determinação da densidade de corrente de corrosão pelo método de Tafel	110
5.3.2. Medida da resistência de polarização	113
<b>6. Passivação</b>	121
6.1. Estabilidade termodinâmica dos produtos de corrosão	125
6.1.1. Diagrama de equilíbrio eletroquímico da água	125
6.1.2. Diagramas de equilíbrio de sistemas metal-água	128
6.2. Efeito da concentração do oxidante no potencial de corrosão	139
6.3. Despassivação anódica	141
6.3.1. Dissolução generalizada por oxidação do filme passivo	141
6.3.2. Dissolução por pites em presença de ânions agressivos	142
6.3.3. Dissolução acima do potencial de desprendimento de oxigênio	142

<b>7. Ensaios de impedância eletroquímica</b>	144
7.1. Noções de base sobre impedância elétrica	144
7.1.1. Sinal elétrico alternado	144
7.1.2. Defasagem entre os sinais instantâneos de tensão alternada e corrente alternada	146
7.1.3. Impedância elétrica de um resistor	147
7.1.4. Impedância elétrica de um capacitor	149
7.1.5. Impedância elétrica de um indutor	150
7.1.6. Diagrama de Bode	152
7.1.7. Representação da impedância no plano complexo	156
7.1.8. Diagrama de Nyquist	159
7.1.9. Constante de tempo de um circuito RC e de um circuito RL	161
7.1.10. Impedância elétrica de circuitos R(RC) e R(RL)	163
7.2. Impedância eletroquímica e circuitos elétricos equivalentes	167
7.2.1. Impedância de reações eletroquímicas controladas pela ativação	170
7.2.2. Impedância de reações eletroquímicas controladas pela ativação-difusão	174
7.2.2.1. Impedância de difusão em camada semi-infinita	178
7.2.2.2. Impedância de difusão em camada finita	183
7.2.3. Impedância de materiais passivados	187
7.2.4. Impedância de materiais metálicos com filmes porosos	191
7.2.5. Influência de espécies inorgânicas adsorvidas na impedância eletroquímica	195
<b>8. Taxa de corrosão</b>	202
8.1. Taxa média e taxa instantânea da corrosão generalizada	203
8.2. Ensaios de corrosão por imersão em meios aquosos	207
8.2.1. Quantificação da corrosão generalizada por gravimetria	207
8.2.2. Quantificação da corrosão generalizada por medida volumétrica de H <sub>2</sub>	210
8.2.3. Quantificação da corrosão generalizada por análise química do eletrólito	214
8.2.4. Quantificação da corrosão generalizada por meio de medidas da resistência elétrica	214
8.3. Ensaios eletroquímicos de corrosão	216
8.3.1. Quantificação da corrosão generalizada por meio de sinal elétrico contínuo	217
8.3.2. Quantificação da corrosão generalizada por meio de sinal elétrico alternado	223
8.3.3. Quantificação da corrosão generalizada por meio de sinal elétrico pulsado	225
<b>9. Corrosão seletiva e localizada</b>	228
9.1. Corrosão seletiva	228
9.2. Corrosão galvânica	234
9.3. Corrosão por pites	245
9.3.1. Mecanismo de nucleação e crescimento de pites induzidos por cloreto	247
9.3.2. Influência da composição do material	250
9.3.3. Avaliação da corrosão por pites	257
9.3.3.1. Ensaios por imersão	257
9.3.3.2. Ensaios eletroquímicos	260

9.4. Corrosão intergranular	264
9.4.1. Corrosão intergranular de ligas de alumínio	265
9.4.2. Corrosão intergranular de aços inoxidáveis	272
9.5. Corrosão em frestas	278
<b>10. Corrosão sob tensão e corrosão-fadiga em meios aquosos</b>	288
10.1. Corrosão sob tensão em meios aquosos	288
10.1.1. Origem das tensões ou deformações em materiais metálicos	288
10.1.2. Suscetibilidade à corrosão sob tensão	289
10.1.2.1. Potenciais elétricos de maior suscetibilidade à corrosão sob tensão	291
10.1.2.2. Influência da temperatura	293
10.1.3. Características da ruptura provocada pela corrosão sob tensão	293
10.1.4. Nucleação e propagação das fissuras	296
10.1.4.1. Nucleação das fissuras	297
10.1.4.2. Fator de intensidade de tensão ( $K$ )	299
10.1.5. Mecanismos de fissuração sob tensão induzida por meios aquosos	302
10.1.6. Ensaio de corrosão sob tensão em meios aquosos	311
10.1.7. Influência do potencial elétrico na fissuração sob tensão	322
10.2. Corrosão-fadiga em meios aquosos	326
10.2.1. Ensaio de fadiga com corpos de prova não fissurados	326
10.2.2. Ensaio de fadiga com corpos de prova pré-fissurados	328
10.2.3. Nucleação e propagação de fissuras por fadiga em ar ambiente	330
10.2.4. Fadiga em meios aquosos corrosivos	333
10.2.4.1. Ensaio de corrosão-fadiga	333
10.2.4.2. Mecanismos de nucleação e de propagação de fissuras	336
<b>11. Corrosão atmosférica</b>	349
11.1. Tipos de atmosferas	349
11.2. Corrosividade de atmosferas	352
11.2.1. Principais substâncias atmosféricas para a corrosão de materiais metálicos	353
11.2.1.1. Dióxido de enxofre ( $\text{SO}_2$ )	354
11.2.1.2. Óxidos de nitrogênio ( $\text{NO}_x$ )	355
11.2.1.3. Outros poluentes gasosos corrosivos	356
11.2.1.4. Materiais particulados	358
11.2.2. Deposição de substâncias da atmosfera sobre a superfície metálica	360
11.2.2.1. Deposição seca	360
11.2.2.2. Deposição úmida	360
11.2.3. Tempo de superfície úmida	361
11.2.4. Composição do eletrólito na superfície metálica	361
11.2.5. Parâmetros climáticos relevantes para a corrosividade atmosférica	363
11.2.5.1. Umidade relativa	363
11.2.5.2. Névoa/nevoeiro	364
11.2.5.3. Precipitação pluviométrica	365

11.2.5.4. Temperatura	366
11.2.5.5. Ventos e radiação solar	366
11.2.6. Classificação da corrosividade de atmosferas externas baseada na norma ISO 9223 ou NBR 14643	366
11.2.6.1. Classificação em função do tempo de superfície úmida e de poluentes atmosféricos	367
11.2.6.2. Classificação em função da taxa média de corrosão de metais padrão	369
11.2.7. Classificação da corrosividade de atmosferas internas	371
11.2.8. Classificação da corrosividade de atmosferas por meio de função dose-resposta	371
11.2.9. Mapeamento da corrosividade atmosférica	374
11.3. Tipos de corrosão atmosférica	378
11.3.1. Corrosão atmosférica seca	378
11.3.2. Corrosão atmosférica úmida	379
11.3.3. Corrosão atmosférica molhada	381
11.4. Ensaaios de corrosão atmosférica	381
11.4.1. Ensaaios não acelerados (ou naturais)	381
11.4.2. Ensaaios acelerados (ou artificiais)	383
11.4.3. Ensaaios mistos	385
11.5. Corrosão atmosférica de materiais metálicos de construção comumente usados em engenharia	386
11.5.1. Corrosão atmosférica do aço-carbono	387
11.5.2. Corrosão atmosférica de aços patináveis	392
11.5.3. Corrosão atmosférica do zinco ou do aço zincado	392
11.5.4. Corrosão atmosférica do cobre	399
11.5.5. Corrosão atmosférica do alumínio	403
<b>12. Corrosão em solos e em águas naturais</b>	410
12.1. Corrosão em solos	410
12.1.1. Fatores relevantes para a corrosividade de solos	410
12.1.1.1. Água e sais solúveis	410
12.1.1.2. Aeração	412
12.1.1.3. pH do solo	412
12.1.1.4. Microrganismos	412
12.1.1.5. Correntes de fuga (ou de interferência)	413
12.1.2. Caracterização de solos para avaliação da corrosão/corrosividade de solos	415
12.1.3. Avaliação da corrosividade de solos	418
12.1.3.1. Avaliação por meio de análises físico-químicas	419
12.1.3.2. Avaliação por meio da taxa ou profundidade de corrosão	420
12.1.3.3. Estimativa da corrosão por meio de funções dose-resposta	421
12.1.4. Ensaaios de corrosão	426
12.1.4.1. Ensaaios não acelerados (naturais)	426
12.1.4.2. Ensaaios acelerados	426

12.1.4.2.1. Ensaio em amostras de solo	426
12.1.4.2.2. Ensaio em soluções	426
12.2. Corrosão em águas naturais	428
12.2.1. Substâncias presentes na água	431
12.2.2. Dureza da água	433
12.2.3. Corrosividade de águas naturais	434
12.2.3.1. Influência do oxigênio dissolvido, pH e temperatura	435
12.2.3.2. Presença de CO <sub>2</sub> em águas não aeradas	438
12.2.3.3. Presença de H <sub>2</sub> S em águas não aeradas	443
12.2.3.4. Presença de CO <sub>2</sub> e de H <sub>2</sub> S em águas não aeradas	444
12.2.3.5. Influência de outros gases	446
12.2.3.6. Influência dos sais dissolvidos	447
12.2.3.7. Influência das incrustações em materiais à base de ferro	448
12.2.3.8. Presença de particulados e de microrganismos	450
12.2.3.9. Influência do fluxo da água	451
<b>13. Corrosão induzida por microrganismos</b>	456
13.1. Catabolismo	457
13.2. Principais microrganismos e produtos metabólicos associados à CIM	459
13.2.1. Bactérias redutoras de sulfato	459
13.2.2. Bactérias oxidantes de enxofre	461
13.2.3. Bactérias oxidantes de ferro/manganês	461
13.2.4. Microrganismos produtores de ácidos	462
13.3. Formação de biofilme	462
13.4. Mecanismos de corrosão	465
13.4.1. Influência do biofilme na CIM	465
13.4.2. Influência dos produtos metabólicos na CIM	467
13.4.3. Mecanismos de corrosão induzida por bactérias oxidantes de Fe/Mn	470
13.4.4. Mecanismos de corrosão induzida por BRS	472
13.5. Avaliação e controle da CIM	475
<b>14. Corrosão por gases ou vapores</b>	481
14.1. Nucleação e crescimento dos filmes	482
14.2. Ensaio de corrosão em meios gasosos	485
14.3. Tensões nos filmes	488
14.4. Corrosão de metais pelo oxigênio	491
14.5. Corrosão de ligas pelo oxigênio	502
14.5.1. Formação das fases durante a oxidação	503
14.5.2. Cinética de crescimento dos filmes	508
14.6. Sulfetação	510
14.7. Corrosão em meios contendo mistura de gases	515
14.7.1. Sistemas M-CO <sub>2</sub> -CO e M-H <sub>2</sub> O-H <sub>2</sub>	515
14.7.2. Sistema M-SO <sub>2</sub> -O <sub>2</sub>	518

14.8. Corrosão por compostos voláteis de cloretos	520
14.9. Depósitos de sais e cinzas corrosivos	521
<b>15. Corrosão ou degradação química de materiais não metálicos</b>	<b>525</b>
15.1. Corrosão de materiais cimentícios	525
15.1.1. Materiais cimentícios de construção	525
15.1.2. Meios corrosivos aquosos	526
15.1.3. Interações químicas entre a pasta de cimento endurecida e o seu meio	528
15.1.3.1. Lixiviação	528
15.1.3.2. Ataque por sulfato	531
15.1.3.3. Carbonatação	537
15.1.3.4. Ataque por íons de magnésio	541
15.1.3.5. Corrosão induzida por microrganismos	543
15.1.4. Corrosão do reforço metálico	548
15.1.5. Reação álcali-agregado	553
15.1.6. Ensaio de corrosão	555
15.2. Degradação química de materiais poliméricos	558
15.2.1. Hidrólise de materiais poliméricos	558
15.2.2. Oxidação de materiais poliméricos	559
15.2.3. Ozonólise	563
15.2.4. Estabilização de polímeros	564