

Sumário

Nota dos Autores	XV
Abreviaturas	XVII
Apresentação	XIX
Prefácio	XXI
1 Introdução	1
2 Falhas Mecânicas	5
2.1 Fadiga	5
2.1.1 Fadiga mecânica	5
2.1.2 Fadiga térmica	32
2.2 Ruptura por Sobrecarga	42
2.2.1 Ruptura por sobrecarga não associada a sobreaquecimento ..	42
2.2.2 Ruptura por sobrecarga associada a sobreaquecimento	54
2.3 Desgaste	63
2.3.1 Erosão/Corrosão-erosão	63
2.3.2 Cavitação	67
2.3.3 Impingimento	69
3 Falhas Devidas à Corrosão Não Associada a Esforços Mecânicos	77
3.1 Corrosão Eletroquímica	77
3.2 Corrosão Intergranular	79
3.3 Corrosão Seletiva	82
3.4 Corrosão Galvânica	89
3.5 Corrosão por Pites	98
3.6 Corrosão por Célula Oclusa	110
3.6.1 Corrosão por bissulfeto de amônio	116
3.7 Corrosão Ácida	122
3.7.1 Corrosão por CO ₂	122

3.7.2 Corrosão por H_2SO_4	124
3.7.3 Corrosão por condensação de gases de combustão (<i>dewpoint corrosion</i>)	126
3.7.4 Corrosão por HCl	127
3.7.5 Corrosão por H_2S	129
4 Falhas Devidas à Corrosão Associada a Esforços Mecânicos	141
4.1 Corrosão sob tensão (CST)	141
4.1.1 CST em meios contendo cloretos	142
4.1.2 CST em meios cáusticos (fragilização cáustica)	164
4.1.3 CST em meios contendo amônia	174
4.1.4 CST por ácidos politiônicos	177
4.1.5 CST em pH próximo ao neutro	188
4.2 Corrosão-Erosão	202
4.3 Corrosão-Fadiga	202
5 Falhas Devidas à Corrosão em Altas Temperaturas	215
5.1 Oxidação em altas temperaturas/Oxidação interna	215
5.2 Sulfetação	219
5.3 Corrosão Naftênica	240
5.4 Corrosão por Cinzas Fundidas	247
6 Falhas Devidas a Danos Causados por Hidrogênio	257
6.1 Empolamento por hidrogênio/Trincamento induzido por hidrogênio (TIH)/Trincamento sob tensão por sulfeto (TTS)/ Trincamento por Hidrogênio orientado por tensão (THOT)	257
6.2 Ataque pelo hidrogênio em altas temperaturas (AHAT)	283
6.3 Trincamento a frio	289
7 Falhas Devidas à Alteração Metalúrgica	297
7.1 Grafitização	297
7.2 Fragilização por fase sigma	304
8 Fluência	313
9 Casos Especiais	341
Referências bibliográfica	379
Glossário	385

Índice de Casos Práticos por Mecanismo de Falhas

2 Falhas Mecânicas

2.1 Fadiga

2.1.1 Fadiga mecânica

- a) Ruptura de niple de *vent* de uma bomba centrífuga em operação 9
- b) Trincamento de poço do termopar 13
- c) Ruptura de tirante de um suporte de mola 18
- d) Ruptura de niple de dreno de uma bomba centrífuga em operação 21
- e) Ruptura de mola de válvula de segurança e alívio de pressão .. 24
- f) Trincamento em niple do *vent* de uma tubulação 29

2.1.2 Fadiga térmica

- a) Falha em serpentina de vapor de forno de processo 36
- Ruptura em lanças de ramonadores de um forno de processo do capítulo 7, item 7.2 307
 - Casos Especiais (capítulo 9)
- b) Mecanismos de danos em bico de tocha (*flare*) 347
- e) Falha em feixe tubular de um permutador de calor 366
- f) Ruptura de palheta da turbina de turbogerador 370

2.2 Ruptura por Sobrecarga

2.2.1 Ruptura por sobrecarga não associada a sobreaquecimento

- a) Rupturas em tubos de trocador de calor 44
- b) Ruptura de gancho de talha 49

2.2.2 Ruptura por sobrecarga associada a sobreaquecimento

- a) Ruptura em tubo de forno de processo 56

2.3 Desgaste

2.3.1 Erosão/Corrosão-erosão

2.3.2 Cavitação

2.3.3 Impingimento

- a) Falha em boia de chave de nível de um vaso vertical de condensado - Erosão (Abrasão) 72

b) Falha em coletor e tubo da serpentina de vapor de torre extratora – Corrosão-erosão	74
--	----

3 Falhas Devidas à Corrosão Não Associada a Esforços Mecânicos

3.1 Corrosão eletroquímica	
Todos os casos práticos descritos nos capítulos 3 e 4 foram causados por corrosão eletroquímica	
Todos os casos práticos descritos no capítulo 6, item 6.1 ocorreram devido à geração de hidrogênio atômico, oriundo de reações catódicas da corrosão eletroquímica em meios contendo H ₂ S	
3.2 Corrosão intergranular	
Todos os casos práticos de corrosão sob tensão por ácidos politiônicos e corrosão sob tensão em meios cáusticos foram intergranulares	
3.3 Corrosão seletiva	
a) Falha em tubo de permutador de calor	85
3.4 Corrosão galvânica	
a) Falha em espelho flutuante de permutador de calor	93
b) Falha em tubulação de <i>vent</i> de bomba centrífuga	95
3.5 Corrosão por pites	
a) Furo em mangote flexível de gás combustível	101
b) Furo em linhas de gás combustível	106
Deterioração em <i>demister</i> de vaso de sucção de compressor de hidrogênio do capítulo 4, item 4.1.1	145
• Casos especiais(capítulo 9)	
d) Falha em tubo aletado de trocador de calor tipo resfriador a ar (<i>air cooler</i>)	360
3.6 Corrosão por célula oclusa	
a) Furo em solda entre niple e válvula de dreno de uma tubulação	112
Falha em tubo de permutador de calor do capítulo 3, item 3.3	85
• Casos especiais(capítulo 9)	
d) Falha em tubo aletado de trocador de calor tipo resfriador a ar (<i>air cooler</i>)	360
3.6.1 Corrosão por bissulfeto de amônio	
a) Ruptura em tubos de trocador de calor durante a operação da planta de processo	118
3.7 Corrosão ácida	
3.7.1 Corrosão por CO ₂	
3.7.2 Corrosão por H ₂ SO ₄	
3.7.3 Corrosão por condensação de gases de combustão (<i>dewpoint corrosion</i>)	

3.7.4	Corrosão por HCl	
3.7.5	Corrosão por H ₂ S	
	a) Falha em bico soprador de vapor de ramonagem de forno de processo	131
	b) Falha em junta de expansão de tubulação de gases para caldeira	136
4	Falhas Devidas à Corrosão Associada a Esforços Mecânicos	
4.1	Corrosão sob tensão (CST)	
4.1.1	CST em meios contendo cloretos	
	a) Deterioração em <i>demister</i> de vaso de sucção de compressor de hidrogênio	145
	b) Trincamento em tubo de serpentina de aquecimento de um tanque de armazenamento	150
	c) Falha na serpentina de resfriador de óleo do mancal de uma bomba centrífuga	155
	d) Falha em rotor de ventilador	159
	• Casos especiais (capítulo 9)	
	d) Falha em tubo aletado de trocador de calor tipo resfriador a ar (<i>air cooler</i>)	360
	e) Falha em feixe tubular de um permutador de calor	366
4.1.2	CST em meios cáusticos (fragilização cáustica)	
	a) Trincamentos em tubulação de uma unidade de processo	167
4.1.3	CST em meios contendo amônia	
	• Casos especiais (capítulo 9)	
	c) Trincamento em tubo de trocador de calor	355
4.1.4	CST por ácidos politiônicos	
	a) Trincas em flange da tubulação de saída de carga de um forno de processo	180
	b) Trincamento em revestimento interno (<i>clad</i>) do costado de uma torre de processo	183
4.1.5	CST em pH próximo ao neutro	
	a) Trincamento circunferencial em gasoduto	192
4.2	Corrosão-erosão	
	Corrosão-erosão também foi classificada como sendo um mecanismo de desgaste (capítulo 2). Portanto, o caso prático aplicável é “Falha em coletor e tubo da serpentina de vapor de torre extratora” do capítulo 2, item 2.3	74
4.3	Corrosão-fadiga	
	a) Trincamento em tubo de resfriador de óleo	204
	b) Falha em tubos de permutador de calor	209

• Casos especiais (capítulo 9)	
c) Trincamento em tubo de trocador de calor	355
5 Falhas Devidas à Corrosão em Altas Temperaturas	
5.1 Oxidação em altas temperaturas/Oxidação interna	
Todos os casos práticos descritos nos capítulos 5 foram causados por oxidação em altas temperaturas	
• Casos especiais (capítulo 9)	
b) Mecanismos de danos em bico de tocha (<i>flare</i>) – Oxidação direta	347
f) Ruptura de palheta da turbina de turbogerador – Oxidação direta/Oxidação interna	370
5.2 Sulfetação	
a) Falha em tubo da convecção de forno de processo	222
b) Vazamentos pelos plugues da carcaça de uma bomba centrífuga	236
Corrosão interna em tubulação do sistema de vácuo de uma unidade de destilação a vácuo do capítulo 5, item 5.3	243
5.3 Corrosão naftênica	
a) Corrosão interna em tubulação do sistema de vácuo de uma unidade de destilação a vácuo	243
5.4 Corrosão por cinzas fundidas	
a) Ruptura em tubo de uma caldeira de alta pressão	250
6 Falhas Devidas a Danos Causados por Hidrogênio	
6.1 Empolamento por hidrogênio/Trincamento induzido por hidrogênio (TIH)/Trincamento sob tensão por sulfeto (TTS)/Trincamento por hidrogênio orientado por tensão (THOT)	
a) Falha em solda de selagem de tubos de um gerador de vapor – <u>Trincamento sob tensão por sulfeto</u>	264
b) Ruptura em estojos de fixação de tampo flutuante de trocador de calor – Caso 1 – <u>Trincamento sob tensão por sulfeto</u>	273
c) Ruptura em estojos de fixação de tampo flutuante de trocador de calor – Caso 2 – <u>Trincamento por hidrogênio orientado por tensão</u>	278
• Casos especiais (capítulo 9)	
b) Mecanismos de danos em bico de tocha (<i>flare</i>) – <u>Empolamento por hidrogênio, Trincamento induzido por hidrogênio</u>	347
6.2 Ataque pelo hidrogênio em altas temperaturas (AHAT)	
a) Falha em anel bipartido de trocador de calor	286
6.3 Trincamento a frio	
a) Trincamento em niple de <i>vent</i> de uma bomba centrífuga	292

7	Falhas Devidas à Alteração Metalúrgica	
7.1	Grafitização	
a)	Ruptura em tubo de caldeira durante operação	300
7.2	Fragilização por fase sigma	
a)	Ruptura em lanças de ramonadores de um forno de processo . .	307
	Falha em junta de expansão de tubulação de gases para caldeira do capítulo 3, item 3.7	136
	• Casos especiais (capítulo 9)	
b)	Mecanismos de danos em bico de tocha (<i>flare</i>)	347
8	Fluência	
a)	Trincamento em tubo de teto inclinado de um forno de processo	318
b)	Ruptura em tubo de forno de unidade de geração de hidrogênio	324
c)	Ruptura em coletor de forno de unidade de geração de hidrogênio	334
9	Casos Especiais	
a)	Falha em esferas de rolamento de uma bomba centrífuga	341
b)	Mecanismos de danos em bico de tocha (<i>flare</i>) - <u>Fadiga térmica</u> , <u>Oxidação em altas temperaturas</u> , <u>Empolamento por hidrogênio</u> , <u>Trincamento induzido por hidrogênio</u> , <u>Fragilização por fase sigma</u>	347
c)	Trincamento em tubo de trocador de calor - <u>Corrosão-fadiga</u> , <u>Corrosão sob tensão em meios contendo amônia</u>	355
d)	Falha em tubo aletado de trocador de calor tipo resfriador a ar (<i>air cooler</i>) - <u>Corrosão por pites</u> , <u>Corrosão por célula oclusa</u> , <u>Corrosão sob tensão por cloreto</u>	360
e)	Falha em feixe tubular de um permutador de calor - <u>Fadiga térmica</u> , <u>Corrosão sob tensão em meios contendo cloreto</u>	366
f)	Ruptura de palheta da turbina de turbogerador - <u>Fadiga térmica</u> , <u>Oxidação em altas temperaturas</u> , <u>Oxidação interna</u>	370