

# MATERIAIS

Aplicações de Engenharia,  
Seleção e Integridade

# PREFÁCIO

Desde os primórdios da humanidade e a partir do momento em que o ser humano passou a usar os materiais, as preocupações com a seleção e o desempenho dos mesmos sempre foram aspectos relevantes.

Nestes últimos quarenta anos, temos observado que os profissionais de algumas especialidades, como projetos mecânicos, corrosão, ensaios não destrutivos, inspeção de equipamentos, manutenção, soldagem, dentre outras, necessitam de conhecimentos sobre os materiais que de modo geral estão dispersos na literatura existente.

Com base nesta carência decidimos desenvolver este trabalho cujo objetivo é apresentar os principais materiais metálicos, não metálicos e compósitos utilizados nos projetos de engenharia e no cotidiano, com suas características e propriedades previstas nas principais normas de especificação e orientar a seleção destes materiais. Ele servirá também para avaliação de integridade de equipamentos e instalações onde, através do conhecimento das características e propriedades, se possa tomar medidas para manter as instalações industriais com elevado nível de confiabilidade operacional.

Exatamente por ser uma literatura técnica para profissionais de formação não especializada foi colocada no APÊNDICE I uma revisão de conceitos básicos de química, para facilitar o entendimento dos assuntos abordados. Sendo que na primeira parte apresenta-se a conceituação dos principais aspectos da química inorgânica e na segunda parte uma revisão de conceitos básicos de química orgânica.

Para atender o seu objetivo o livro foi organizado da seguinte forma:

- O capítulo 1 é introdutório, ressaltando alguns aspectos históricos dos materiais.
- No capítulo 2 são apresentadas as características e as propriedades dos materiais.
- O capítulo 3 tem como propósito apresentar os materiais metálicos.
- O capítulo 4 aborda os materiais não metálicos.
- O capítulo 5 apresenta os materiais híbridos, ou seja, os compósitos.
- O capítulo 6 apresenta os processos de deterioração que podem afetar a integridade dos materiais selecionados.

- O capítulo 7 aborda as técnicas de prevenção e proteção contra as causas de deterioração.
- No capítulo 8 são apresentados os aspectos econômicos e de disponibilidade para a seleção de materiais.
- No capítulo 9 apresentam-se os critérios de seleção de materiais.
- No capítulo 10 são apresentadas as principais aplicações.
- O capítulo 11 aborda as tendências no uso dos materiais.

Desta forma, este livro se destina a profissionais de outras áreas com formação não especializada, porém que necessitem de conhecimentos básicos sobre o assunto para compreenderem os fenômenos e os aspectos relevantes das suas atividades e que sejam dependentes das características, propriedades e da estrutura dos materiais.

Considerando-se a possibilidade de este livro ser utilizado por professores para formação de profissionais nas áreas de projeto, inspeção, manutenção, corrosão, soldagem, ensaios não destrutivos e outras, onde o conhecimento dos materiais seja muito importante, foi colocada no APÊNDICE V uma série de exercícios e problemas. Certamente estes exercícios em muito auxiliarão na execução de trabalhos didáticos e na elaboração de verificações de conhecimentos.

Como este trabalho aborda de forma simplificada os assuntos, no final de cada capítulo são colocadas sugestões de leitura de trabalhos mais especializados, para aprofundamento em cada tema específico e no final do livro encontra-se uma relação de referências bibliográficas mais completas sobre os diversos assuntos tratados.

Gostaria de colocar-me à disposição de todos os leitores e desde já agradecer antecipadamente as sugestões e contribuições de melhorias deste trabalho.

*O autor*

Maio de 2012

# SUMÁRIO

APRESENTAÇÃO DO IBP .....	XV
APRESENTAÇÃO DA ABRACO .....	XVII
PREFÁCIO .....	XIX
<b>CAPÍTULO 1</b>	
<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
<b>CAPÍTULO 2</b>	
<b>CARACTERÍSTICAS E PROPRIEDADES DOS MATERIAIS .....</b>	<b>5</b>
2.1 Características .....	6
2.1.1 Opacidade e Cor. ....	6
2.1.2 Brilho. ....	6
2.1.3 Massa Específica .....	7
2.1.4 Estado Físico e Temperatura de Fusão .....	7
2.1.5 Valência e Potenciais Eletroquímicos .....	8
2.1.6 Peso Molecular .....	8
2.1.7 Permeabilidade .....	8
2.2 Propriedades .....	9
2.2.1 Propriedades Mecânicas .....	9
2.2.2 Propriedades Elétricas. ....	16
2.2.3 Propriedades Térmicas .....	17
2.2.4 Resistência à Corrosão e a Outros Processos de Deterioração ..	17
2.2.5 Resistência à Fadiga .....	18
2.2.6 Resistência à Fluência .....	19
2.2.7 Soldabilidade .....	21
2.2.8 Resistência à Abrasão .....	21
2.2.9 Resistência à Fricção. ....	21
2.2.10 Resistência de Materiais Poliméricos ao Meio. ....	21
2.2.11 Resumo das Características e Propriedades .....	22
2.3 Influências nas Características e Propriedades .....	24
2.3.1 Influência das Impurezas e Imperfeições Durante o Processo de Obtenção .....	24
2.3.2 Influência da Estrutura Cristalina. ....	26
2.3.3 Influência da Transformação de Fases .....	26

2.3.4	Influência dos Elementos nas Ligas dos Materiais Metálicos . . .	26
2.3.5	Influência do Processo de Beneficiamento ou Fabricação. . . . .	27
2.3.6	Influência dos Tratamentos. . . . .	28
2.3.7	Influência do Tamanho de Grão dos Materiais Metálicos . . . . .	29
2.3.8	Influência da Temperatura de Trabalho . . . . .	30
2.4	Análise da Correlação entre Propriedades. . . . .	31
2.5	Ensaios para Determinação de Propriedades. . . . .	35
2.5.1	Ensaio de Tração . . . . .	35
2.5.2	Ensaio de Compressão . . . . .	36
2.5.3	Ensaio de Dureza . . . . .	36
2.5.4	Ensaio de Endurecibilidade para Materiais Metálicos. . . . .	38
2.5.5	Ensaio de Tenacidade . . . . .	39
2.5.6	Ensaio de Fadiga . . . . .	41
2.5.7	Ensaio de Flexão . . . . .	41
2.5.8	Ensaio de Fluência para Materiais Metálicos . . . . .	41
2.5.9	Ensaios Complementares para Materiais Poliméricos. . . . .	42
2.6	Análise Estatística de Características e Propriedades – Valores de Projeto. . . . .	42
2.7	Fratura Mecânica de Materiais – Fratura Dúctil e Frágil Temperatura de Transição – Mecânica da Fratura . . . . .	43
2.8	Leitura Adicional Recomendada e Referências Bibliográficas . . . . .	44
2.9	Resumo e Conclusões . . . . .	45
2.9.1	Resumo . . . . .	45
2.9.2	Conclusões . . . . .	45
 <b>CAPÍTULO 3</b>		
<b>MATERIAIS METÁLICOS . . . . .</b>		<b>47</b>
3.1	Materiais Ferrosos . . . . .	47
3.1.1	Aços Carbono . . . . .	49
3.1.2	Aços Ligas . . . . .	51
3.1.3	Aços Inoxidáveis . . . . .	52
3.1.4	Ferros Fundidos. . . . .	53
3.2	Materiais Metálicos não Ferrosos. . . . .	55
3.2.1	Cobres e Suas Ligas. . . . .	57
3.2.2	Alumínio e Suas Ligas. . . . .	58
3.2.3	Zinco e Suas Ligas. . . . .	58
3.2.4	Níquel e Suas Ligas. . . . .	59
3.2.5	Chumbo e Suas Ligas . . . . .	59
3.2.6	Titânio e Suas Ligas . . . . .	59
3.2.7	Magnésio e Suas Ligas. . . . .	61
3.2.8	Outros Metais . . . . .	61

3.3 Especificações e Orientações para Seleção . . . . .	62
3.3.1 Propriedades dos Materiais Ferrosos . . . . .	62
3.3.2 Propriedades dos Materiais não Ferrosos . . . . .	75
3.4 Fabricação de Componentes Metálicos para Equipamentos e Instalações – Montagem Industrial . . . . .	83
3.4.1 Fabricação . . . . .	83
3.4.2 Montagem Industrial. . . . .	93
3.5 Leitura Adicional Recomendada e Referências Bibliográficas . . . . .	93
3.6 Resumo e Conclusões . . . . .	94
3.6.1 Resumo . . . . .	94
3.6.2 Conclusões . . . . .	98
 <b>CAPÍTULO 4</b>	
<b>MATERIAIS NÃO METÁLICOS – POLIMÉRICOS – CERÂMICOS – CARBONÁCEOS . . . . .</b>	<b>99</b>
4.1 Materiais Poliméricos . . . . .	99
4.1.1 Materiais Plásticos. . . . .	100
4.1.2 Fibras. . . . .	115
4.1.3 Borrachas ou Elastômeros. . . . .	117
4.2 Materiais Cerâmicos – Vítreos e Refratários . . . . .	121
4.3 Materiais Carbonáceos. . . . .	125
4.4 Fabricação de Componentes não Metálicos para Equipamentos, Instalações e Produtos de Uso Geral. . . . .	128
4.4.1 Materiais Poliméricos . . . . .	128
4.4.2 Materiais Cerâmicos . . . . .	129
4.4.3 Materiais Carbonáceos . . . . .	129
4.5 Leitura Adicional Recomendada e Referências Bibliográficas . . . . .	129
4.6 Resumo e Conclusões . . . . .	129
4.6.1 Resumo . . . . .	129
4.6.2 Conclusões . . . . .	131
 <b>CAPÍTULO 5</b>	
<b>MATERIAIS HÍBRIDOS – COMPÓSITOS . . . . .</b>	<b>133</b>
5.1 Compósitos. . . . .	133
5.2 Concreto . . . . .	137
5.3 Fabricação de Componentes de Materiais Híbridos para Equipamentos, Instalações e Produtos de Uso Geral. . . . .	138
5.4 Leitura Adicional Recomendada e Referências Bibliográficas . . . . .	138

5.5	Resumo e Conclusões	139
5.5.1	Resumo	139
5.5.2	Conclusões	140

## **CAPÍTULO 6**

<b>PERDA DE INTEGRIDADE DOS MATERIAIS – PROCESSOS DE DETERIORAÇÃO E DE FALHAS EM SERVIÇO</b>		<b>141</b>
6.1	Erosão	142
6.2	Cavitação	142
6.3	Fragilização ou Fissuração Induzida pela Pressão de Hidrogênio	143
6.4	Fadiga	144
6.5	Fluência	146
6.6	Desgaste Mecânico	146
6.7	Fratura Mecânica	146
6.8	Carbonetação	147
6.9	Descarbonetação	147
6.10	Perda de Integridade por Processos Corrosivos	148
6.10.1	Corrosão Eletroquímica	149
6.10.2	Corrosão Química ou Oxidação em Altas Temperaturas	176
6.11	Avaliação de Integridade	182
6.12	Leitura Adicional Recomendada e Referências Bibliográficas	185
6.13	Resumo e Conclusões	185
6.13.1	Resumo	185
6.13.2	Conclusões	187

## **CAPÍTULO 7**

<b>AMPLIAÇÃO DA RESISTÊNCIA DOS MATERIAIS AOS PROCESSOS DE DETERIORAÇÃO</b>		<b>189</b>
7.1	Materiais Revestidos	190
7.1.1	Mecanismos de Proteção Anticorrosiva de Revestimentos	190
7.1.2	Revestimentos Metálicos	192
7.1.3	Revestimentos não Metálicos Inorgânicos	195
7.1.4	Revestimentos Orgânicos	198
7.2	Ampliação da Resistência à Corrosão pelo Controle da Corrosividade do Meio	210
7.2.1	Controle de Corrosão por Inibidores	211
7.2.2	Controle de Corrosão por Outros Métodos de Modificação do Meio	213
7.2.3	Resumo das Modificações de Meios Corrosivos	214

7.3	Ampliação da Resistência à Corrosão com o uso de Proteção Catódica e Proteção Anódica . . . . .	216
7.3.1	Proteção Catódica . . . . .	216
7.3.2	Proteção Anódica . . . . .	229
7.3.3	Comparação da Ampliação da Resistência à Corrosão por Proteção Catódica e Anódica . . . . .	237
7.4	Ampliação da Resistência à Corrosão por Projeto Adequado . . . . .	238
7.4.1	Práticas de Projeto . . . . .	238
7.4.2	Práticas de Proteção Anticorrosivas na Fase de Projeto . . . . .	241
7.5	Avaliação da Resistência à Corrosão através da Monitoração . . . . .	241
7.5.1	Sistemas de Monitoração em Tempo Real ou de Curto Intervalo de Tempo . . . . .	242
7.5.2	Sistemas de Monitoração de Acompanhamento . . . . .	247
7.5.3	Sistema de Monitoração da Corrosão <i>a Posteriori</i> . . . . .	252
7.5.4	Resumo das Técnicas de Monitoração . . . . .	252
7.6	Leitura Adicional Recomendada e Referências Bibliográficas . . . . .	255
7.7	Resumo e Conclusões . . . . .	255
7.7.1	Resumo . . . . .	255
7.7.2	Conclusões . . . . .	256
 <b>CAPÍTULO 8</b>		
<b>CUSTO – ASPECTOS ECONÔMICOS – DISPONIBILIDADE . . . . .</b>		<b>257</b>
8.1	Custo Relativo de Materiais . . . . .	258
8.2	Leitura Adicional Recomendada e Referências Bibliográficas . . . . .	260
8.3	Resumo e Conclusões . . . . .	261
8.3.1	Resumo . . . . .	261
8.3.2	Conclusão . . . . .	261
 <b>CAPÍTULO 9</b>		
<b>CRITÉRIOS DE SELEÇÃO DE MATERIAIS . . . . .</b>		<b>263</b>
9.1	Critérios para Especificação de Materiais . . . . .	263
9.2	Critérios Gerais de Seleção de Materiais . . . . .	264
9.2.1	Materiais Metálicos Ferrosos . . . . .	265
9.2.2	Materiais Metálicos Não Ferrosos . . . . .	267
9.2.3	Materiais não Metálicos Poliméricos – Plásticos . . . . .	268
9.2.4	Materiais não Metálicos Poliméricos – Fibrosos . . . . .	271
9.2.5	Materiais não Metálicos Poliméricos – Elastoméricos . . . . .	272
9.2.6	Materiais não Metálicos Cerâmicos e Vítreos . . . . .	272
9.2.7	Materiais não Metálicos Carbonáceos . . . . .	273
9.2.8	Materiais Híbridos – Compósitos . . . . .	274



9.3 Materiais para Instalações e Equipamentos Estáticos . . . . .	274
9.4 Materiais para Instalações e Equipamentos Dinâmicos. . . . .	278
9.5 Leitura Adicional Recomendada e Referências Bibliográficas . . . . .	279
9.6 Resumo e Conclusões . . . . .	279
9.6.1 Resumo . . . . .	279
9.6.2 Conclusões . . . . .	281

## **CAPÍTULO 10**

<b>APLICAÇÕES TÍPICAS DE MATERIAIS . . . . .</b>	<b>283</b>
10.1 Equipamentos e Instalações Industriais (Vasos de Pressão – Tanques – Tubulações Industriais – Máquinas de Fluxo – Fornos – Caldeiras – Reatores) . . . . .	283
10.1.1 Vasos de Pressão e Esferas . . . . .	283
10.1.2 Tanques Metálicos de Armazenamento. . . . .	284
10.1.3 Tubulações Industriais . . . . .	284
10.1.4 Permutadores de Calor . . . . .	285
10.1.5 Máquinas de Fluxo . . . . .	286
10.1.6 Equipamentos que Trabalham a Quente (Fornos, Caldeiras, Turbinas e Reatores). . . . .	286
10.2 Instalações Elétricas . . . . .	287
10.3 Equipamentos de Transporte. . . . .	287
10.4 Dutos e Equipamentos de Transporte Dutoviário . . . . .	288
10.5 Estruturas Metálicas . . . . .	289
10.6 Equipamentos de Atracação de Navios e Embarcações, Plataformas Fixas de Produção de Petróleo, Plataformas de Perfuração (Autoelevatórias e Semissubmersíveis), Plataformas de Produção (Semissubmersíveis e FPSO) . . . . .	289
10.7 Instalações de Transporte e Tratamento de Resíduos Líquidos e Sólidos. . . . .	290
10.8 Materiais para Aplicações Específicas: Materiais Refratários – Isolantes Elétricos e Térmicos – Condutores Elétricos e Térmicos – Semicondutores – Ânodos – Biomateriais –Materiais de Segurança – Resistentes à Corrosão Atmosférica, pela Água e pelo Solo – Materiais Resistentes a Produtos Químicos . . . . .	291
10.8.1 Materiais Refratários . . . . .	291
10.8.2 Materiais Isolantes Térmicos . . . . .	291
10.8.3 Materiais Isolantes Elétricos . . . . .	292
10.8.4 Materiais Condutores Elétricos. . . . .	292
10.8.5 Materiais Supercondutores Elétricos . . . . .	292

10.8.6	Materiais Semicondutores Elétricos . . . . .	293
10.8.7	Materiais Condutores Térmicos . . . . .	293
10.8.8	Âodos. . . . .	293
10.8.9	Biomateriais . . . . .	294
10.8.10	Materiais de Segurança. . . . .	295
10.8.11	Materiais Resistentes à Corrosão Atmosférica, pela Água e pelo Solo . . . . .	295
10.8.12	Materiais Resistentes a Produtos Químicos . . . . .	296
10.9	Materiais de Uso Geral (Utensílios Domésticos, Brinquedos e Outros) . . . . .	297
10.9.1	Materiais para Utensílios Domésticos . . . . .	297
10.9.2	Materiais para Brinquedos . . . . .	297
10.10	Leitura Adicional Recomendada e Referências Bibliográficas . . . . .	298
10.11	Resumo e Conclusões . . . . .	299
10.11.1	Resumo . . . . .	299
10.11.2	Conclusões . . . . .	299
<b>CAPÍTULO 11</b>		
<b>TENDÊNCIAS NO USO DOS MATERIAIS. . . . . 301</b>		
11.1	Substituição de Materiais Metálicos. . . . .	301
11.1.1	CrITÉRIOS de Substituição. . . . .	302
11.1.2	Uso de Materiais não Metálicos em Substituição aos Metálicos	302
11.2	Impactos Ambientais e Sustentabilidade do Uso de Materiais. . . . .	306
11.3	Leitura Adicional Recomendada e Referências Bibliográficas . . . . .	307
11.4	Resumo e Conclusões . . . . .	307
11.4.1	Resumo . . . . .	307
11.4.2	Conclusões . . . . .	307
<b>APÊNDICE I</b>		
<b>REVISÃO DE TÓPICOS DE QUÍMICA APLICÁVEIS À OBTENÇÃO DOS MATERIAIS E AOS PROCESSOS DE DETERIORAÇÃO . . . . . 309</b>		
I.1	Conceitos Gerais. . . . .	309
I.1.1	Elementos Químicos . . . . .	309
I.1.2	Ligações Interatômicas para Formação das Substâncias . . . . .	311
I.1.3	Substâncias . . . . .	312
I.2	Revisão de Conceitos Básicos de Química Inorgânica . . . . .	312
I.2.1	Oxidação e Redução. . . . .	312
I.2.2	Ácidos. . . . .	312
I.2.3	Bases ou Hidróxidos – Alcalinidade . . . . .	313

I.2.4 Sais . . . . .	313
I.2.5 Óxidos . . . . .	314
I.2.6 As Substâncias Químicas Inorgânicas na Natureza . . . . .	314
I.2.7 Reações Químicas e Cálculo Estequiométrico . . . . .	314
I.2.8 Equivalente Grama e Concentração de Soluções . . . . .	315
I.2.9 Eletrólise . . . . .	316
I.2.10 Equilíbrio Químico . . . . .	317
I.2.11 Hidrólise de Sais . . . . .	318
I.3 Revisão de Conceitos Básicos de Química Orgânica . . . . .	318
I.3.1 O Átomo de Carbono . . . . .	318
I.3.2 As ligações do Átomo de Carbono . . . . .	319
I.3.3 Propriedades Gerais das Moléculas Orgânicas . . . . .	320
I.3.4 Fórmulas Estruturais . . . . .	320
I.3.5 Classificação das Cadeias Carbônicas . . . . .	321
I.3.6 Isomeria . . . . .	324
I.3.7 Compostos Orgânicos de Carbono e Hidrogênio – Hidrocarbonetos	325
I.3.8 Compostos Orgânicos de Carbono, Hidrogênio e Oxigênio – Compostos Oxigenados . . . . .	327
I.3.9 Compostos Orgânicos de Carbono, Hidrogênio e Halogênio – Compostos Halogenados . . . . .	329
I.3.10 Compostos Orgânicos de Carbono, Hidrogênio e Nitrogênio – Compostos Nitrogenados . . . . .	330
I.3.11 Outras Funções . . . . .	331
I.3.12 Síntese das Funções Orgânicas . . . . .	332
I.4 Leitura Adicional Recomendável . . . . .	332

## APÊNDICE II

### MATERIAIS METÁLICOS – OBTENÇÃO – ESTRUTURA – LIGAS –

#### TRATAMENTOS . . . . . **333**

II.1 Processos de Redução Primária . . . . .	333
II.1.1 Redução Primária do Ferro . . . . .	333
II.1.2 Redução Primária do Alumínio . . . . .	333
II.1.3 Redução Primária do Cobre . . . . .	334
II.1.4 Redução Primária do Zinco . . . . .	334
II.1.5 Redução Primária do Estanho . . . . .	334
II.1.6 Impurezas Provenientes dos Processos de Redução Primária . .	335
II.2 Processos de Refino . . . . .	335
II.3 Estrutura Cristalina . . . . .	337

II.4	Tratamentos	339
II.4.1	Tratamentos Térmicos	339
II.4.2	Tratamentos Mecânicos	342
II.4.3	Tratamentos Termoquímicos	342
II.5	Leitura Adicional Recomendada	342
<b>APÊNDICE III</b>		
<b>MATERIAIS NÃO METÁLICOS – OBTENÇÃO E FATORES INFLUENTES NAS</b>		
<b>CARACTERÍSTICAS E PROPRIEDADES. . . . . 343</b>		
III.1	Obtenção de Materiais Poliméricos	343
III.2	Obtenção de Materiais Cerâmicos	345
III.3	Obtenção de Materiais Carbonáceos	347
<b>APÊNDICE IV</b>		
<b>SISTEMAS DE MEDIDAS – INTERNACIONAL – INGLÊS – PRÁTICO . . . . . 349</b>		
IV.1	Unidades da Grandeza Comprimento.	349
IV.2	Unidades da Grandeza Área	350
	Unidades de Uso Prático.	350
IV.3	Unidades da Grandeza Volume	350
IV.4	Unidades da Grandeza Massa	351
IV.5	Unidades da Grandeza de Pressão/Tensão	351
	Unidades de Uso Prático.	351
IV.6	Unidades da Grandeza de Energia	351
	Unidades de Uso Prático.	352
IV.7	Unidades da Grandeza de Vazão	352
<b>APÊNDICE V</b>		
<b>EXERCÍCIOS E PROBLEMAS DE SELEÇÃO MATERIAIS. . . . . 353</b>		
	Capítulo 1	353
	Capítulo 2	353
	Capítulo 3	355
	Capítulo 4	356
	Capítulo 5	357
	Capítulo 6	358
	Capítulo 7	360
	Ampliação da Resistência à Corrosão pelo Uso de Revestimentos	
	Protetores	360
	Ampliação da Resistência à Corrosão pelo Controle da Corrosividade	
	do Meio	361

Ampliação da Resistência à Corrosão pelo Uso de Proteção Catódica e Anódica . . . . .	361
Ampliação de Resistência à Corrosão por Projeto Adequado . . . . .	361
Monitoração da Corrosão . . . . .	362
Capítulo 8 . . . . .	362
Capítulo 9 . . . . .	362
Capítulo 10 . . . . .	364
<b>REFERÊNCIAS . . . . .</b>	<b>367</b>
<b>ÍNDICE REMISSIVO . . . . .</b>	<b>371</b>