TECNOLOGIA MECÂNICA

Materiais de Construção Mecânica

VOL. III

2ª edição

McGraw-Hill

COMPRA

TECNOLOGIA MECÂNICA

PROCESSOS DE FABRICAÇÃO E TRATAMENTO

VOLUME III

2ª edição

CÓPIA NÃO AUTORIZADA É CRIME
ABDR
ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE DIREITOS REPROGRÁFICOS
RESPEITE O DIREITO AUTORAL

EDITORA AFILIADA

0 07 92 5567
K.08

VICENTE CHIAVERINI

Professor Titular da Escola Politécnica
da Universidade de São Paulo
Membro Honorário da Associação Brasileira de Metais

TECNOLOGIA MECÂNICA

PROCESSOS DE FABRICAÇÃO E TRATAMENTO

VOLUME III

2ª edição

[illegible]

MAKRON *Books* do Brasil Editora Ltda.
Editora McGraw-Hill Ltda.
São Paulo
Rua Tabapuã, 1105, Itaim-Bibi
CEP 04533 -905
(011) 829-8604 e (011) 820-8528

Rio de Janeiro • *Lisboa* • *Porto* • *Bogotá* • *Buenos Aires* • *Guatemala* • *Madrid* • *México* • *New York* • *Panamá* • *San Juan* • *Santiago*

Auckland • Hamburg • Kuala Lumpur • London • Milan • Montreal • New Delhi • Paris • Singapore • Sydney • Tokyo • Toronto

Copyright © 1977, 1986 da Editora McGraw-Hill Ltda.

Todos os direitos para a língua portuguesa reservados pela Editora McGraw-Hill Ltda.

Nenhuma parte desta publicação poderá ser reproduzida, guardada pelo sistema "retrieval" ou transmitida de qualquer modo ou qualquer outro meio, seja este eletrônico, mecânico, de fotocópia, de gravação, ou outros, sem prévia autorização, por escrito, da Editora.

Editor: Alberto da Silveira Nogueira Jr.
Coordenadora de Revisão: Daisy Pereira Daniel
Supervisor de Produção: Edson Sant'Anna
Capa: Lay out: Cyro Giordano
Arte final: Jaime Marques

Dados de Catalogação na Publicação (CIP) Internacional
(Câmara Brasileira do Livro, SP, Brasil)

C458t
v. 1-3
2. ed.

Chiaverini, Vicente, 1914–
Tecnologia mecânica / Vicente Chiaverini. –
2. ed. – São Paulo : McGraw-Hill, 1986.

Bibliografia.
Conteúdo: v. 1. Estrutura e propriedades das ligas metálicas. – v. 2. Processos de fabricação e tratamento. – v.3. Materiais de construção mecânica.

1. Engenharia mecânica 2. Mecânica aplicada I. Título.

85-2045

CDD-621
-620.1

Índices para catálogo sistemático:
1. Engenharia mecânica 621
2. Mecânica aplicada 620.1

Departamento de Administração
Divisão de Material e Patrimônio
SEÇÃO DE PATRIMÔNIO
Ficha Nº 69247
Data do Lançamento ____/____/____
Comprovante de Lançamento Nº ____

À minha esposa

A meus filhos

SUMÁRIO

PREFÁCIO XVII

I – PRODUÇÃO DO FERRO – MATÉRIAS-PRIMAS DA INDÚSTRIA SIDERÚRGICA 1

1. Introdução 1
2. Matérias-primas da indústria siderúrgica 6
2.1. Minério de ferro 6
2.1.1. Beneficiamento do minério de ferro 9
2.1.1.1. Sinterização 9
2.1.1.2. Pelotização 10
2.2. Carvão 10
2.2.1. Carvão coque 11
2.2.2. Carvão vegetal 13
2.3. Fundente 15
2.4. Outras matérias-primas da indústria siderúrgica 16

II – PRODUÇÃO DO FERRO GUSA; ALTO-FORNO 17

1. Introdução 17
2. Construção do alto-forno 17
3. Operação do alto-forno 23
3.1. Produtos do alto-forno 27
3.2. Técnicas para aumentar a produção do alto-forno ... 28
3.2.1. Elevação da temperatura do ar soprado e controle de sua umidade 28
3.2.2. Injeção de combustível através das ventaneiras . 28
3.2.3. Adição de oxigênio no ar 29
3.2.4. Operação a alta pressão 29

III – FABRICAÇÃO DO AÇO 30
1. Introdução 30
2. Processos pneumáticos 31
2.1. Operação do conversor Bessemer 33
2.2. Conversor Thomas 35
2.3. Conversor de sopro lateral 37
2.4. Conversor de sopro pelo topo 37
3. Processo Siemens-Martin 40
3.1. Operação dos fornos Siemens-Martin 43
4. Processo duplex 46
5. Processos elétricos 46

IV – PROCESSOS DE REDUÇÃO DIRETA 47
1. Introdução 47
2. Processo SL/RN 47
3. Processo Hoganaes 48
4. Processo Wiberg-Soderfors 49
5. Processo Midrex 50
6. Processo Hyl 50

V – PROCESSOS DE FUNDIÇÃO CONTÍNUA 51

VI – PRODUÇÃO DE METAIS NÃO-FERROSOS 53
1. Introdução 53
2. Cobre 53
3. Alumínio 57
3.1. Obtenção da alumina 58
3.2. Eletrólise da alumina 58
4. Zinco 60
5. Estanho 62
6. Chumbo 63

VII – LIGAS FERROSAS – DIAGRAMA DE EQUILÍBRIO FERRO-CARBONO 66
1. Definições 66
2. Diagrama de equilíbrio Fe-C 67
2.1. Reações que ocorrem na faixa de composições correspondentes aos aços 70
2.2. Reações que ocorrem na faixa de composições correspondentes aos ferros fundidos 72
2.3. Ligas Fe-C-Si 74
3. Fatores que influem na posução das linhas de transformação do diagrama de equilíbrio Fe-C 76

3.1. Aquecimento ou resfriamento 76
3.2. Presença de elementos de liga 76

VIII – DIAGRAMA TRANSFORMAÇÃO-TEMPO-TEMPERATURA 78
1. Introdução 78
2. Diagrama de transformação isotérmica ou curvas em C ou TTT 78
2.1. Curvas TTT para vários tipos de aços 83
3. Diagrama de transformação para resfriamento contínuo . 84
4. Efeitos da seção das peças 86
5. Fatores que influem na posição das linhas em C 89
5.1. Composição química 89
5.2. Tamanho de grão 91
5.3. Homogeneidade da austenita 91
6. Temperabilidade ou endurecibilidade 91
6.1. Fatores que afetam a temperabilidade 93

IX – TRATAMENTOS TÉRMICOS E TERMOQUÍMICOS DAS LIGAS FERRO-CARBONO 96
1. Introdução 96
2. Recozimento e normalização 96
2.1. Recozimento 96
2.2. Normalização 99
3. Têmpera e revenido 100
3.1. Têmpera e revenido dos ferros fundidos 103
4. Coalescimento 103
5. Têmpera superficial 103
6. Tratamentos isotérmicos 104
6.1. Austêmpera 104
6.2. Martêmpera 106
7. Tratamentos termoquímicos 106
7.1. Cementação 106
7.1.1. Cementação sólida ou "em caixa 108
7.1.2. Cementação gasosa 109
7.1.3. Cementação líquida 109
7.1.4. Cementação sob vácuo 111
7.1.5. Tratamentos térmicos da cementação 112
7.2. Nitretação 113
7.2.1. Nitretação a gás 113
7.2.2. Nitretação líquida ou em banho de sal 113
7.3. Cianetação 114
7.4. Carbonitretação 114
7.5. Boretação 114

X – AÇOS PARA CONSTRUÇÃO MECÂNICA 115
1. Introdução 115
2. Sistemas de classificação dos aços 115
3. Composição química e propriedades dos aços-carbono . 116
4. Efeitos dos elementos de liga nos aços 119
5. Tipos de aços 121
5.1. Aços para fundição 123
5.1.1. Aços-carbono para fundição 124
5.1.2. Aços-liga para fundição 124
5.2. Aços estruturais 125
5.3. Aços para chapas 128
5.4. Aços para tubos 130
5.5. Aços para arames e fios; aços para molas 131
5.5.1. Aços para molas 133
5.6. Aços de usinagem fácil 136
5.7. Aços para cementação e nitretação 138
5.7.1. Aços para cementação 138
5.7.2. Aços para nitretação 139
5.8. Aços para fins especiais 140
5.8.1. Aços resistentes ao desgaste 140
5.8.2. Aços carbono-cromo 141
5.8.3. Aços ultra-resistentes 141
5.8.4. Aços grafíticos 143
5.8.5. Aços criogênicos 143
6. Conclusão 144

XI – FERRO FUNDIDO, FERRO MALEÁVEL, FERRO NODULAR 146
1. Introdução 146
2. Ferro fundido branco 149
3. Ferro fundido cinzento 151
4. Ferro maleável 160
5. Ferro nodular 163

XII – COBRE E SUAS LIGAS 169
1. Introdução 169
2. Metal cobre 169
3. Ligas de cobre de baixo teor em liga 173
4. Ligas de cobre de alto teor em liga 175
4.1. Latões 175
4.1.1. Latões especiais 178
4.1.2. Latões para fundição 178
4.2. Bronzes 181

4.2.1. Bronzes para mancais 184
4.3. Ligas cupro-níquel 184
4.3.1. Ligas cobre-níquel-zinco 186
4.4. Ligas cobre-alumínio 187
4.5. Ligas cobre-berílio 187
4.6. Ligas cobre-silício 188
5. Tratamentos térmicos do cobre e suas ligas 188
5.1. Homogeneização 188
5.2. Recozimento 188
5.3. Alívio de tensões 188
5.4. Solubilização e endurecimento por precipitação 189

XIII – ALUMÍNIO E SUAS LIGAS 190
1. Metal alumínio 190
2. Ligas de alumínio 191
2.1. Tratamento térmico das ligas de alumínio 192
2.2. Ligas de alumínio trabalhadas 194
2.3. Ligas de alumínio tratadas termicamente 196
2.4. Ligas fundidas 199
2.4.1. Ligas de alumínio para veículos 202
2.4.2. Ligas de alumínio super-resistentes 202
3. Aplicações do alumínio e suas ligas 203

XIV – CHUMBO, ESTANHO, ZINCO E SUAS LIGAS 204
1. Chumbo 204
1.1. Tipos de chumbo e suas ligas 205
2. Estanho 206
3. Zinco 208

XV – OUTROS METAIS E LIGAS NÃO-FERROSOS 212
1. Níquel 212
2. Magnésio 213
3. Titânio 214

XVI – MATERIAIS PARA FERRAMENTAS E MATRIZES 216
1. Introdução 216
2. Aços 218
2.1. Aços temperáveis em água 220
2.2. Aços indeformáveis ou para trabalho a frio 221
2.3. Aços resistentes ao choque 222
2.4. Aços para trabalho a quente 222
2.5. Aços rápidos 224
2.5.1. Seleção dos aços rápidos 228

2.5.2. Aços semi-rápidos 229
2.6. Outros tipos de aços para ferramentas e matrizes 229
3. Metal duro ou carbonetos duros sinterizados 231
3.1. Característicos gerais do metal duro 231
3.2. Classes de metal duro 235
3.3. Seleção do metal duro para usinagem 240
3.4. Tratamento superficial do metal duro 245
3.5. Outras aplicações do metal duro 245
3.6. Cermets 245
4. Ligas fundidas 245
5. Materiais cerâmicos 247
6. Outros materiais para ferramentas e matrizes 248
7. Conclusões 249

XVII – MATERIAIS RESISTENTES À CORROSÃO E AO CALOR . 250
1. Introdução 250
2. Aços inoxidáveis 252
2.1. Tipos de aços inoxidáveis 255
2.1.1. Aços inoxidáveis martensíticos 256
2.1.2. Aços inoxidáveis ferríticos 257
2.1.3. Aços inoxidáveis austeníticos 257
2.1.4. Outros tipos de aços inoxidáveis 259
3. Ligas não-ferrosas resistentes à corrosão 259
4. Aços resistentes ao calor ou refratários 261
4.1. Aços-cromo resistentes ao calor 261
4.2. Aços-cromo-níquel resistentes ao calor 262
4.3. Aços ao níquel-cromo resistentes ao calor 263
5. Ligas não-ferrosas resistentes ao calor 263
5.1. Ligas resistentes ao calor fundidas 263
5.2. Ligas resistentes ao calor trabalhadas 266
5.3. Outros tipos de ligas resitentes ao calor 266
5.4. Ligas para elementos de resistência elétrica 266

XVIII – MATERIAIS PARA FINS ELÉTRICOS E MAGNÉTICOS . . . 268
1. Introdução 268
2. Materiais magneticamente moles 270
2.1. Ligas ferro-silício 270
2.2. Ligas ferro-níquel 272
2.3. Ligas ferro-cobalto 272
3. Materiais com permeabilidade constante 272
4. Materiais magneticamente duros 272
4.1. Aços martensíticos 274
4.2. Ligas endurecíveis por precipitação 274

XIX – PRODUTOS DA METALURGIA DO PÓ 277
1. Introdução 277
2. Metais refratários 278
3. Ligas pesadas 281
4. Materiais porosos 283
5. Materiais para contactos elétricos 285
5.1. Materiais "metal-grafita" 285
5.2. Materiais compostos ou "pseudoligas" 288
6. Materiais de fricção sinterizados 290
7. Ferro e aço sinterizados 292
8. Materiais magnéticos 298
9. Metais e ligas não-ferrosos produzidos por metalurgia do pó 298
9.1. Cobre e suas ligas 299
9.2. Alumínio e suas ligas 299
10. Ferritas 299
11. Conclusões 304

XX – CIMENTO E CONCRETO 306
1. Introdução 306
2. Cimento portland 306
2.1. Outros tipos de cimento 308
3. Concreto 309
3.1. Propriedades do concreto 309
3.2. Dosagem racional do concreto 312
3.3. Aditivos para concreto 313

XXI – MADEIRAS 315
1. Introdução 315
2. Constituição da madeira 316
3. Classificação das madeiras 317
4. Característicos físicos e mecânicos da madeira 317
5. Defeitos e enfermidades das madeiras 321
6. Preservação da madeira 322
7. Aplicações das madeiras 322

XXII – MATERIAIS PLÁSTICOS 324
1. Constituição dos plásticos 324
2. Grupos de plásticos 328
3. Propriedades dos polímeros 329
4. Aditivos 330
5. Principais tipos de plásticos 331
5.1. Termoplásticos 331

5.1.1. Olefínicos 331
5.1.2. Poliestirenos 332
5.1.3. Vinílicos 333
5.1.4. Acrílicos 333
5.1.5. Celulósicos 334
5.1.6. Náilon (Poliamidas) 335
5.1.7. Acetais 335
5.1.8. Policarbonatos 335
5.1.9. ABS ou acrilonitrila-butadieno-estireno 336
5.1.10. Fluoroplásticos 336
5.1.11. Óxidos polifenilenos 337
5.1.12. Superpolímeros 337
5.2. Plásticos termoestáveis (ou termofixos) 337
5.2.1. Fenólicos 338
5.2.2. Poliésteres 338
5.2.3. Alquidos 339
5.2.4. Alílicos 339
5.2.5. Epóxis 339
5.2.6. Aminos 340
5.2.7. Silicones 340
5.2.8. Uretanos 340
6. Ligas plásticas 340
7. Processos de fabricação de peças em material plástico. 343

XXIII – MATERIAIS CERÂMICOS 346
1. Introdução 346
2. Propriedades 348
3. Tipos de materiais cerâmicos 349
3.1. Faiança e porcelana 349
3.2. Refratários comuns 349
3.3. Óxidos 350
3.4. Outros tipos de materiais cerâmicos 353
4. Vidro 353
4.1. Tipos de vidros 354

XXIV – MATERIAIS COMPÓSITOS 356
1. Introdução 356
2. Tipos de compósitos 357
2.1. Compósitos fibrosos 358
2.2. Compósitos particulados 359
2.3. Compósitos lamelas 359
2.4. Compósitos escamados 361
2.5. Compósitos enchidos 361

Apêndice 362
Questões e Exercícios 366
Bibliografia 376
Índice Analítico 382

PREFÁCIO

Os metais são os materiais mais empregados na construção mecânica. Os primeiros dois volumes desta obra foram dedicados ao estudo de sua estrutura cristalina, à análise das suas propriedades mecânicas e a uma apresentação dos processos de fabricação e tratamento de produtos metálicos.

Neste terceiro volume, o autor aborda os metais e suas principais ligas sob os pontos de vista de constituição, propriedades específicas e aplicações, dentro da profundidade possível numa obra desse tipo.

Dos metais, o ferro é o mais importante, sendo de supor-se que essa posição será mantida por um espaço de tempo praticamente ilimitado, em face de certas peculiaridades características desse metal, que o torna insubstituível para a maioria dos empregos da indústria mecânica: suas propriedades intrínsecas, sua abundância na crosta terrestre e seu baixo custo de extração e processamento, principalmente quando comparado a outros metais importantes.

Sendo o minério de ferro a matéria-prima básica para a produção do aço e possuindo o Brasil enormes reservas de minério com alto teor de ferro, o país possui condições extremamente favoráveis para a implantação de um grande parque siderúrgico, destinado não somente ao consumo interno, como igualmente à exportação.

Em 1984, o país situou-se em oitavo lugar entre os produtores mundiais de aço em lingotes, com uma produção de cerca de 18,4 milhões de toneladas, parcela ponderável da qual foi exportada(1).

No que diz respeito aos metais não-ferrosos a situação atual do Brasil é significativamente mais favorável que há alguns anos, em face das novas reservas encontradas e dos investimentos realizados no setor.

O alumínio, por exemplo, teve em 1984 uma produção de pouco mais de 450.000 toneladas, com um consumo aparente interno de cerca de 300.000 toneladas[1].

A situação evoluiu do mesmo modo favorável em relação ao cobre, chumbo, zinco, estanho e níquel, embora, em alguns desses metais, o país dependa ainda de importação.

Neste terceiro volume da obra TECNOLOGIA MECÂNICA, o autor abordará, igualmente, ainda que em menor profundidade, alguns materiais de construção não-metálicos, de menor interesse imediato para o engenheiro mecânico e industrial, mas cujo conhecimento é conveniente, em face de condições imprevistas que freqüentemente são encontradas em serviço.

CAPÍTULO I

PRODUÇÃO DO FERRO – MATÉRIAS-PRIMAS DA INDÚSTRIA SIDERÚRGICA

1 – Introdução Dada a importância do ferro na Idade Moderna, a siderurgia deve ser considerada como um setor básico e prioritário para o desenvolvimento industrial e econômico.

A indústria siderúrgica abrange todas as etapas necessárias para, a partir das matérias-primas, produzir-se ferro e aço. O processo clássico e mais usado para a redução do minério de ferro é o do "alto-forno", cujo produto consiste numa liga ferro-carbono de alto teor de carbono, denominado "ferro gusa", o qual, ainda no estado líquido, é encaminhado à "aciaria", onde, em fornos adequados, é transformado em aço. Este é vazado na forma de "lingotes", os quais, por sua vez, são submetidos à transformação mecânica, por intermédio de laminadores, resultando "blocos", "tarugos" e "placas". Estes, finalmente, ainda por intermédio de laminadores, são transformados em formas estruturais como "tês", "duplos tês", "cantoneiras" etc., e em outros produtos siderúrgicos importantes, tais como trilhos, chapas, barras etc.

A Figura 1[2] representa, esquematicamente, as principais etapas para a fabricação de determinados produtos de aço, pelo processo do alto-forno, a partir do minério de ferro.

O ferro é um metal cuja utilização pelo homem é muito antiga. As civilizações antigas de Assíria, Babilônia, Egito, Pérsia, China, Índia e, mais tarde, da Grécia e de Roma já fabricavam, por processos primitivos, armas e inúmeros utensílios de ferro e aço. Do mesmo modo, muitos utensílios de ferro foram encontrados em sítios ocupados por povos pré-históricos.

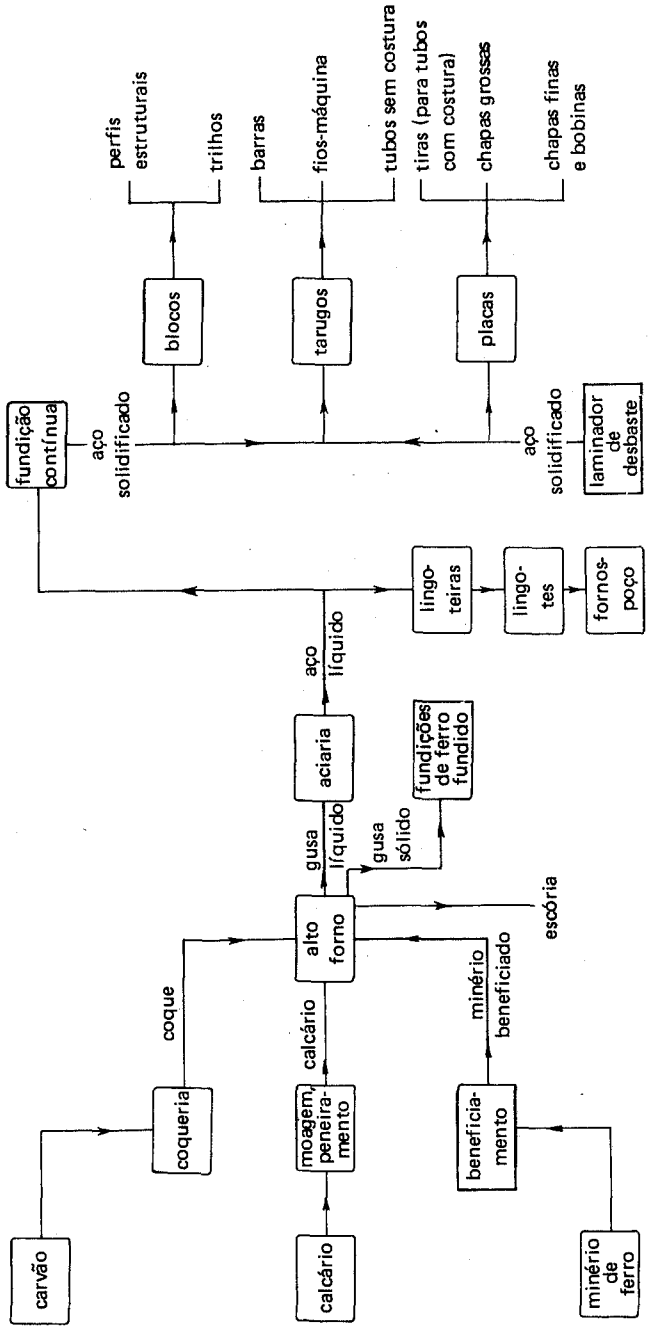


Figura 1 *Representação esquemática das principais etapas de fabricação de aço pelo processo clássico de alto-forno, a partir do minério de ferro.*

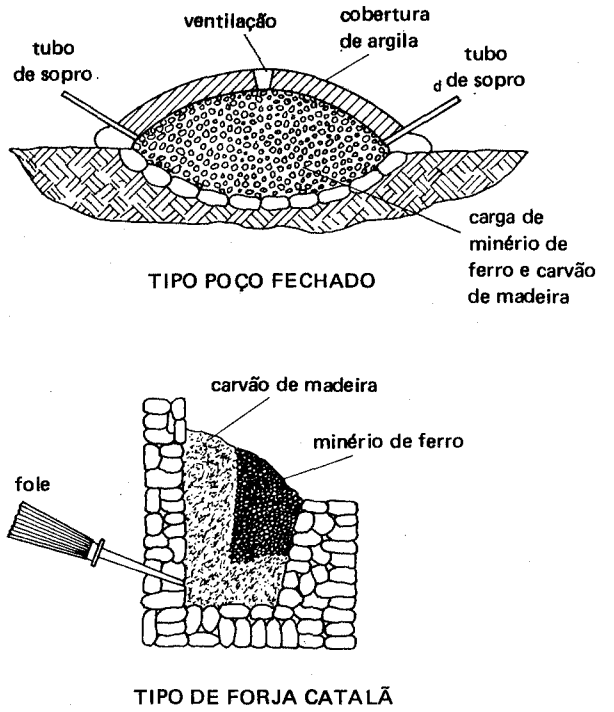


Figura 2 *Fornos primitivos utilizados na redução do minério de ferro, pelo emprego de carvão vegetal como combustível.*

A Figura 2[2] apresenta alguns fornos primitivos utilizados na redução do minério de ferro, pelo emprego do carvão vegetal como combustível. Como o carvão vegetal é constituído principalmente de carbono, e o minério de ferro, principalmente de óxido de ferro, na combustão do carvão vegetal, auxiliada pelo oxigênio do ar, forma-se inicialmente anidrido carbônico – CO_2 – e, em seguida, óxido de carbono – CO. Este reage com o oxigênio dos óxidos contidos no minério de ferro, formando novamente anidrido carbônico e produzindo ferro metálico.

O ferro assim obtido apresentava-se em geral relativamente dúctil, mole, maleável e podia ser trabalhado por martelamento a temperaturas relativamente elevadas. Na realidade, os processos eram de "redução direta", sem que se formasse ferro inteiramente líquido; de fato, as temperaturas alcançadas não eram suficientes para liquefazer o metal, o qual se apresentava no estado pastoso, misturado com as impurezas do minério. O fundidor juntava, no fundo do forno, o material com o auxílio de uma vara metálica, formando-se uma bola que, depois de atingido um certo peso, era retirada e

martelada, para eliminar as impurezas, que se apresentavam na forma de uma escória. O resultado final era uma barra ou "lupa", posteriormente reaquecida e trabalhada por martelamento. Esse produto consiste no "ferro pudlado".

Em épocas mais recentes, a partir provavelmente do século XIII, o processo mais comum era o da "forja catalã", representada na Figura 2, na qual o material comumente obtido era exatamente o ferro pudlado.

Esses fornos primitivos podiam ser operados de modo a provocar a absorção pelo ferro de uma certa quantidade de carbono, por exemplo, até 1%. Esse material revelou-se mais duro e mais resistente que o ferro; além disso, o fenômeno mais importante então verificado foi a possibilidade de tornar o material muito mais duro, quando resfriado rapidamente em água ou outro meio líquido, a partir de altas temperaturas. Praticava-se, assim, um processo empírico de têmpera em ferro com carbono relativamente elevado.

Os altos-fornos foram desenvolvidos paulatinamente, à medida que se aumentava a altura dos fornos primitivos e foram inicialmente denominados "fornos de cuba" ou "fornos de chaminé". Neles, a carga de matéria-prima já era introduzida pelo topo, em intervalos, e o ar, pela parte inferior. Aparentemente, foram desenvolvidos em primeiro lugar na Europa Central[2].

O alto-forno de perfil já próximo ao dos atuais foi introduzido na Inglaterra em torno do ano de 1500; em 1619, na mesma Inglaterra, empregou-se pela primeira vez o coque como combustível e, ainda nesse país, por volta de 1800, foi adotado o princípio de aquecer o ar antes de introduzi-lo no forno.

A partir de então, sucederam-se os aperfeiçoamentos técnicos que levaram aos modernos fornos, descritos mais adiante.

No Brasil, os verdadeiros passos para dotar o país de uma indústria siderúrgica de porte foram dados a partir de 1930.

Antes, ocorreram iniciativas isoladas, algumas bem-sucedidas, de responsabilidade de indivíduos que, em face da grande potencialidade do mercado brasileiro e às enormes jazidas de minério de ferro já conhecidas, acreditavam que o país poderia, no decorrer do tempo, tornar-se um grande produtor de ferro e aço.

Embora o desenvolvimento siderúrgico brasileiro seja relativamente recente, o Brasil pode provavelmente ser considerado o pioneiro da siderurgia na América, graças à atuação de Afonso Sardinha, chamado por Pandiá Calógeras de "paulista ilustre, fundador da siderurgia brasileira"[3]. Afonso Sardinha construiu, em torno do ano de 1590, em Biraçoiaba, no distrito da vila de Sorocaba, em São Paulo, os primeiros engenhos de ferro do país. Os fornos construídos por Afonso Sardinha e seu filho eram semelhantes às forjas catalãs.

Essa iniciativa, entretanto, com a morte de Afonso Sardinha, o Moço, em 1604 e de Afonso Sardinha, o Velho, em 1616[4] não sobreviveu, mesmo porque ambos, nos últimos anos, se haviam engajado em outras atividades e aventuras.

Iniciativas idênticas, em outras províncias brasileiras, tiveram resultado semelhante. Somente mais tarde, sob o reinado de D. João VI, procurou-se reativar a exploração do minério de ferro e a produção do ferro, ainda junto às minas de Sorocaba.

Esse acontecimento deu-se por volta de 1810[5], tendo participado do mesmo os especialistas estrangeiros Varnhagen e Hedberg. A usina construída foi chamada Usina de Ipanema. Depois de vários insucessos, a primeira corrida de ferro gusa deu-se em 1º de novembro de 1818, graças principalmente à atuação de Varnhagen.

Mais ou menos na mesma época, por ação do Intendente Câmara, instalavam-se no Morro do Pilar (Minas Gerais) as "forjas do Morro do Pilar" (ou de Gaspar Soares)[3], que funcionaram durante cerca de sete anos, cessando a seguir suas atividades por dificuldades técnicas e outros obstáculos.

A primeira corrida de ferro gusa no Brasil foi obtida pelo Barão de Eschwege, mineralogista alemão, em dezembro de 1812, na fábrica construída em Congonhas do Campo, conhecida como a "Patriótica".

Em 1818, o engenheiro francês F. de Monlevade montava um baixo-forno em Caeté (MG) e em 1825 uma forja do tipo catalão[6], no local que hoje tem o seu nome, onde está instalada atualmente a Companhia Siderúrgica Belgo-Mineira.

Durante a Guerra do Paraguai foram reativados os fornos de Ipanema pelo Capitão Joaquim de Sousa Mursa. A fábrica, contudo, foi definitivamente fechada em 1895[6].

No período republicano, ocorreram as iniciativas que se consolidaram. A mais importante entre elas foi a fundação em 1919, em Belo Horizonte, da Companhia Siderúrgica Mineira, pelos engenheiros Amaro Lanari e Gil Guatimosim, transformada em 1921 em Companhia Siderúrgica Belgo-Mineira, mediante associação com um grupo luxemburguês[5]. Tornou-se, com o tempo, a Companhia Siderúrgica Belgo-Mineira uma das maiores senão a maior usina siderúrgica do mundo, utilizando como combustível o carvão vegetal.

O grande passo para o estabelecimento da grande siderurgia, baseada em carvão coque, foi dado durante o governo Getúlio Vargas, com a instituição, em 4 de março de 1940[5], da "Comissão Executiva do Plano Siderúrgico Nacional", constituída por Guilherme Guinle, Oscar Weinschenck, Ary F. Torres, Edmundo de Macedo Soares e Silva e Cap. Ten. Adolfo Martins

de Noronha Torrezão. Dos trabalhos dessa Comissão resultou a fundação da Companhia Siderúrgica Nacional em janeiro de 1941. A Usina foi construída em Volta Redonda, Estado do Rio e inaugurada em outubro de 1946.

Seguiram-se, ainda baseadas em carvão coque, a criação da Companhia Siderúrgica Paulista, sob a inspiração de Plínio de Queiroz, em Cubatão, SP, cuja operação foi iniciada em 1965 e da Usiminas – Usinas Siderúrgicas de Minas Gerais, fundada em 1956, com participação acionária japonesa, e onde desempenhou um papel importante o Eng.º Amaro Lanari Jr. A Usina foi construída na localidade de Ipatinga, MG, começando a funcionar em novembro de 1962.

Deve-se mencionar ainda o desempenho, na expansão da siderurgia brasileira, de outras usinas, como a Siderúrgica Belgo-Mineira, a Mannesmann, a Aliperti e o grande desenvolvimento da produção de aços fundidos e aços especiais, graças à atuação de empresas como Aços Villares, Acesita, Nossa Senhora Aparecida, Anhangüera e outras de menor porte, todas, contudo, prestando importante parcela de contribuição para o desenvolvimento siderúrgico do país.

2 – **Matérias-primas da Indústria Siderúrgica** As matérias-primas básicas da indústria siderúrgica são as seguintes:

- minério de ferro
- carvão
- calcário.

Outras matérias-primas, minérios principalmente, são igualmente importantes, sobressaindo-se o minério de manganês, pela sua presença constante em todos os tipos de produtos siderúrgicos.

O minério de ferro, como é óbvio, constitui a matéria-prima essencial, pois dele se extrai o ferro.

O carvão atua em três sentidos simultaneamente: como combustível, como redutor do minério, que é basicamente constituído de óxidos de ferro, e como fornecedor do carbono, que é o principal elemento de liga dos produtos siderúrgicos.

O calcário atua como "fundente", ou seja, reage, pela sua natureza básica, com as substâncias estranhas ou impurezas contidas no minério e no carvão – geralmente de natureza ácida – diminuindo seu ponto de fusão e formando a "escória", subproduto, por assim dizer, do processo clássico do "alto-forno".

2.1 **Minério de ferro** Os minerais que contêm ferro em quantidade apreciável são os óxidos, carbonatos, sulfetos e silicatos.

Os primeiros são os mais importantes sob o ponto de vista siderúrgico. Os principais óxidos são:

- *magnetita* (óxido ferroso-férrico) de fórmula Fe_3O_4, contendo 72,4% Fe;
- *hematita* (óxido férrico), de fórmula Fe_2O_3, contendo 69,9% Fe;
- *limonita* (óxido hidratado de ferro), de fórmula $2Fe_2O_3\ 3H_2O$, contendo, em média, 48,3% Fe.

A magnetita é encontrada principalmente na Suécia, ao passo que a hematita é o minério mais comum, sendo encontrado, entre outros países, na França, EUA, URSS, Índia, Austrália, Canadá e Brasil.

Segundo um estudo do "Steel Committee of the United Nations Economic Commission for Europe"[7], as principais reservas de minério de ferro, conhecidas e potenciais, estão distribuídas conforme mostra a Tabela 1.

TABELA 1

PRINCIPAIS RESERVAS CONHECIDAS E POTENCIAIS DE MINÉRIO DE FERRO

País	Reservas conhecidas		Reservas potenciais	
	milhões de t	teor de Fe, %	milhões de t	teor de Fe, %
EUA	4.925	22–60	73.940	22–57
Canadá	10.997	30–65	19.030	30–38
Brasil	37.757	54–70	15.557	53–70
Venezuela	2.000	63–68	–	–
França	8.017	30–42	–	–
Alemanha	1.500	27	1.660	27
Espanha	1.240	48–53	1.223	48–53
Suécia	3.370	32–61	–	–
Inglaterra	3.162	20–56	–	–
África do Sul	8.600	40–60	grandes	40–60
Índia	7.239	39–69	2.130	29–69
Austrália	1.000	62–64	–	–

A URSS não foi incluída no referido estudo, mas sabe-se que esse país possui imensas jazidas, as quais podem totalizar uma tonelagem superior a 50 bilhões.

De qualquer modo, vê-se, pelo exame da Tabela, que o Brasil deve possuir reservas superiores a 50 bilhões de toneladas, com uma característica muito favorável: o teor em ferro é elevado, principalmente quando comparado ao de países como os EUA, com reservas aparentemente maiores.

As principais jazidas brasileiras localizam-se em Minas Gerais, Mato Grosso e Amazônia.

Em Minas, os grandes depósitos estão quase todos compreendidos numa área que Moraes Rego denominou Quadrilátero Ferrífero[8]. Essa área está situada entre as cidades de Belo Horizonte, Santa Bárbara, Congonhas do Campo e Mariana. Os tipos de minério classificados por Otávio Barbosa nessa área são os seguintes:

– *Hematita compacta*, com Fe entre 66 e 69%, compreendendo os minérios mais ricos, que têm sido destinados principalmente à exportação; devido à sua alta pureza, é geralmente empregado diretamente nas aciarias, no processo clássico Siemens-Martin, onde sua função é atuar como oxidante, ou seja, reduzir o teor de carbono do banho líquido, além de contribuir com uma adição de ferro;

– *Itabirito compacto*, com Fe entre 56 e 66%, que corresponde a hematitas lamelares, formadas de grãos de quartzo e palhetas de hematita;

– *Itabirito friável*, também denominado comumente *jacutinga*, facilmente reduzível a pó;

– *Canga*, com Fe entre 50 e 60%. Trata-se de um minério secundário que capeia os afloramentos e cobre as encostas dos morros de minério. A espessura dessa capa varia de 2 a 3 metros, podendo, em certos pontos, atingir 10 a 12 metros.[8] É um minério de mais baixo teor de ferro e mais alto teor de fósforo, mas útil, principalmente para as Usinas que empregam altos fornos a carvão vegetal, devido à sua porosidade;

– *Itabirito impuro*, em Mato Grosso; as principais jazidas localizam-se em Urucum e Santa Cruz, perto de Corumbá. Estimam-se as reservas matogrossenses em 50 bilhões de toneladas, com um teor médio em ferro entre 50 e 55%[9].

Na Amazônia, estima-se que o potencial em ferro (em Carajás) se situe em torno de 18 bilhões de toneladas, com teor de ferro igualmente elevado, o que, em resumo, coloca o Brasil numa situação altamente privilegiada em relação a essa importante riqueza mineral.

2.1.1 **Beneficiamento do minério de ferro** O termo genérico "beneficiamento" compreende uma série de operações a que os minérios de ferro de várias qualidades podem ser submetidos, com o objetivo de alterar seus característicos físicos ou químicos e torná-los mais adequados para a utilização nos altos-fornos.

Essas operações são, geralmente: britamento, peneiramento, mistura, moagem, concentração, classificação e aglomeração.

Dados os objetivos da presente obra, serão estudados apenas os métodos de aglomeração.

A "aglomeração" visa, em princípio, melhorar a permeabilidade da carga do alto-forno, reduzir o consumo de carvão e acelerar o processo de redução. Em segundo lugar, a aglomeração reduz a quantidade de "material pulverulento" ou "finos" que o alto-forno emite e lança no sistema de recuperação de gases.

Há quatro principais processos de aglomeração do minério de ferro[10]:

– sinterização, que produz "sínter";
– pelotização, que produz "pelotas";
– briquetagem, que produz "briquetes";
– nodulização, que produz "nódulos".

Os mais importantes são os dois primeiros, os quais serão, a seguir, descritos sucintamente.

2.1.1.1 **Sinterização** Consiste em aglomerar-se finos de minério de ferro numa mistura com aproximadamente 5% de um carvão finamente dividido, coque ou antracita. A carga é colocada em grelhas que se movem a uma determinada velocidade e, num determinado ponto próximo ao fim de percurso das grelhas, a carga é aquecida superficialmente, por intermédio de queimadores de gás. À medida que a mistura se movimenta, exaustores colocados debaixo da carga retiram o ar, através da mistura, de modo a queimá-la. A temperatura que se desenvolve atinge 1.300 a 1.500°C, suficiente para promover a ligação das partículas finas do minério e resultando um produto uniforme e poroso, denominado "sínter".

O "sínter" deve ser convenientemente resfriado para poder ser facilmente manuseado, para o que se utilizam resfriadores de vários tipos, como rotativos, em cuba etc.

A qualidade do "sínter" pode ser ainda melhorada, se ao mesmo for incorporado um fundente (calcário), de modo a evitar sua adição direta na carga do alto-forno. Outra melhora do "sínter" tem sido obtida pela adição

de pedaços dimensionados adequadamente, de modo a aumentar a permeabilidade da carga. As dimensões mais convenientes dos pedaços se situam na faixa de 1/4" a 1".(10)

2.1.1.2 **Pelotização*** Este é o mais novo processo de aglomeração e talvez o de maior êxito. Neste processo, produzem-se inicialmente "bolas" ou "pelotas" cruas de finos de minério de alto teor ou de minério concentrado. A granulação do minério deve ser normalmente inferior a −325 mesh; adiciona-se cerca de 10% de água e, geralmente, um aglomerante de natureza inorgânica, como "bentonita" em proporção de 0,5 a 0,75% da carga. Às vezes adiciona-se pequena quantidade de um combustível sólido, de modo a ter-se um suprimento parcial de calor. Finalmente, outros aditivos podem ser incluídos, como barrilha, calcário ou dolomita, com o fim de aumentar a resistência das pelotas.

Os dispositivos utilizados na produção das pelotas cruas são do tipo "tambor rotativo" ou "discos ou cones giratórios", cuja descrição escapa ao objetivo da presente obra.

Uma vez obtidas as pelotas cruas, são as mesmas queimadas, para o que se utilizam vários dispositivos de aquecimento. Um deles é constituído por uma "grelha contínua móvel". No processo, as pelotas são inicialmente secadas, depois pré-aquecidas e finalmente queimadas. Mais recentemente, tem sido utilizado um forno rotativo, onde as temperaturas podem atingir valores da ordem de 1.350°C.

Quando se utiliza o forno rotativo, as pelotas não necessitam de adição prévia de combustível.

2.2 **Carvão** O combustível utilizado no alto-forno é o carvão – coque ou de madeira – cuja ação se faz sentir em três sentidos:

- fornecedor do calor para a combustão;
- fornecedor do carbono para a redução do óxido de ferro;
- indiretamente, fornecedor do carbono como principal elemento de liga do ferro gusa.

* Este processo está em grande desenvolvimento no Brasil. Várias grandes unidades de pelotização já existem e outras estão sendo montadas com o objetivo de exportação. O processo aplica-se bem ao caso brasileiro, devido à grande quantidade de finos que resulta dos processos de extração, britagem e classificação dos minérios do Quadrilátero Ferrífero.

O coque ou carvão de madeira são introduzidos no alto-forno, em vez do carvão de pedra (carvão mineral ou hulha) ou da lenha, porque estes não possuem resistência suficiente para suportar as cargas dos altos-fornos, aglomerando-se facilmente, se fossem utilizados diretamente e, em conseqüência, perturbando a marcha normal do forno. Além disso, o coque e o carvão de madeira permitem que temperaturas mais elevadas sejam atingidas, por serem menos inflamáveis do que os produtos naturais dos quais se originam.

Finalmente, sobretudo no caso do carvão coque, o processo de coqueificação ou transformação do carvão mineral em coque origina uma série de derivados ou subprodutos, de grande valor tecnológico e comercial, que se perderiam no alto-forno, onde todos os componentes voláteis formados escapariam.

2.2.1 **Carvão coque** O coque é obtido pelo processo de "coqueificação", que consiste, em princípio, no aquecimento a altas temperaturas, geralmente em câmaras hermeticamente fechadas, portanto com ausência de ar, exceto na saída dos produtos voláteis, do carvão mineral.

Este último é constituído sobretudo dos restos de matéria vegetal que se decompôs com o tempo, na presença de umidade, ausência de ar e variações de temperatura e pressão, por ação geológica, transformando-se, através de milênios, progressivamente, em turfa, linhito, carvão sub-betuminoso, carvão betuminoso, semi-antracito e antracito.

O tipo betuminoso é o mais adequado para a produção de coque, pelo processo de coqueificação.

No aquecimento às temperaturas de coqueificação e na ausência de ar, as moléculas orgânicas complexas que constituem o carvão mineral se dividem, produzindo gases e compostos orgânicos sólidos e líquidos de peso molecular baixo e um resíduo carbonáceo relativamente não-volátil(11).

Esse resíduo resultante, pois, da destilação do carvão, é o "coque", que se apresenta como uma substância porosa, celular, heterogênea, sob os pontos de vista químico e físico.

A qualidade do coque depende muito do carvão mineral do qual se origina, principalmente do seu teor de impurezas.

A composição química de um carvão é obtida comumente por meio de dois métodos: análise elementar e análise imediata.

A análise elementar possibilita a determinação dos componentes do carvão, como carbono total, hidrogênio, oxigênio, nitrogênio, enxofre, cloro, fósforo e cinzas. A análise imediata, que é a mais comum, pois fornece os dados que realmente interessam para a avaliação comercial do carvão, permite determinar as quantidades de carbono fixo, matéria volátil, umidade e cinzas.

A Tabela 2[12] dá os resultados comparativos das análises, pelos dois métodos, de um carvão betuminoso de alta qualidade de matéria volátil.

TABELA 2

RESULTADOS COMPARATIVOS DA CONSTITUIÇÃO DE UM CARVÃO BETUMINOSO PELOS MÉTODOS DE ANÁLISE ELEMENTAR E ANÁLISE IMEDIATA

ANÁLISE IMEDIATA %		ANÁLISE ELEMENTAR %	
Cinzas	7,16	Cinzas	7,16
C_{fixo} (por dif.)	59,98	Carbono total	79,41
Matéria volátil	32,86	Hidrogênio	5,14
	100,00	Nitrogênio	1,46
		Oxigênio	5,81
		Enxofre	1,02
Umidade	5,67	Fósforo	0,005

No Brasil, os carvões minerais coqueificáveis são encontrados na região Sul, principalmente nos Estados do Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul. Caracterizam-se por pertencer ao período carbonífero Superior (Pensilvaniano), e apresentar-se em camadas intercaladas com material argiloso, e pela presença de piritas, que são responsáveis pelo seu elevado teor de cinzas e enxofre.[6]

Somente o carvão de Santa Catarina é, até o momento, o único utilizável para ser transformado em coque. Exige, contudo, intenso beneficiamento (lavagem), de modo a poder ser coqueificado. Ainda assim, o carvão nacional devidamente beneficiado, pode apresentar um teor de cinzas da ordem de 16% e de enxofre de 1,5%[6]*, obrigando a sua mistura com carvões importados de alta qualidade, na proporção de 20 a 30% de carvão nacional.*

O processo de coqueificação pode ser resumido da seguinte maneira:

O carvão mineral é introduzido nas câmaras de coqueificação, que são de grande comprimento, por exemplo: 13 metros e grande altura: 4 metros, mas estreitas: 45 centímetros. Essas câmaras são constituídas de material refratário e são aquecidas externamente. Elas são juntadas de modo a formar

uma "bateria", a qual constitui o forno de coqueificação, compreendendo até 100 câmaras. Entre cada câmara, encontra-se sempre uma de aquecimento. Os próprios gases oriundos da combustão servem como combustível.

Sob as câmaras de coqueificação, localizam-se "câmaras de regeneração", constituídas de um empilhamento de tijolos refratários, cujo objetivo é armazenar o calor dos gases queimados, de modo a aquecer ar necessário para a combustão.

O tempo para a coqueificação se completar varia de 17 a 18 horas. No fim desse tempo, o coque é paulatinamente retirado por meio de uma "máquina desenfornadora" e cai sobre um "carro de apagamento", que é encaminhado para a "torre de extinção", onde jatos de água apagam o coque incandescente.

Os produtos da destilação do carvão mineral estão representados na Figura 3.[6]

No Brasil, em face das condições do carvão nacional, que exigem uma mistura com quantidade apreciável de carvão importado, 1.000 kg de carvão produzem:[6]

750 kg de coque; 36 kg de alcatrão, onde se incluem 2,5 de naftaleno, 15 kg de óleos leves e 18,5 kg de piche; 7,2 kg de benzol total, onde se incluem 5,35 kg de benzeno, 1,25 kg de tolueno e 0,68 kg de xilênio; 12 kg de sulfato de amônio.

O gás combustível originado na coqueificação apresenta a seguinte análise média:[6]

CO	–	5,8 a 6,8
CO_2	–	1,5 a 2,2
CH_4	–	27,2 a 29,2
C_2H_4	–	1,3 a 2,8
O_2	–	0 a 0,4
H_2	–	56,0 a 57,0
N_2	–	1,0 a 4,6

2.2.2 **Carvão vegetal** O carvão vegetal ou "de madeira" é fabricado mediante pirólise da madeira, ou seja, quebra das moléculas complexas que constituem a madeira, em moléculas mais simples, mediante calor.

O aquecimento para a carbonização da madeira é feito em fornos de certo modo rudimentares e pouco eficientes, sobretudo no Brasil, pois os subprodutos gasosos e líquidos são perdidos durante o processo.

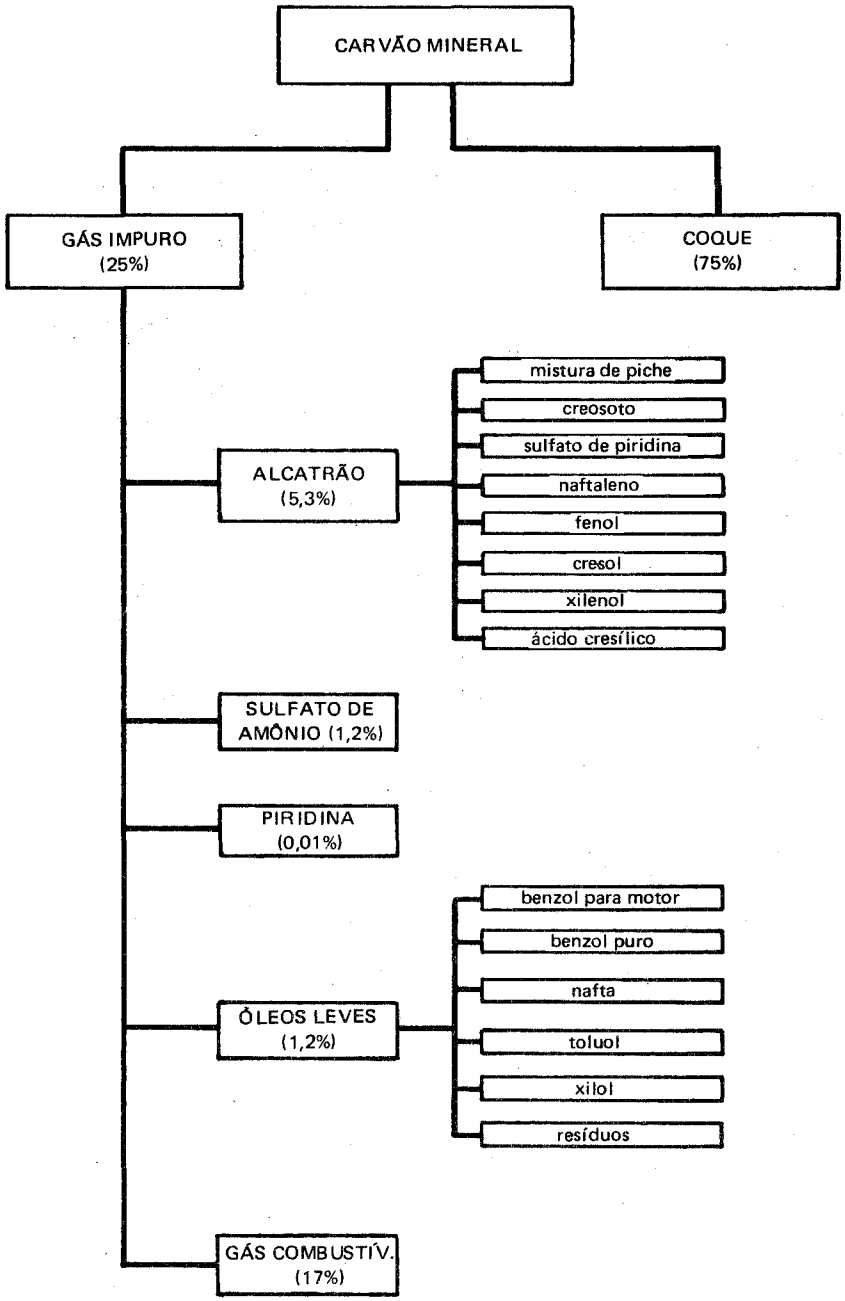


Figura 3 *Principais produtos obtidos na destilação do carvão mineral.*

Os fornos mais difundidos no Estado de Minas Gerais, que é a principal sede da siderurgia a carvão vegetal, são do tipo fixo, com aquecimento interno e intermitente (por carga)[13]. Têm forma cilíndrica e são fabricados de tijolos refratários, sendo fechados no topo por uma abóbada também de tijolos.

O calor é aplicado à madeira, com ausência de oxigênio, resultando gases (CO_2, CO, H_2 etc.), líquidos (alcatrões, ácido acético, álcool metílico) e o resíduo sólido que é o "carvão vegetal".

A experiência mineira na indústria siderúrgica a carvão vegetal mostra que 1 hectare de mata reflorestada (quase toda constituída de eucaliptos) produz cerca de 100 m^3 de carvão de 8 em 8 anos.

Por sua vez, por tonelada de gusa, na moderna prática utilizada naquele estado, são necessários 2,5 m^3 de carvão.

Por aí, pode-se calcular aproximadamente qual seria a área reflorestada necessária para produzir, por exemplo, um milhão de toneladas de ferro gusa por ano.

O carvão vegetal apresenta, em média, a seguinte composição química:

- cinzas 5%
- matérias voláteis 25%
- carbono fixo 70%

Como se vê, é um produto de alta qualidade, mesmo quando comparado ao melhor coque. Entretanto, sua resistência mecânica é relativamente baixa, de modo que os altos-fornos a carvão vegetal possuem capacidade bem menor que os baseados no coque*.

2.3 **Fundente** A função do fundente é combinar-se com as impurezas (ganga) do minério e com as cinzas do carvão, formando as chamadas "escórias".

O principal fundente é o *calcário*, de fórmula $CaCO_3$, o qual, para emprego direto no alto-forno, deve apresentar a seguinte composição média:

* O maior alto-forno a carvão vegetal operando no Brasil e no mundo apresenta uma capacidade diária (24 horas) de 1.200 t. Quanto aos altos-fornos a coque, há vários funcionando nos países de maior produção siderúrgica, com capacidade pouco superior a 10.000 t/dia.

CaO	48%
MgO	10% máx.
SiO_2	5%
Al_2O_3	1,5% máx.
P	0,05% máx.
S	0,05% máx.
Fe_2O_3	até 3%.

No Brasil, jazidas de calcário são encontradas praticamente em todos os estados.

2.4 **Outras matérias-primas da indústria siderúrgica** Entre elas a mais importante é o *minério de manganês*, utilizado na indústria siderúrgica, quer diretamente no alto-forno, na forma de minério, quer como adição nos aços, na forma de ferro-liga ou seja ferro-manganês.

Como se verá, o manganês é elemento de liga imprescindível nos aços; é utilizado em princípio como dessulfurante e desoxidante. Daí a grande importância do minério de manganês.

O tipo mais importante é a pirolusita, basicamente MnO_2. O teor de manganês varia de 30 a 50%.

O Brasil possui reservas apreciáveis desse minério, caracterizado ainda pela sua boa qualidade. As principais jazidas localizam-se nos Estados de Minas Gerais, Bahia, Mato Grosso e Amapá,[14] totalizando cerca de 100 milhões de toneladas.

Não é um minério comum, sobressaindo-se, entre os países detentores, além do Brasil, a União Soviética, a Índia e a África do Sul.

Outras matérias-primas utilizadas na indústria siderúrgica, nos processos de fabricação de aços comuns e especiais, incluem *ferro-ligas* de silício, cromo, vanádio, molibdênio, níquel, tungstênio, titânio etc., cuja função será devidamente explicada mais adiante.

Finalmente, deve-se ainda mencionar como importante matéria-prima a *sucata* de aço, ou seja, subprodutos da fabricação de aço e itens ou componentes de aço desgastados, quebrados ou descartados. A utilização desse tipo de matéria-prima é de vital importância, pois não só corresponde ao reaproveitamento de material que, de outro modo, seria inútil, como permite uma apreciável economia de minério de ferro, carvão e calcário, devido a seu emprego nos fornos de aço, em lugar do ferro gusa do alto-forno.

CAPÍTULO II

PRODUÇÃO DO FERRO GUSA: ALTO-FORNO

1 – Introdução O alto-forno constitui ainda o principal aparelho utilizado na metalurgia do ferro. A partir dos primeiros fornos, dos tipos mais rudimentares, em que os gases eram perdidos na atmosfera, constantes aperfeiçoamentos técnicos vêm sendo introduzidos e a capacidade diária paulatinamente elevada, aproximando-se, nos dias atuais, de 10.000 toneladas de ferro gusa em 24 horas.

A metalurgia do ferro consiste essencialmente na redução dos óxidos dos minérios de ferro, mediante o emprego de um redutor, que é um material à base de carbono – o carvão – o qual atua igualmente como combustível e, indiretamente, supridor do carbono para as ligas ferro-carbono de alto carbono, que são os principais produtos do alto-forno.

2 – Construção do alto-forno A Figura 4 mostra a seção transversal de uma instalação de alto-forno, incluindo todo o equipamento acessório e auxiliar. A Figura 5 mostra a seção transversal típica de um alto-forno moderno.

Como se vê, trata-se de uma estrutura cilíndrica, de grande altura, que compreende essencialmente uma *fundação* e o *forno propriamente dito*. Este, por sua vez, é constituído de três partes essenciais: cadinho, rampa e cuba.

O *cadinho* corresponde à parte do alto-forno onde se acumulam o metal fundido e a escória, resultantes das reações que ocorrem no seu interior. O cadinho tem forma cilíndrica e é construído em chapa grossa de aço, com revestimento interno de material refratário de natureza sílico-aluminosa ou de blocos de carbono. Entre a chapa de aço e o revestimento refratário são

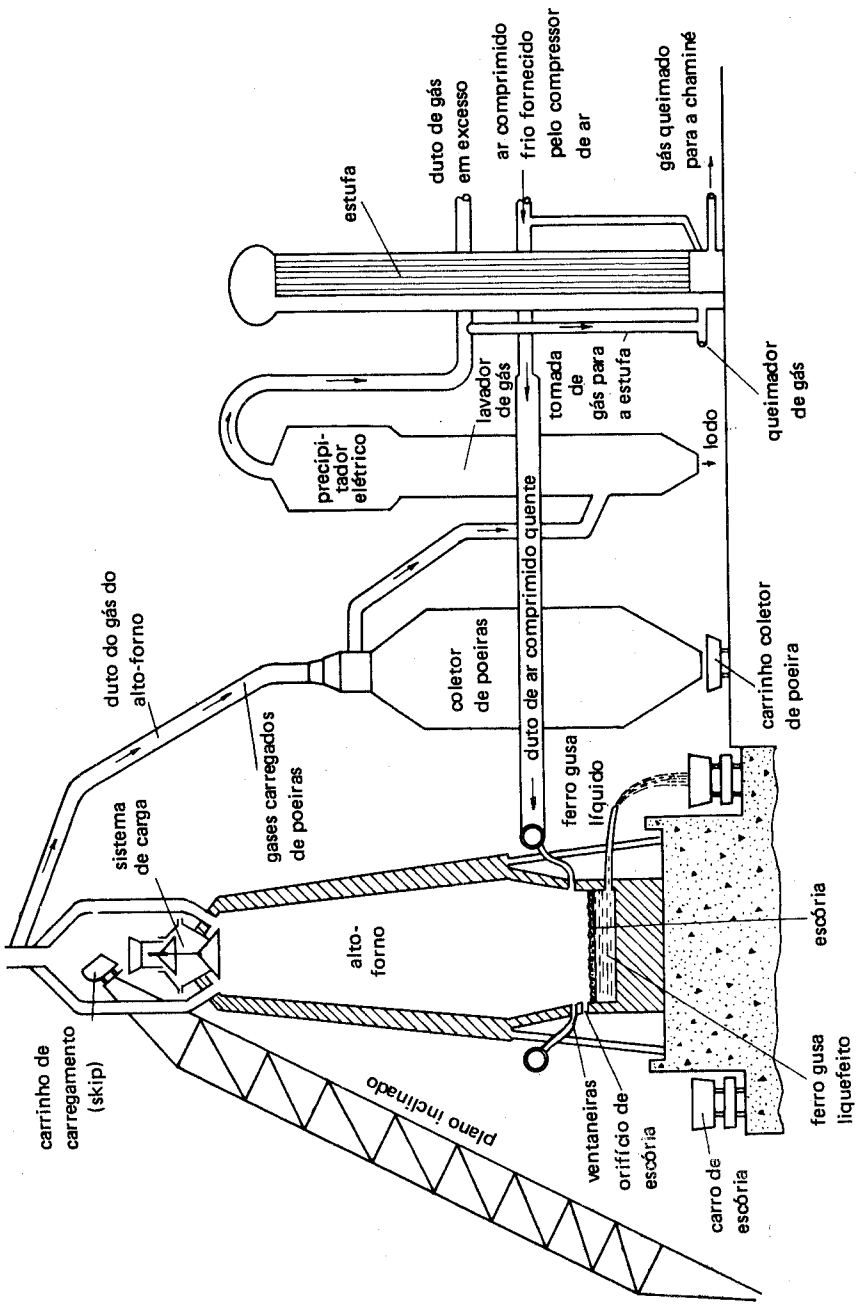


Figura 4 *Seção transversal de uma instalação de alto-forno, incluindo o equipamento auxiliar principal.*

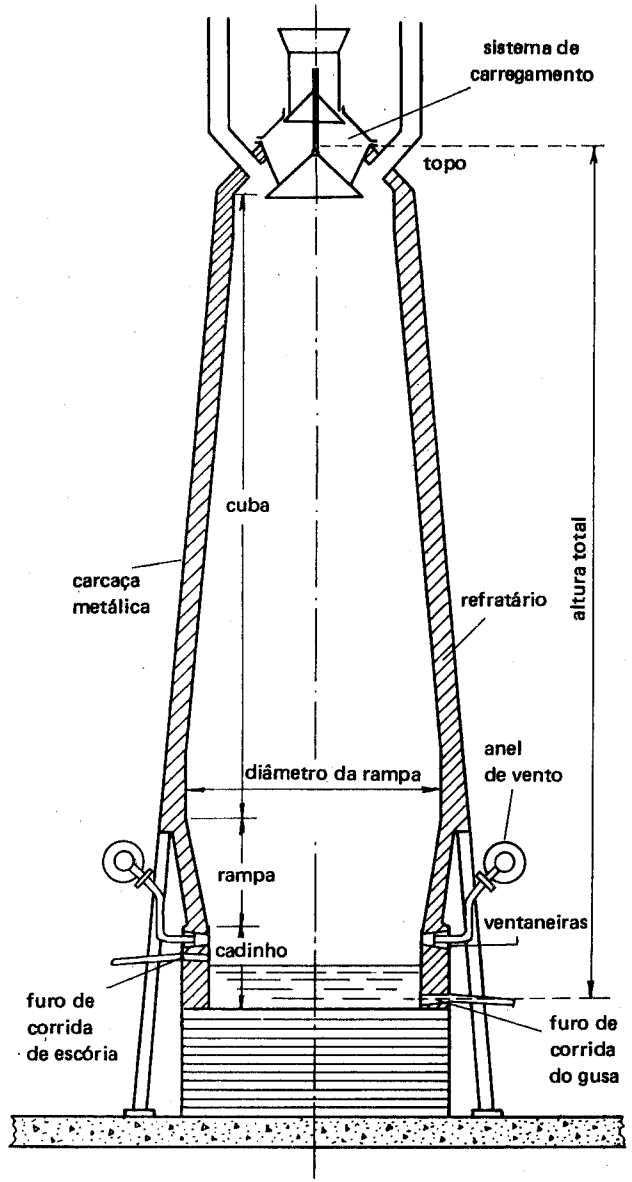


Figura 5 *Seção transversal típica de um alto-forno moderno.*

colocadas placas retangulares de ferro fundido, contendo no seu interior tubos de água, por onde esta circula, promovendo o resfriamento e proporcionando, assim, melhor condição do material suportar as temperaturas

elevadas que ocorrem nessa região e as pressões devidas ao peso da carga. O diâmetro do cadinho, dependendo da capacidade do forno, pode ser mais ou menos igual ou maior que 10 m. A altura do cadinho supera freqüentemente 4 metros.

Na parte inferior do cadinho, a cerca de 1 m do fundo, situa-se o *furo de corrida do gusa*, o qual, durante a operação do forno, permanece fechado com massa refratária colocada sob pressão e, por ocasião da *corrida do gusa*, é aberto mediante o emprego de uma perfuratriz ou lança de oxigênio.

Acima do furo de corrida do gusa, a cerca de 2,0 a 2,40 m do fundo, situam-se os *furos de corrida de escória*, geralmente em número de dois.

Na parte superior do cadinho, a cerca de 3,25 m do fundo, situam-se as *ventaneiras*, através das quais é soprado ar pré-aquecido e sob pressão*. O número de ventaneiras, de formato cônico, construídas de cobre e refrigeradas a água, varia de 20 a 32.

O ar pré-aquecido atinge as ventaneiras, por intermédio de tubos de ligação que se comunicam ao *anel de vento*, o qual circunda o forno e é suportado pela carcaça deste.

A *rampa* tem formato tronco-cônico; suas dimensões variam desde o diâmetro do cadinho até 10,5 m ou mais, com altura que pode superar 4 m. A rampa corresponde à zona, de certo modo, mais quente: aí a espessura do refratário é menor que a do cadinho, exigindo, em conseqüência, um resfriamento externo mediante o emprego de placas metálicas por onde circula a água. A inclinação da rampa é da ordem de 80 a 82° em relação à horizontal.

A *cuba*, também de forma tronco-cônica, tem a seção menor voltada para cima, no *topo* ou *goela*. Sua altura, a partir da rampa, pode superar 25 m. Em conseqüência, a altura do alto-forno, compreendendo o cadinho, rampa e cuba, a partir do fundo do cadinho, supera 30 m, aos quais devem juntar-se cerca de 4,5 a 5,0 m do fundo do cadinho ao piso do chão.

O diâmetro superior da rampa, na sua junção com o topo, é de aproximadamente 7,25 a 7,50 metros.

A cuba é constituída de um revestimento de tijolos refratários de grande espessura, devido ao desgaste; essa espessura é maior na parte inferior e vai diminuindo progressivamente até perto do topo. Ela é suportada por uma carcaça metálica formada de anéis soldados, a qual suporta o peso e os esforços mecânicos que se verificam no topo do forno, transmitindo-os, através de colunas, às fundações.

* Todas as distâncias são dadas a título de ilustração: elas dependem da capacidade do alto-forno e do seu projeto.

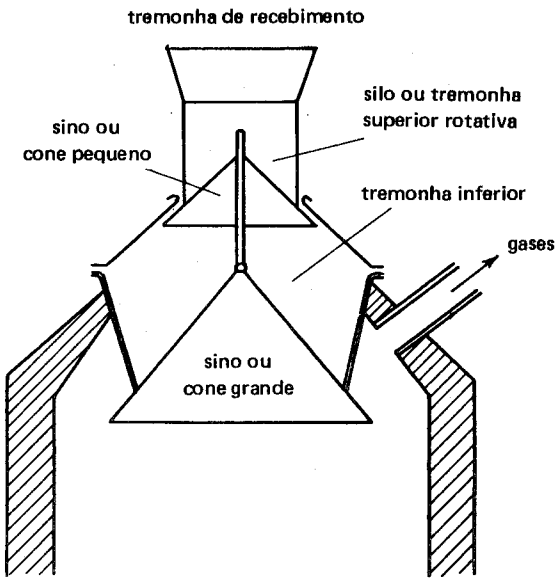


Figura 6 *Sistema "copo e cone" instalado no topo dos altos-fornos para carregamento de matérias-primas.*

No topo do alto-forno situa-se o *sistema de carregamento* (Figura 6). O sistema de carregamento mais comum é chamado "copo e cone", como a Figura mostra. Ele é constituído de uma *tremonha* de recebimento da carga, ligada ao *silo* ou *tremonha superior rotativa*, cujo fundo corresponde ao *sino* ou *cone pequeno*; este pode ser movimentado por um sistema de alavancas.

A tremonha de recebimento descarrega a carga no silo ou tremonha rotativa; uma vez feita a descarga, o cone pequeno abre-se e descarrega o material na *tremonha inferior*, cujo fundo corresponde ao *sino* ou *cone grande*.

Após ter-se formado carga suficiente na tremonha inferior, abre-se o cone grande que despeja a carga no interior do forno. O sistema funciona de tal modo que a abertura do cone grande é feita quando o cone pequeno está fechado. Assim, evita-se o escape de gases, os quais saem pelos tubos de saída, geralmente em número de quatro, a 90° um do outro. Esses tubos, por sua vez, comunicam-se com *tubos de ascensão de gases*, como a Figura 4 mostra, os quais se ligam com o *duto de descida*.

Os tubos de ascensão são dotados de válvulas de segurança no seu topo, para sangria do gás para a atmosfera.

Em resumo, o sistema "copo e cone" tem por objetivo realizar uma distribuição uniforme da carga e evitar a evasão de gases para a atmosfera.

A carga, constituída de minério de ferro (ou sínter ou pelotas), carvão, calcário e minério de manganês, é pesada no nível do solo, em poços de carregamento e despejada em carros ou "skips" que são levados ao topo, geralmente por um plano inclinado.

Utilizam-se alternadamente dois carros, manuseados por cabos de aço movidos a motor elétrico: enquanto um sobe cheio e despeja a carga no sistema de carregamento, no fim da trajetória, o outro desce vazio e, no fim da trajetória do que sobe, está embaixo, pronto para receber nova carga.

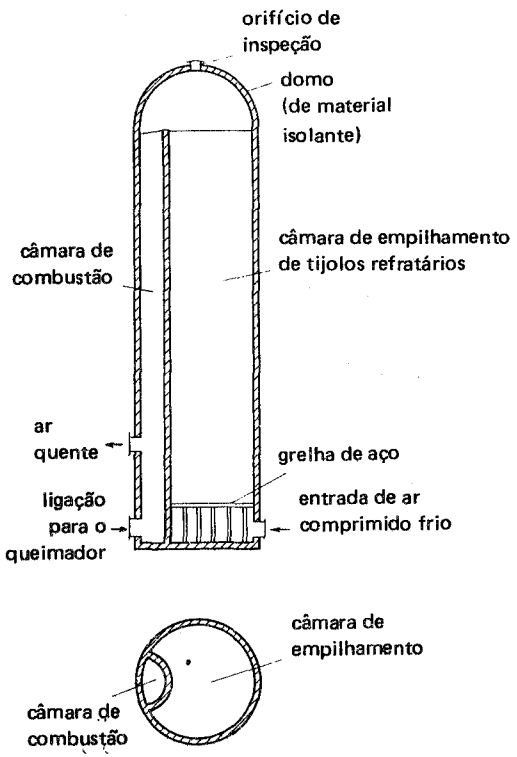


Figura 7 *Representação esquemática de um regenerador de alto-forno.*

A Figura 4 mostra os outros acessórios do alto-forno, cuja função principal é limpar os gases que saem do alto-forno, e pré-aquecer o ar que é introduzido no forno, através das ventaneiras. Esses acessórios são os seguintes:

— *coletor de poeiras*, cuja função é recolher a grande quantidade de poeiras carregadas nos gases. Num alto-forno de 1.600 t/dia de ferro gusa, a quantidade de poeiras arrastada pelos gases situa-se em torno de 100 t/dia[6]. Como a Figura 4 indica, o gás penetra no coletor pela sua parte superior, cuja forma é tronco-cônica. A parte central do coletor é cilíndrica e a poeira é depositada no seu fundo, novamente de forma tronco-cônica, de onde é retirada por meio de carrinhos. O gás é, em seguida, dirigido aos

— *lavadores* que empregam, atualmente, um *precipitador eletrostático*, o qual permite a geração de um campo elétrico que ioniza as partículas de pó, atraindo-as para as paredes do aparelho. Daí são levadas ao fundo, por intermédio de uma camada de água que escorre pelas paredes;

— finalmente, o acessório mais importante corresponde às *estufas* ou *regeneradores de calor*. A Figura 7 mostra esquematicamente um desses aparelhos, os quais são, em princípio, aparelhos armazenadores de calor. São constituídos de uma *câmara de combustão* em que o gás do alto-forno é queimado juntamente com ar. Ao atingir a cúpula do regenerador, o gás muda de direção e atravessa, no sentido descendente, a outra seção do regenerador ou seja uma *câmara de empilhamento de tijolos refratários*, cedendo calor aos tijolos que atingem temperaturas da ordem de 1.400°C, após cerca de 1 h 30 min.[6] Uma vez atingida essa temperatura, interrompe-se, por intermédio de válvulas, a entrada de ar e gás na câmara de combustão e promove-se a entrada de ar sob pressão, pela parte inferior da câmara de empilhamento. O ar, ao atravessar os tijolos aquecidos, vai-se aquecendo, muda de direção ao chegar à cúpula do regenerador e desce pela câmara de combustão até atingir o terço inferior desta, de onde sai para o alto-forno, através da válvula de ar quente.

O gás queimado (Figura 4) é dirigido à chaminé, colocada perto do regenerador, de modo a reduzir a um mínimo a perda de tiragem.

Normalmente, uma instalação de alto-forno é equipada com pelo menos três regeneradores; enquanto dois estão sendo aquecidos, o terceiro cede calor ao ar sob pressão.

As dimensões das estufas modernas podem atingir em torno de 8,5 a 9,00 m de diâmetro e 36 m de altura do seu fundo ao topo da cúpula.[15]

— *outros dispositivos auxiliares* compreendem uma série de *instrumentos de controle e medida*, tais como medidores de vazão, manômetros, registradores, pares termoelétricos, registrador de nível de carga etc., que permitem controlar e regular o processo operacional.

3 — Operação do alto-forno A operação do alto-forno é iniciada depois de ter passado por todo o processo de secagem e preparo preliminar.

Os regeneradores são aquecidos previamente, de modo que um dos meios de secar o alto-forno consiste em soprar-se ar quente dos regeneradores, através das ventaneiras, durante 10 a 15 dias, até que a temperatura em torno de 600°C seja alcançada. Outro método de secagem é pela queima de carvão de madeira ou coque.

A primeira carga de matéria-prima apresenta uma proporção maior de coque para acelerar o aquecimento do revestimento refratário, assim como para formar uma quantidade maior que a normal de escória.

À medida que a combustão do carvão progride, a proporção dos vários elementos constituintes da carga é modificada até atingir-se a normal.

A Figura 8 representa esquematicamente uma carga normal de alto-forno – em princípio, para os tipos de matérias-primas empregadas no caso brasileiro – assim como os produtos resultantes, para uma produção de 1.000 t de ferro gusa.(6)

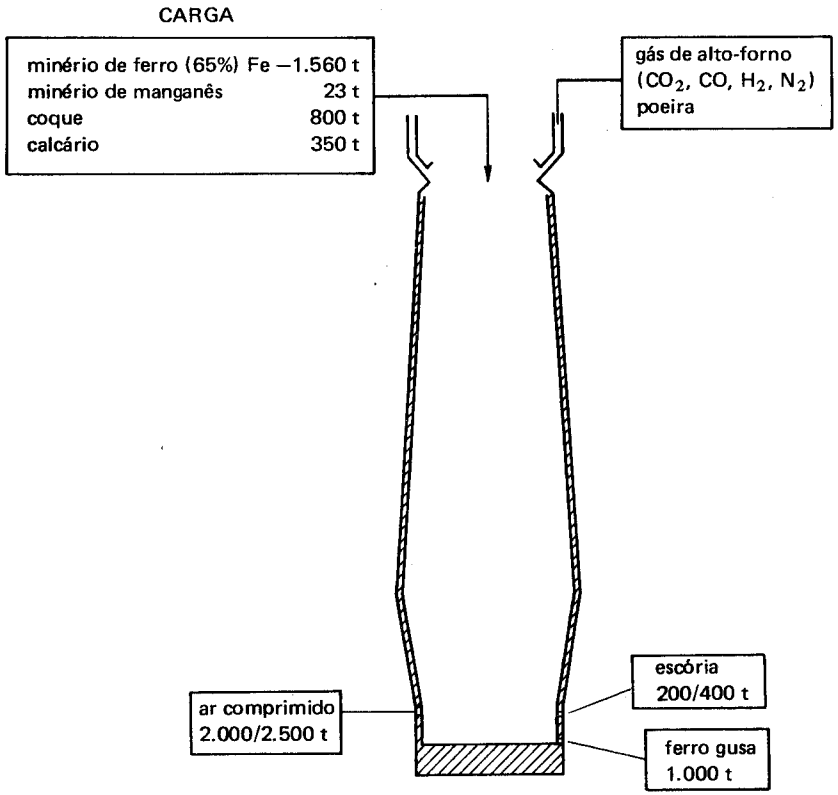


Figura 8 *Carga e produtos resultantes de um alto-forno.*

Essa carga, em outras palavras, é modificada em função da qualidade das várias matérias-primas, inclusive se se utiliza apenas minério de ferro ou igualmente "sínter" ou "pelotas".

Além da carga sólida, a quantidade de ar necessária é muito elevada – da ordem de 2.000 a 2.500 t por 1.000 t de gusa; do mesmo modo a água de refrigeração, num alto-forno moderno, é da ordem de 20 m^3/t de gusa líquido e o consumo de energia para acionamento dos vários dispositivos elétricos de carregamento, queimadores, precipitadores, controles etc. é da ordem de 10 kWh/t de gusa líquido.(6)

Num alto-forno, existem duas correntes de materiais responsáveis pelas reações que se verificam: uma corrente sólida, representada pela carga que desce paulatinamente e uma corrente gasosa que se origina pela reação do carbono do carvão com o oxigênio do ar soprado pelas ventaneiras, que sobe em contracorrente.

As temperaturas mais elevadas ocorrem nas proximidades das ventaneiras: da ordem de 1.800°C–2.000°C. Nessa região, verifica-se a reação

$$C + O_2 \rightarrow CO_2$$

originando-se grande quantidade de calor.

Esse CO_2, ao entrar em contato com o coque incandescente, decompõe-se:

$$CO_2 + C \rightarrow 2CO$$

O CO originado é o elemento redutor.

A carga introduzida pelo topo, ao entrar em contato com a corrente gasosa ascendente, sofre uma secagem, inicialmente, pela remoção da água higroscópica e, a seguir, remoção da água de hidratação, remoção essa que se completa somente por volta de 500°C.

A decomposição dos carbonatos, contidos no calcário dá-se a aproximadamente 800°C, conforme as reações seguintes:

$$CaCO_3 \rightarrow CaO + CO_2$$

$$MgCO_3 \rightarrow MgO + CO_2$$

Além de CO como agente redutor, o próprio carbono do carvão atua nesse sentido. As reações são as seguintes:

$$3Fe_2O_3 + CO \rightarrow 2Fe_3O_4 + CO_2$$

$$Fe_3O_4 + CO \rightarrow 3FeO + CO_2$$

$$FeO + CO \rightarrow Fe + CO_2$$

ou

$$Fe_2O_3 + 3C \rightarrow 2Fe + 3CO$$

Uma parte do óxido de ferro chega à zona de fusão sem sofrer redução, incorporando-se à escória.

Até atingir a zona de fusão, o ferro, em grande parte já reduzido, ainda está no estado sólido em forma esponjosa.

Na região que corresponde ao topo da rampa, inicia-se a formação da escória, pela combinação da cal (CaO) com a ganga (impurezas do minério de ferro) e uma certa quantidade de óxido de ferro e manganês.

Essa escória formada, juntamente com o ferro, começa a gotejar através dos interstícios da carga ainda sólida, para depositar-se no cadinho.

Logo acima das ventaneiras, em contato com o coque incandescente, ocorrem as seguintes reações, numa faixa de temperatura que vai de 1.200°C a 1.500°C.

$$Fe_2O_3 + 3C \rightarrow 2Fe + 3CO$$

$$Mn_3O_4 + C \rightarrow 3MnO + CO$$

$$MnO + C \rightarrow Mn + CO$$

$$SiO_2 + 2C \rightarrow Si + 2CO$$

$$P_2O_5 + 5C \rightarrow 2P + 5CO$$

$$FeS + CaO + C \rightarrow CaS + Fe + CO$$

Finalmente, as últimas reações fundamentais são representadas pelas equações

$$3Fe + C \rightarrow Fe_3C$$

$$3Fe + 2CO \rightarrow Fe_3C + CO_2$$

e ocorrem quando o ferro chega à zona de elevada temperatura da rampa. Forma-se, assim, o ferro gusa, ao qual se incorporam ainda os elementos manganês, silício, fósforo e enxofre.

A formação da escória compreende reações bem mais complexas. Essa escória, como já foi mencionado, resulta da combinação do CaO e do MgO do calcário com a ganga do minério e as cinzas do carvão.

A ganga do minério consiste basicamente de sílica SiO_2, alumina Al_2O_3, cal CaO, magnésia MgO, óxido de titânio TiO_2, óxido de manganês MnO_2, sulfeto de manganês MnS, sulfeto de cálcio CaS, óxido de ferro FeO e, eventualmente, óxidos de Zn e Pb, ZnO e PbO_2.

As impurezas do carvão ou as suas cinzas contêm principalmente SiO_2 e enxofre S. O calcário, além de CaO e MgO, pode apresentar pentóxido de fósforo P_2O_5, sílica SiO_2 e sulfeto de cálcio CaS.

A escória se origina, na sua quase totalidade, ao ser alcançada a rampa, a cerca de 1.200°C.(6)

As reações entre os vários componentes da carga produzem principalmente silicatos e aluminatos que são os principais constituintes da escória: $CaO.SiO_2$, $2CaO.SiO_2$, $FeO.SiO_2$, $Al_2O_3.SiO_2$, $MgO.Al_2O_3$, $CaO.Al_2O_3$ etc.

Esse produto caracteriza-se por sua grande fluidez e seu baixo peso específico. Assim, no cadinho, a escória e o gusa líquido separam-se por gravidade, formando duas camadas: a inferior, metálica e a superior, a escória, facilitando o vazamento de ambos os produtos.

3.1 **Produtos do alto-forno** O principal produto do alto-forno é o *ferro gusa*, cuja utilização é feita nas aciarias, para onde é encaminhado no estado líquido e transformado em aço; o ferro gusa é ainda utilizado no estado sólido como principal matéria-prima das fundições de ferro fundido.

Há, pois, vários tipos de ferro gusa. Basicamente, o ferro gusa é uma liga ferro-carbono de alto teor de carbono e teores variáveis de silício, manganês, fósforo e enxofre, devido à natureza das matérias-primas empregadas no alto-forno e ao processo de produção.

De um modo geral, a maioria dos ferros gusas possíveis de serem obtidos em alto-forno está compreendida na seguinte faixa de composições:

carbono	–	3 a 4,5%
silício	–	0,5 a 4,0%
manganês	–	0,5 a 2,5%
fósforo	–	0,05 a 2,0%
enxofre	–	0,20% máx.

A *escória* é, como se viu, o produto do alto-forno resultante da combinação dos elementos constituintes do calcário, com a ganga do minério e as cinzas do carvão. Sua composição varia igualmente dentro de largos limites, como se indica a seguir:

SiO_2 – 29 a 38%
Al_2O_3 – 10 a 22%
CaO + MgO – 44 a 48%
FeO + MnO – 1 a 3%
Cas – 3 a 4%

Esse material, depois de solidificado, pode ser empregado como lastro de ferrovias, material isolante etc. Sua mais importante aplicação dá-se na fabricação do chamado "cimento metalúrgico".

Finalmente, o *gás de alto-forno* é um subproduto muito importante devido a seu alto poder calorífico. Sua análise é a seguinte:

CO_2 – 13%
CO – 27%
H_2 – 3%
N_2 – 57%

Ele é utilizado na própria usina siderúrgica nos regeneradores, fornos diversos de aquecimento, caldeiras etc.

3.2 **Técnicas para aumentar a produção do alto-forno** Além da utilização crescente na carga de "sínter" ou "pelotas", que podem chegar a constituir 90% da carga metálica, com apreciável redução da quantidade de carvão a ser utilizada e aumento da produtividade do alto-forno, pela redução do consumo de combustível, outras técnicas vêm sendo empregadas com o mesmo objetivo. Entre elas, contam-se:(16)

3.2.1 **Elevação da temperatura do ar soprado e controle de sua umidade** A temperatura usual do ar soprado pelas ventaneiras situava-se, anos atrás, abaixo de 650°C. Por outro lado, não havia controle da umidade do ar. Assim, quando o coque incandescente entrava em contato com o vapor, devido a alterações, mesmo pequenas, de umidade do ar, originavam-se reações de absorção de calor (reações endotérmicas), que afetavam a operação do alto-forno. Adotou-se, então, a inovação de introduzir-se vapor no ar, de modo a manter a umidade a um nível uniformemente elevado, ao mesmo tempo que se elevou a temperatura do ar soprado a níveis variáveis entre 760°C e 1.000°C aproximadamente, o que permitiu melhorar consideravelmente a "marcha" ou operação do alto-forno.

3.2.2 **Injeção de combustível, através das ventaneiras** Essa técnica tem mais sentido econômico, devido ao menor custo do combustível injetado (gás natural ou gás de coqueira ou óleo ou carvão pulverizado) do que o do coque. A técnica permite um menor consumo de coque e fornece um meio de controlar melhor a temperatura do cadinho. Devido, entretanto, ao fato dos combustíveis à base de hidrocarbonetos, quando em presença do coque, queimarem formando apenas CO e H_2, o calor produzido é menor que o do coque substituído. Compensa-se aumentando a temperatura do ar soprado.

3.2.3 **Adição de oxigênio no ar** Essa técnica permite aumentar ligeiramente o rendimento de produção do alto-forno. Entretanto, devido ao alto custo do oxigênio, o processo sofre restrições.

3.2.4 **Operação a alta pressão** O aumento do volume de ar introduzido no forno seria benéfico se não ocasionasse um efeito de atraso na descida da carga, o que produz, ao contrário do que se poderia prever, uma diminuição da produtividade. A introdução de pressão no topo do alto forno, no sistema de saída dos gases, resulta numa compressão dos gases através de todo o sistema e possibilita aumentar o volume de ar a ser introduzido nas ventaneiras, aumentando-se assim a produção do forno.

CAPÍTULO III

FABRICAÇÃO DO AÇO

1 – Introdução Sendo o ferro gusa uma liga ferro-carbono em que o carbono e as impurezas normais (Si, Mn, P e S, principalmente as duas primeiras) se encontram em teores elevados, a sua transformação em aço, que é uma liga de mais baixos teores de C, Si, Mn, P e S, corresponde a um processo de *oxidação*, por intermédio do qual a porcentagem daqueles elementos é reduzida até aos valores desejados.

Em conseqüência, na transformação do ferro gusa em aço, utilizam-se "agentes oxidantes", os quais podem ser de natureza gasosa, como ar e oxigênio, ou de natureza sólida, como minérios na forma de óxidos.

Assim sendo, os processos para produção de aço podem ser classificados de acordo com o agente utilizado:

– processos pneumáticos, onde o agente oxidante é ar ou oxigênio;

– processos Siemens-Martin, elétrico, duplex etc., em que os agentes oxidantes são substâncias sólidas contendo óxidos.

Por outro lado, dependendo da composição do ferro gusa e do tipo de aço desejado, pode-se considerar ainda outra divisão dos processos de sua fabricação, qualquer que seja o tipo de forno:

– *processos ácidos*, em que podem ser diminuídos ou removidos facilmente os elementos carbono, silício e manganês, não acontecendo, entretanto, o mesmo com o fósforo e o enxofre;

– *processos básicos*, em que todos os elementos acima podem ser reduzidos aos valores desejados.

2 – Processos pneumáticos Os vários tipos estão representados na Figura 9. Como se verifica, o princípio básico de qualquer dos processos pneumáticos é introduzir ar ou oxigênio, pelo fundo, lateralmente ou pelo topo, por intermédio de uma "lança".

O processo pneumático tradicional é o que utiliza o *conversor Bessemer*, cujo nome é devido ao seu inventor, em 1847, na Inglaterra. Quase que simultaneamente Kelly, nos Estados Unidos, desenvolveu forno análogo.

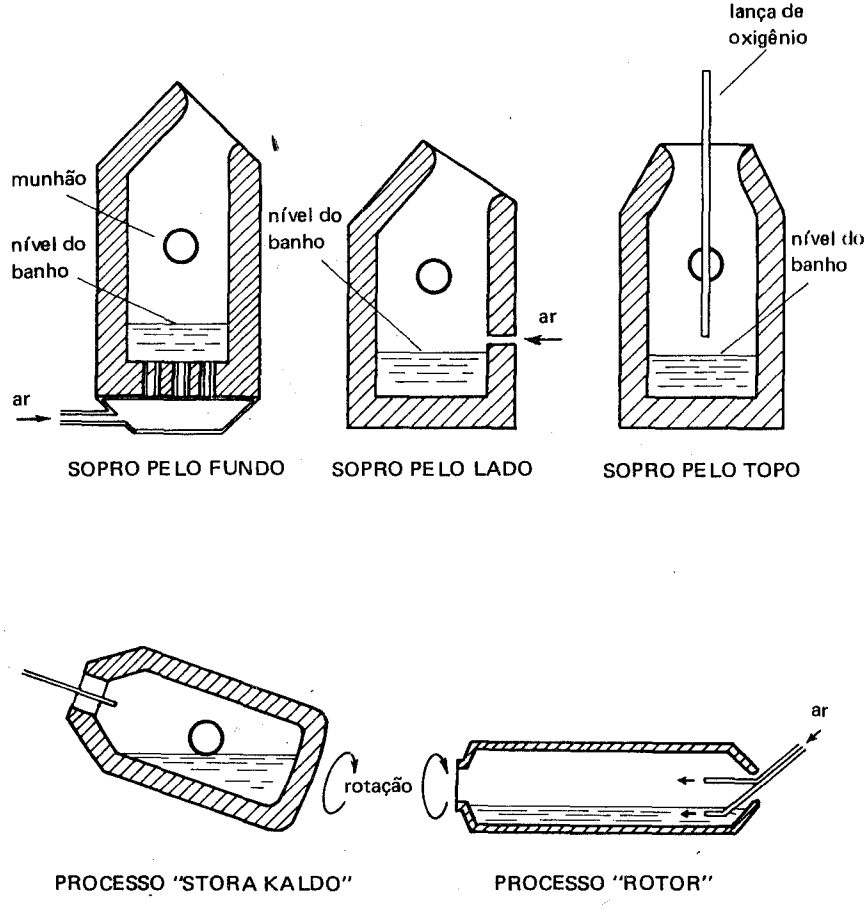


Figura 9 *Processos pneumáticos para produção de aço, a partir de ferro gusa.*

A Figura 10 mostra, esquematicamente, o *conversor Bessemer*, cujos característicos principais são os seguintes:

- carcaça de aço cilíndrica, com formato de uma "pera"; o aparelho é suspenso por um eixo apoiado em dois munhões que permitem a rotação do forno, nos dois sentidos, para carregamento ou vazamento, como a parte inferior da figura mostra. O fundo do conversor é destacável e contém as ventaneiras, por onde o ar sob pressão é soprado; as ventaneiras são construídas de material refratário sílico-aluminoso;
- o forno é internamente revestido com material refratário silicoso, de natureza ácida;
- o ar é soprado pelo fundo, atravessando a camada de gusa líquido, proveniente do alto-forno, a qual ocupa um volume correspondente a uma espessura até cerca de 1 m;

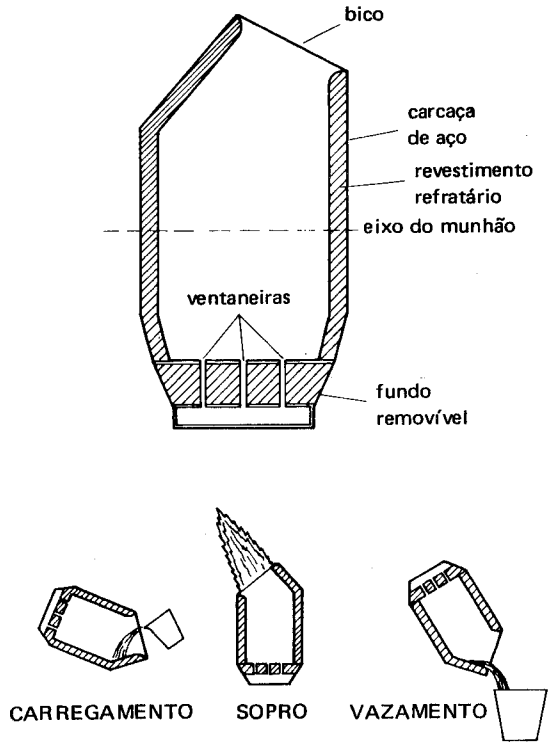


Figura 10 *Seção transversal esquemática de um conversor Bessemer. A parte inferior da figura mostra as três posições típicas do conversor no decorrer da operação.*

- sendo as reações de oxidação dos elementos contidos no ferro gusa líquido fortemente exotérmicas, principalmente a do silício, não há necessidade de aquecimento da carga metálica do conversor, eliminando-se, assim, a utilização de qualquer combustível.

A capacidade da maioria dos conversores Bessemer situa-se entre 25 e 30 t.

2.1 Operação do conversor Bessemer O gusa utilizado no conversor Bessemer deve apresentar, para operação nas melhores condições, preferivelmente a seguinte composição:[16]

silício	–	1,10 a 1,50%
manganês	–	0,40 a 0,70%
fósforo	–	0,090% máx.
enxofre	–	0,030% máx.

Prefere-se manter uma relação do silício para o manganês de 2 ou 2,5 para 1.

O teor de carbono do gusa se situa entre 4,0 e 4,5%.

Para carregamento, o forno é levado à posição quase horizontal, como a parte inferior da Figura 10 mostra. Carrega-se imediatamente sucata, casca de óxido e mesmo minério, se desejado. A seguir, o gusa líquido. Na posição mencionada, o metal fica restrito ao "ventre" do conversor, sem entrar em contato com as ventaneiras da "caixa de vento".

Inicia-se a entrada de ar, ao mesmo tempo em que o aparelho é colocado paulatinamente na posição vertical, posição em que permanece até que a operação de oxidação se complete.

O silício oxida-se em primeiro lugar, formando-se uma chama curta e transparente que se projeta pela boca do forno. O resultado da oxidação é a formação de sílica SiO_2, que, juntamente com os óxidos de ferro e manganês que igualmente se formam durante o "sopro", originam uma escória de baixo ponto de fusão, à base de silicatos de Fe e Mn.

A rigor, as primeiras reações de oxidação verificadas são as seguintes:

$$2Fe + O_2 \rightarrow 2FeO$$

$$2FeO + Si \rightarrow SiO_2 + 2Fe$$

$$FeO + Mn \rightarrow MnO + Fe$$

À medida que o sopro continua, depois de cerca de 4 minutos, a chama começa a alongar-se e tornar-se brilhante e se inicia o período de oxidação do carbono:

$$FeO + C \rightarrow Fe + CO$$

Quando a eliminação do carbono aproxima-se do fim, a chama muda novamente de aparência, encurta-se e parece desaparecer. Olhando-se através de vidros coloridos, a chama adquire raias vermelhas à altura da boca do aparelho e quase instantaneamente sua coloração amarelo-dourada passa a avermelhada. Neste momento, tem-se o chamado "ponto final" ou "fim do sopro" O conversor é novamente basculado e o sopro de ar desligado paulatinamente. O metal está pronto para ser vazado na panela onde se adicionam Fe-Mn ou alumínio para desoxidar e dessulfurar o metal, segundo as seguintes reações:

$$FeO + Mn \rightarrow MnO + Fe$$

$$FeS + Mn \rightarrow MnS + Fe$$

ou

$$3FeO + 2Al \rightarrow Al_2O_3 + 3Fe$$

O gráfico à esquerda da Figura 11[16] mostra o tempo de duração de uma operação do conversor Bessemer e a mudança de composição química verificada no decorrer da mesma.

O aço obtido no processo Bessemer apresenta baixo teor de carbono – inferior a 0,10% –, manganês abaixo de 0,50%, silício muito baixo – 0,005% –, 0,08% de fósforo e 0,25% de enxofre.

Quando se utilizam desoxidantes fortes como Fe-Si, Al e mesmo carbono, produz-se um aço Bessemer "acalmado", ou seja, sem apresentar efervescência típica do aço Bessemer comum, com certa oxidação. Aços Bessemer acalmados podem conter 0,10% ou mais de C, 0,35 a 1,25% de Mn, 0,10 a 0,30% de Si, 0,08% de P e 0,025% de S. Pode-se, até mesmo neste caso, adicionar alguns elementos de liga,[16] o que, entretanto, não é comum.

O controle do processo Bessemer tem constituído, de certo modo, um problema. A observação visual foi, por muito tempo, o método mais empregado para controlar o sopro Bessemer, por intermédio do aspecto da chama e determinar o "fim do sopro". É claro que esse método exige operadores de grande experiência, de modo que vários instrumentos têm sido

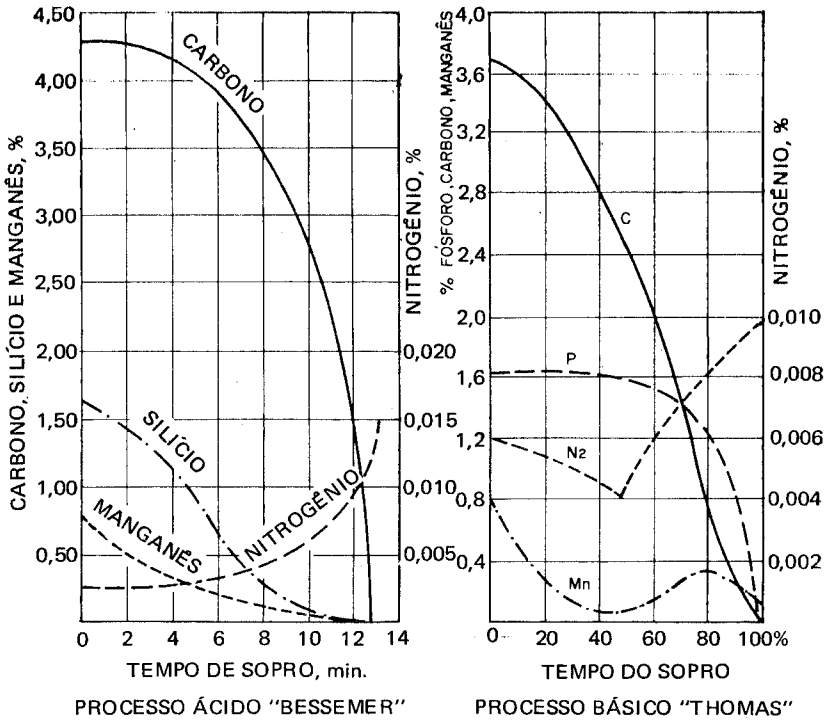


Figura 11 *Representação gráfica das modificações de composição química do metal que ocorrem durante a operação dos conversores tipos Bessemer e Thomas.*

desenvolvidos, para dar melhores condições de controle. Entre eles, podem ser citados o espectroscópio, a célula fotoelétrica para registrar automaticamente as características de radiação da chama etc.

O controle da temperatura exige igualmente muito cuidado, pois temperaturas baixas causam problemas de vazamento e temperaturas muito elevadas podem proporcionar no aço quantidades excessivas de oxigênio e nitrogênio. Até hoje não se desenvolveu, aparentemente, uma técnica satisfatória a esse respeito.

Outro problema relaciona-se com o controle da composição química do banho, dada a rapidez do processo.

2.2 **Conversor Thomas** Este processo, patenteado em 1879 na Inglaterra, diferencia-se do anterior por apresentar revestimento de dolomita, de natureza básica.

Os característicos físicos e o sistema de sopragem não são diferentes, em princípio, dos do conversor Bessemer.

A operação, entretanto, apresenta peculiaridades próprias. Freqüentemente, o ferro gusa, ao ser transportado do alto-forno ao conversor, sofre uma dessulfuração prévia pela adição de "barrilha" ou carbonato de sódio e a escória que se origina deve ser cuidadosamente retirada, ao vazar-se o ferro gusa líquido no interior do conversor.(16)

Com o aparelho na posição horizontal, carrega-se cal (numa proporção de cerca de 130 kg por tonelada de gusa). Em seguida, carrega-se o gusa, ao mesmo tempo em que o conversor é basculado paulatinamente para a posição vertical e o sopro de ar é iniciado.

Do mesmo modo que no conversor Bessemer, o "fim do sopro" ou ponto final da operação é determinado pela inspeção visual da chama.

Depois que a operação de oxidação é completada, o aparelho é novamente basculado e a escória, que neste processo se forma, é retirada, adicionando-se logo a seguir a quantidade necessária de Fe-Mn.

Para um conversor de 40 t, o tempo total de sopro varia de 15 a 16 min.

A principal diferença de operação entre o conversor Thomas e o conversor Bessemer reside nas reações químicas que permitem, no primeiro, a remoção do fósforo, pela utilização de cal, a qual é possível porque o forno é revestido com material refratário de natureza básica; e igualmente na remoção do enxofre.

A oxidação ou remoção do carbono, manganês e silício é processada essencialmente de modo idêntico ao que ocorre no conversor Bessemer.

A remoção do fósforo e do enxofre, principalmente do primeiro elemento, depende muito da quantidade de cal na escória. O fósforo, que é o elemento mais importante sob esse ponto de vista, é removido por reação de desfosforização, a qual ocorre logo após a remoção da maior parte do carbono, num período chamado "após-sopro". Esse período dura de 3 a 5 minutos.

A reação de remoção do P inicia-se com forte oxidação desse elemento pela ação do óxido de ferro contido na escória. Em seguida, a cal, que está inteiramente dissolvida na escória, reage com o fósforo, formando um composto contendo CaO e P_2O_5, que se incorpora definitivamente à escória.

O gusa para o processo Thomas apresenta uma composição química dentro da seguinte faixa:

C – 3,50 a 3,80%
Si – 0,25 a 0,50%
Mn – 0,40 a 1,00%
P – 1,70 a 1,90%
S – 0,08% máx.

A parte direita da Figura 11 mostra como se processa a eliminação dos vários elementos contidos no ferro gusa, em função do tempo de sopro, representado em porcentagem do tempo total.

2.3 **Conversor de sopro lateral** Trata-se de conversores de pequena capacidade, geralmente até 2,5 t. Seu revestimento é silicoso, portanto de natureza ácida. Um dos tipos é conhecido como "conversor Tropenas".

O ar é introduzido lateralmente, acima da superfície do banho metálico. A reação inicial consiste na formação de óxido de ferro, o qual, por seu turno, oxida o silício, o manganês e certa quantidade de carbono. As reações são isotérmicas, principalmente por ocasião da oxidação do Si e do Mn.

O processo é usado principalmente em fundições que, num forno cubilô, produzem o gusa líquido necessário para a conversão em aço.

O fim da operação ou "ponto final" é observado pela queda da chama.

2.4 **Conversor de sopro pelo topo** O processo mais famoso é o L-D (Linz-Donawitz), também conhecido como processo BOP*. Neste processo, introduz-se, por intermédio de uma lança metálica resfriada a água, oxigênio de pureza variável entre 95 e 99,5%. O forno não apresenta qualquer abertura no fundo e seu revestimento é de dolomita ou magnesita, portanto de natureza básica, o que permite eliminação ou redução do teor de todos os principais elementos contidos no gusa líquido.

A Figura 12 representa esquematicamente um tipo de conversor L-D.

Os conversores modernos são construídos com capacidades superiores às dos Bessemer ou Thomas, freqüentemente acima de 100 t de carga.

A ponta de lança introduzida no interior do forno fica a uma distância da superfície do banho líquido que varia de 0,30 a 1,00 m.

Como é de certo modo óbvio, as temperaturas de reação nos conversores a oxigênio são bem mais elevadas que nos outros conversores, devido ao impacto do jato de oxigênio que provoca reação violenta e imediata, fazendo com que as temperaturas locais sejam da ordem de 2.500 a 3.000°C. As diferenças de temperatura provocam enérgica movimentação do banho, o que facilita e acelera as reações de oxidação através de todo o gusa líquido.

O gusa utilizado na operação pode apresentar qualquer composição. Esta se situa, normalmente, na seguinte faixa:

---

* BOP = "basic oxigen proccess" ou "processo básico a oxigênio".

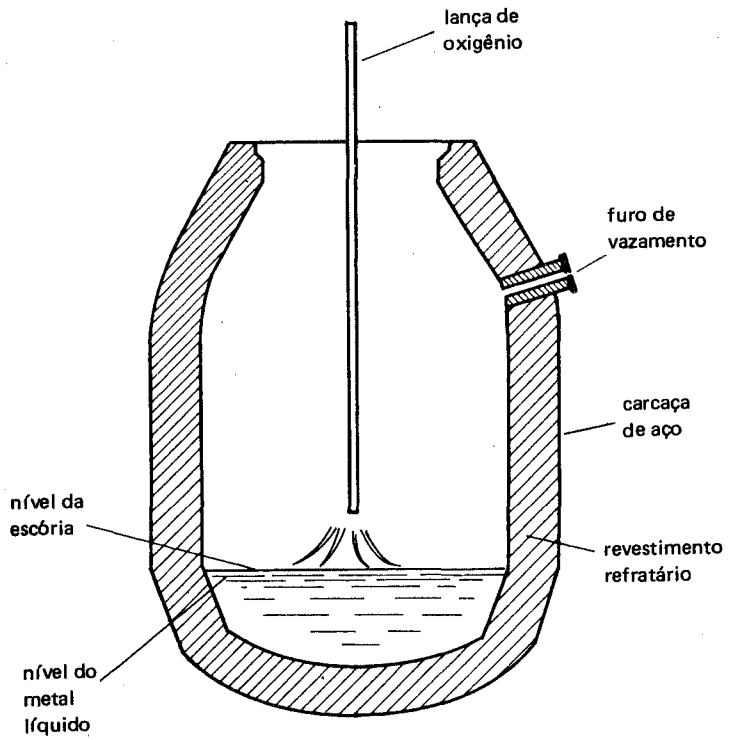


Figura 12 *Seção transversal esquemática de um conversor utilizando insuflação de oxigênio pelo topo.*

C – 3,60 a 4,20%
Si – 0,20 a 2,00%
Mn – 0,40 a 2,50%
P – 0,08 a 0,15%
S – 0,40% máx.

O forno pode ser basculado de modo a ser inclinado horizontalmente para ser carregado com gusa líquido e sucata sólida. A seguir é levado à posição vertical, a lança é abaixada e o oxigênio introduzido, geralmente a uma pressão mantida entre 0,10 kgf/mm^2 e 0,13 kgf/mm^2.

O mecanismo de eliminação do carbono consiste na sua oxidação na forma de CO e CO_2.

O silício é oxidado na forma de SiO_2, transferindo-se à escória. O manganês residual é geralmente maior do que nos outros processos, de modo que comumente não há necessidade de adição de Fe-Mn na panela de vazamento.

O fósforo é eliminado antes do carbono pela ação da cal, que é carregada logo após a introdução do oxigênio pela lança. Forma-se uma escória que garante a fixação do P_2O_5 resultante da oxidação.

O enxofre também é facilmente eliminado, devido à forte agitação do banho e pelo fato da escória apresentar-se mais quente e mais fluida.

O teor de nitrogênio do aço resultante é muito baixo – usualmente inferior a 0,004%, devido à utilização de oxigênio quase puro.

Uma das características do processo consiste na possibilidade, na prática moderna, de interromper-se a oxidação do carbono ao atingir um teor um pouco abaixo do desejado, o que facilita a sua recarbonetação posterior e possibilita a obtenção de aços com carbono mais elevado. O processo apresenta, pois, aplicações mais amplas, mesmo porque pode-se adicionar elementos de liga, de modo a produzir-se aços ligados.

Nas usinas modernas, um computador permite o cálculo preciso dos vários componentes da carga, a partir de dados relativos à especificação do aço a ser produzido. Com esses dados, o computador determina inclusive a quantidade de oxigênio a ser soprado durante a operação e, se necessário, corrige os pesos dos materiais prontos para serem carregados.

O fim do sopro pode ser determinado pela utilização dos cálculos feitos pelo computador. Nesse instante, a lança de oxigênio é retirada e o forno basculado para a posição horizontal, oposta à de carregamento, de modo a proceder-se ao vazamento do aço.

O uso do oxigênio promove, como foi mencionado, uma elevação às vezes exagerada da temperatura. O controle da temperatura é então feito pela regulagem da quantidade de sucata a ser adicionada.

Uma das variações do processo básico ao oxigênio, como acaba de ser descrito, consiste no "processo Kaldo", desenvolvido na Suécia pela Stora-Kopparberg.(16)

O forno assemelha-se ao conversor Bessemer, porém com fundo maciço. Pode ser basculado para a frente e para trás e pode ser girado rapidamente em torno do seu eixo longitudinal. O revestimento é de dolomita e magnesita.

A operação do forno é feita com o mesmo inclinado de 15 a 20° em relação à posição horizontal, podendo ser girado, nessa posição, ao longo do seu eixo longitudinal a uma velocidade até 30 rpm.

Utiliza-se lança para o sopro do oxigênio, o qual varre uma superfície maior de banho líquido, com o que se aumenta a área de reação e se protege o fundo do forno de um excessivo superaquecimento.

Nos primeiros minutos da operação, o Si e o Mn são em grande parte oxidados. À medida que a temperatura do banho aumenta, a cal incluída na

carga reage com o fósforo que se oxida. Quase simultaneamente o carbono é oxidado.

A operação é interrompida quando se atinge o teor desejado de carbono. O vazamento é então realizado, estando o banho a uma temperatura entre 1.620 e 1.650°C.

3 – **Processo Siemens-Martin*** O princípio deste processo consiste em aquecer-se uma determinada carga de material ferroso num "forno de sola" (*open-hearth*) mediante um combustível (geralmente gasoso) em mistura com ar, ambos previamente aquecidos em "recuperadores" ou "regeneradores", de modo a atingir-se uma temperatura de vazamento de aproximadamente 1.650°C.

A carga consiste de mistura de ferro gusa (líquido ou sólido) e sucata sólida, nas mais variadas proporções, de modo que se pode utilizar uma carga somente de ferro gusa ou somente de sucata. Normalmente, usa-se de 20 a 50% de ferro gusa.

A fase chamada "refino" dá-se, como nos processos anteriores, por reações de oxidação, facilitada pela presença de ferrugem na sucata, pelo óxido de ferro que se origina na superfície da carga sólida ou líquida devido à atmosfera oxidante das chamas e, principalmente, pela adição de minério de ferro que, no processo, atua essencialmente como agente oxidante.

Forma-se lentamente uma escória, que é responsável pelo refino, enquanto a oxidação inicial se realiza por intermédio dos MnO e FeO formados, principalmente este último.

A operação é demorada, composta essencialmente de duas fases, como se verá, o que permite um controle muito maior da composição química do aço, de modo que não somente aços de baixo carbono, como também de médio e alto carbono, além de aços-liga podem ser produzidos.

As Figuras 13 e 14 representam respectivamente as seções longitudinal e transversal de um forno Siemens-Martin, cujos característicos básicos são os seguintes:

– são de grandes dimensões e capacidade, podendo superar 200 t por operação;

– são, geralmente, fixos, existindo, contudo, tipos que basculam cerca de 10 a 12° para um dos lados, em sentido longitudinal, para remoção da escória e cerca de 30° para o lado oposto, de vazamento, por ocasião da corrida do aço;

* "Open-hearth", na literatura em língua inglesa. Este processo está sendo paulatinamente descontinuado, pelas maiores vantagens oferecidas pelos processos pneumáticos.

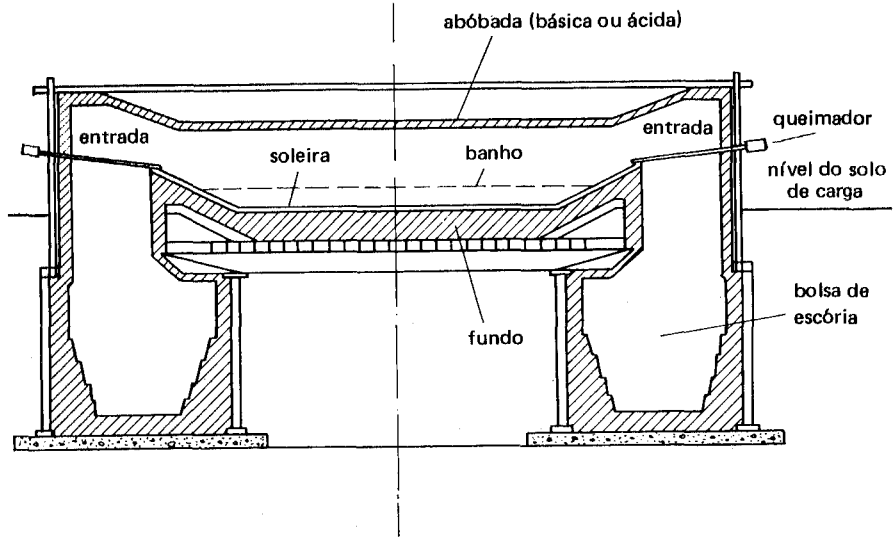


Figura 13 *Seção longitudinal esquemática de um forno "Siemens-Martin" aquecido por combustível líquido.*

– são constituídos, como as figuras mostram, de uma *soleira*, normalmente construída de refratário de natureza básica (magnesita ou dolomita), de um *revestimento* e *abóbada* de refratário de natureza ácida (sílica). Alguns apresentam todo o revestimento de natureza básica, inclusive a abóbada, com a vantagem de suportarem maior temperatura de serviço, permitindo a injeção de oxigênio e ar e a desvantagem de serem de maior custo;

– as paredes são sustentadas externamente por uma estrutura metálica, feita geralmente de uma blindagem de aço. São inclinadas, como a Figura 13 mostra, para facilitar a limpeza do forno;

– do lado de carregamento, situado no nível mais elevado do solo, estão situada as "portas de carregamento", cujo número é variável – 3, 5 ou 7 – em função das dimensões e capacidade do forno;

– do lado oposto, dando para o nível mais baixo do solo, localiza-se o "furo de corrida", situado no centro do forno. Esse furo, durante a operação, é mantido tapado com dolomita ou magnesita calcinada; em continuação ao furo, situa-se a calha de vazamento, construída de chapa soldada, revestida de tijolos sílico-aluminosos;

– abaixo das extremidades dos fornos estão localizadas as "bolsas" ou "câmaras de escória", onde se acumulam as poeiras e gotas solidificadas de escória, arrastadas pelos gases; são construídas de material refratário tipo cromo-magnésia;

– sob o forno, encontram-se os "regeneradores" ou "recuperadores de calor", constituídos de um empilhamento de tijolos refratários alojados em câmaras retangulares, cuja função é absorver o calor dos gases queimados, para depois pré-aquecer o ar e, eventualmente, o gás usado como combustível. São construídos de tijolos sílico-aluminosos;

– os "queimadores de gás" (Figura 13) são colocados lateralmente, no sentido longitudinal do forno e inclinados de 10 a 15°; sobre os mesmos situam-se os dutos de chegada de ar;

– como a maioria dos fornos Siemens-Martin trabalham com tiragem natural, há "chaminés" cujas dimensões podem chegar a superar 2,5 m de diâmetro e 70 m de altura;

– finalmente, dispositivos importantes são as "válvulas de inversão", cujo objetivo é realizar a comunicação entre os regeneradores de ar e de gás e os dutos desses fluidos e ligar os regeneradores com a chaminé. A Figura 15[6] representa esquematicamente a localização dessas válvulas e mostra a circulação de gases no forno Siemens-Martin, permitindo compreender a seqüência de funcionamento do processo de regeneração do calor: enquanto os regeneradores B e C – para pré-aquecer o gás e o ar respectivamente – localizados à esquerda estão sendo pré-aquecidos, C e B do lado direito estão recebendo ar e gás para a combustão. A inversão periódica das válvulas é feita de modo a permitir a utilização de um ou outro conjunto de regeneradores, como se pode verificar facilmente pelo exame da figura.

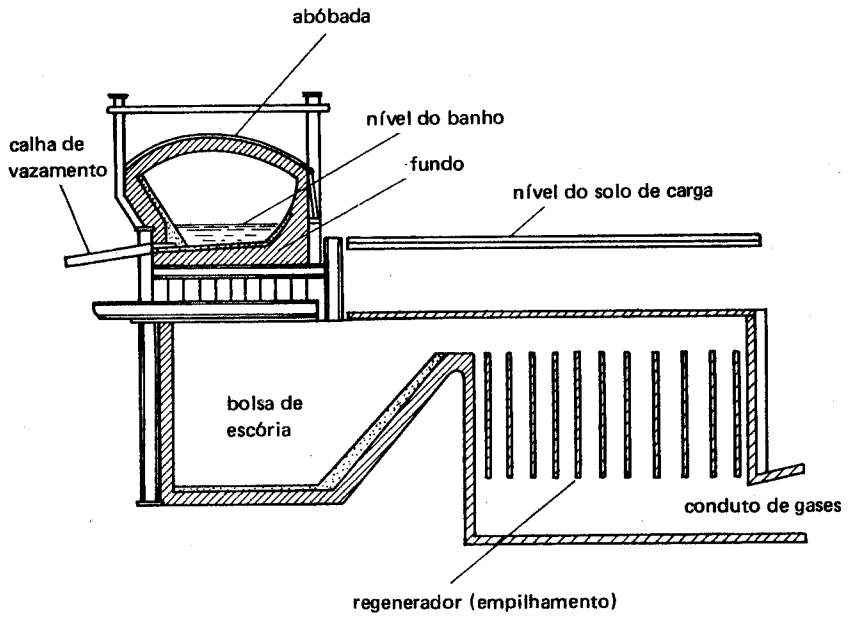


Figura 14 *Seção transversal esquemática de um forno "Siemens-Martin".*

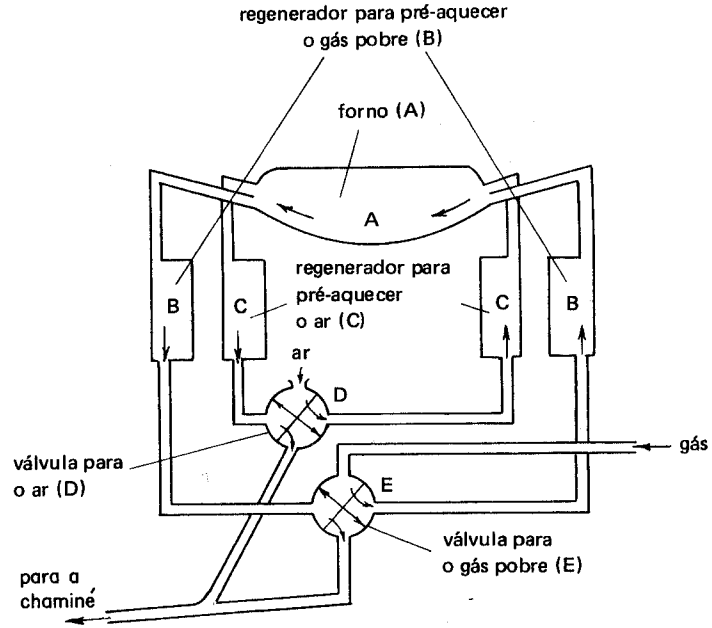


Figura 15 *Representação em diagrama da circulação de gases num forno "Siemens-Martin".*

3.1 **Operação dos Fornos Siemens-Martin** A operação de um forno Siemens-Martin pode ser dividida nas etapas seguintes:

– carregamento e fusão da carga;
– período de trabalho ou de refino;
– acabamento da corrida.

Geralmente o tempo total de duração da operação é de cerca de 10 horas para fornos com capacidade em torno de 200 t.

O uso de oxigênio encurta esse período de cerca de 2 h.

Os períodos mais longos correspondem ao carregamento e fusão – cerca de 3 horas –, e à fervura (antes do refino) – cerca de 4 h 30 min.

As cargas dos fornos Siemens-Martin são variadas, como já se mencionou:

- somente gusa líquido, mais minério de ferro como substância oxidante;
- gusa líquido e sucata, mais minério de ferro;
- gusa sólido, sucata e minério de ferro;
- somente sucata (mais raramente).

O tipo de carga varia com as condições da usina: disponibilidade ou não de gusa líquido (usina siderúrgica integrada), custo do gusa e da sucata, dimensões dos fornos etc.

O carregamento da carga sólida é feito por máquinas de carregar de construção especial, que podem locomover-se paralelamente e perpendicularmente em relação à área de carga do forno. Essas máquinas são dotadas de um dispositivo, denominado "aríete", que se desloca verticalmente e pode girar 360° e ao qual se engatam as caixas de carregamento.

Normalmente carrega-se primeiro alguma sucata no fundo e sobre ela o fundente (calcário) e o minério de ferro, este último quando a porcentagem de gusa líquido é elevada.

Quando a carga sólida está parcialmente fundida, é carregado o gusa líquido por intermédio de "bicas" especiais, que recebem o gusa da panela.

Logo após a adição do gusa líquido, iniciam-se as importantes reações de oxidação, pela ação dos óxidos de ferro do minério e da sucata.

Os primeiros elementos a serem removidos são o silício e o manganês, de acordo com as seguintes reações:

$$Si + 2FeO \rightarrow SiO_2 + 2Fe$$

$$Mn + FeO \rightarrow Mn + Fe$$

O SiO_2 e o MnO incorporam-se à escória. Os teores residuais de Si e Mn, no final da corrida, são respectivamente 0,01% Si e 0,10 a 0,25% Mn.

O carbono é oxidado a seguir:

$$C + FeO \rightarrow CO + Fe$$

O CO formado, ao escapar, produz agitação do banho.

Eventualmente, ocorre oxidação do fósforo, de acordo com a reação:

$$2P + 5FeO \rightarrow P_2O_5 + 5Fe$$

O P_2O_5 formado combina-se com a cal livre para formar fosfatos de cálcio, e se incorpora à escória.

Para que o fósforo seja oxidado é necessário, entretanto, que a escória apresente-se fortemente básica.

A evolução do gás CO originada pela oxidação do carbono provoca, como se mencionou, uma agitação uniforme e suave, comumente chamada de "fervura do óxido de ferro".

A evolução do gás CO_2, devida à calcinação do calcário, provoca maior turbulência e o fenômeno é comumente chamado de "fervura da cal".

A eliminação do enxofre faz-se, sobretudo, a altas temperaturas, na presença de escórias que também são fortemente básicas:

$$2S + 2CaO \rightarrow 2CaS + O_2$$

O CaS formado incorpora-se à escória.

Terminadas as "fervuras" do banho, inicia-se o "período de trabalho" ou de "refino".

Neste período, procura-se reduzir o fósforo e o enxofre a teores abaixo dos máximos especificados, eliminar o carbono rapidamente e levar o banho a condições que permitam a desoxidação final e ao vazamento, mantendo ao mesmo tempo a escória com a composição química e a viscosidade apropriadas. Esta escória, no período de trabalho, deve conter grande quantidade de agentes oxidantes e, no fim do período, deve apresentar-se fortemente básica.

Nesse período, retiram-se, a intervalos regulares, amostras do banho para análise química.

Os ajustes finais da composição da escória, da composição do aço e de sua temperatura são realizados antes do vazamento.

A temperatura deve ser tão uniforme quanto possível, durante todo o banho.

Os teores de P e S estão abaixo dos limites especificados, assim como do C e do Mn. O carbono, nos aços produzidos pelo processo Siemens-Martin, pode variar de 0,2 a pouco acima de 1,0%. Durante a corrida, procura-se manter o carbono pouco abaixo do teor especificado, de modo a permitir que o seu aumento, devido à adição final de ferro-ligas, não ultrapasse o especificado.

Fazem-se então as necessárias adições de ferro-ligas, conforme o tipo de aço programado e procede-se ao vazamento, para o que se retira o tampão do furo de corrida.

A temperatura do banho deve situar-se em torno de 1.600°C para os "aços acalmados" e pouco acima para os "aços efervescentes".

Os "aços acalmados", geralmente de maior teor de carbono, são utilizados quando se deseja, por exemplo, produzir, a partir dos lingotes resultantes, peças forjadas. A técnica de produzir aços acalmados consiste numa desoxidação mais intensa pela adição de Fe-Si e Fe-Mn.

Os "aços efervescentes" são de carbono geralmente abaixo de 0,20%. São utilizados na produção de chapas e arames. Não são suficientemente desoxidados, de modo que, no instante do vazamento, contêm quantidade razoável de FeO dissolvido, o qual, ao reagir com o carbono do aço, forma bolhas de CO que produz uma efervescência nas lingoteiras.

Há também os "aços semi-acalmados", tipos intermediários entre os dois anteriores, destinados à fabricação de perfis estruturais e chapas grossas.

A desoxidação final, quando necessária, é feita na panela por ocasião do vazamento, pela adição de alumínio granulado.

4 – Processo duplex Consiste na combinação de dois processos, como por exemplo conversor Bessemer ácido e Siemens-Martin básico. No forno Bessemer, o ferro gusa proveniente do alto-forno é inteiramente oxidado, de modo a reduzir ao mínimo os teores de Si e Mn e oxidar grande parte do carbono. A seguir, o material é transferido ao forno Siemens-Martin básico, onde o restante do carbono e o fósforo são oxidados. O aço é, então, acabado, recarbonetado e recebe as adições finais de ferros-ligas.

5 – Processos elétricos Já sumariamente descritos no segundo volume desta obra.

CAPÍTULO IV

PROCESSOS DE REDUÇÃO DIRETA

1 – Introdução O princípio da "redução direta" consiste em tratar-se óxidos de ferro praticamente puros (Fe_2O_3 ou Fe_3O_4) a temperaturas usualmente entre 950 e 1.050°C, na presença de uma substância redutora, resultando freqüentemente uma massa escura e porosa, conhecida com o nome de "ferro esponja".

A redução é realizada, pois, no estado sólido e os processos correspondentes têm por objetivo eliminar o alto-forno, produzindo-se aço diretamente do minério ou produzindo-se um material intermediário, a ser empregado como "sucata sintética" nos fornos de aço.

Os processos de redução direta seriam aconselhados, pelo menos teoricamente, para países que não dispõem do melhor carvão de pedra coqueificável ou que não possuam minérios de alto teor em ferro.

Basicamente, todos os processos de redução direta podem ser agrupados em duas grandes classes:

- processos que utilizam redutores sólidos
- processos que utilizam redutores gasosos

Alguns deles serão a seguir sucintamente descritos.[17]

2 – Processo SL/RN A Figura 16 representa esquematicamente o processo. O redutor é coque moído. A carga consiste de concentrados de minério de ferro, na forma moída ou na forma de "pelotas", coque e calcário moídos.

É a mesma levada a um forno rotativo, onde a temperatura é mantida na faixa de 1.000 a 1.076°C. O produto sólido resultante é resfriado e o ferro é separado mediante separador magnético. O coque não utilizado é removido e reutilizado. O processo permite produzir material contendo enxofre entre 0,02 e 0,05% apenas, o que o torna adequado para a utilização em fornos de aço.

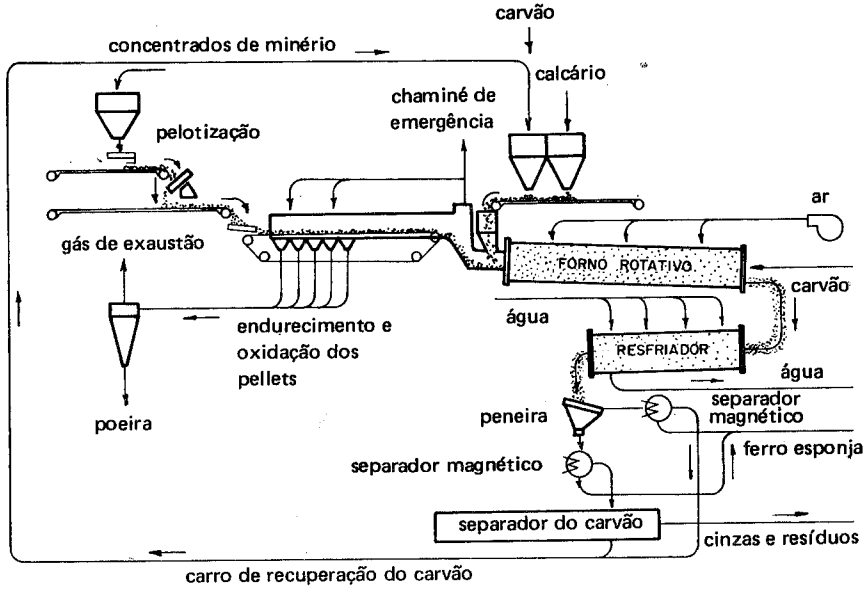


Figura 16 *Representação esquemática do processo SL/RN de redução direta.*

3 — **Processo Hoganaes** Neste processo, são carregadas, em recipientes cerâmicos, camadas alternadas de minério de ferro de alto teor em ferro, moinha ou finos de carvão coque e calcário.

Os recipientes são aquecidos em fornos dos tipos utilizados na indústria cerâmica, à máxima temperatura de 1.260°C. Os fornos são aquecidos pela queima de gás de geradores e do CO resultante da redução do minério. Os recipientes são resfriados no interior do forno, removidos e o ferro reduzido é separado. Obtém-se "ferro esponja", e uma parte é moída e refinada para ser empregada em processos da metalurgia do pó. O tempo de permanência de um recipiente no interior do forno é de aproximadamente 12 dias.

4 — **Processo Wiberg-Soderfors** O redutor neste caso é gasoso. A Figura 17 apresenta a seção transversal do equipamento e serve de indicação do princípio operacional do processo. Como se vê, o item principal é o forno, construído de material refratário, em forma de chaminé, com altura de cerca de 24 m e de diâmetro interno na base com cerca de 2,80 m e no topo, de 1,10 m. Os gases redutores consistem numa mistura de 20 a 30% de hidrogênio e 70 a 80% de CO, produzidos num "carburador" a coque ou carvão de madeira, aquecido eletricamente. Esses gases, antes de serem introduzidos na seção mais baixa do forno de redução, passam através de uma camada de dolomita ou calcário, para remoção do enxofre. Os gases quentes, a cerca de 1.010°C, reduzem a carga descendente de óxido de ferro. A carga consiste de minério de ferro, "sínter" ou "pelotas".

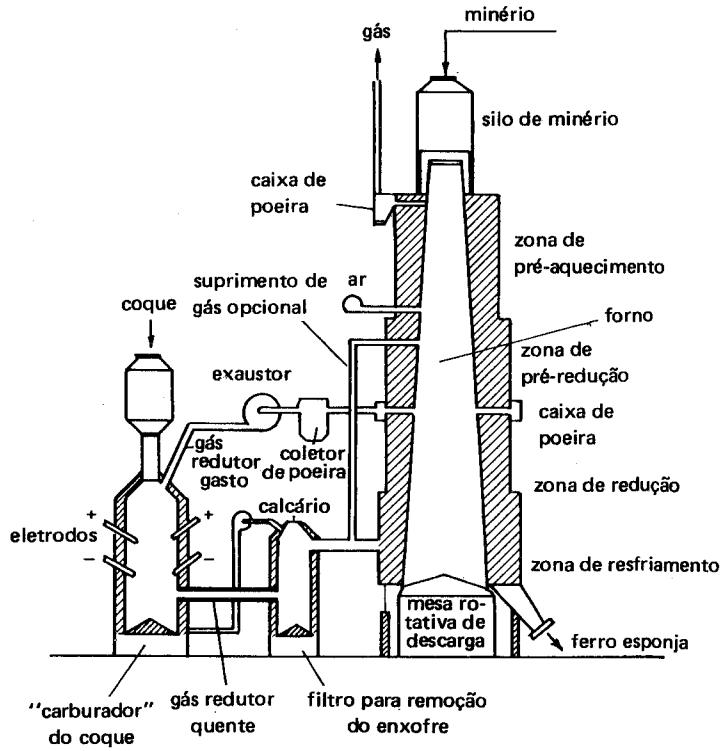


Figura 17 *Seção transversal esquemática indicativa do princípio operacional do processo Wiberg-Soderfors.*

O produto resultante apresenta-se com uma redução de aproximadamente 90%; é primeiramente resfriado entre 90 e 150°C numa câmara resfriada a água e, em seguida, encaminhado aos fornos de aço.

5 – Processo Midrex A Figura 18 apresenta esquematicamente o processo desenvolvido pela "Midland-Rose Corporation". O redutor é uma mistura de CO e hidrogênio, obtidos a partir de gás natural "re-formado". A rigor, o "re-formador" utiliza uma mistura de gás natural e gás não utilizado, recuperado do forno redutor. O forno é do tipo vertical e a carga consiste de "pelotas" de óxido de ferro. A zona de redução situa-se na parte superior do forno e o ferro esponja resultante é resfriado na sua parte inferior.

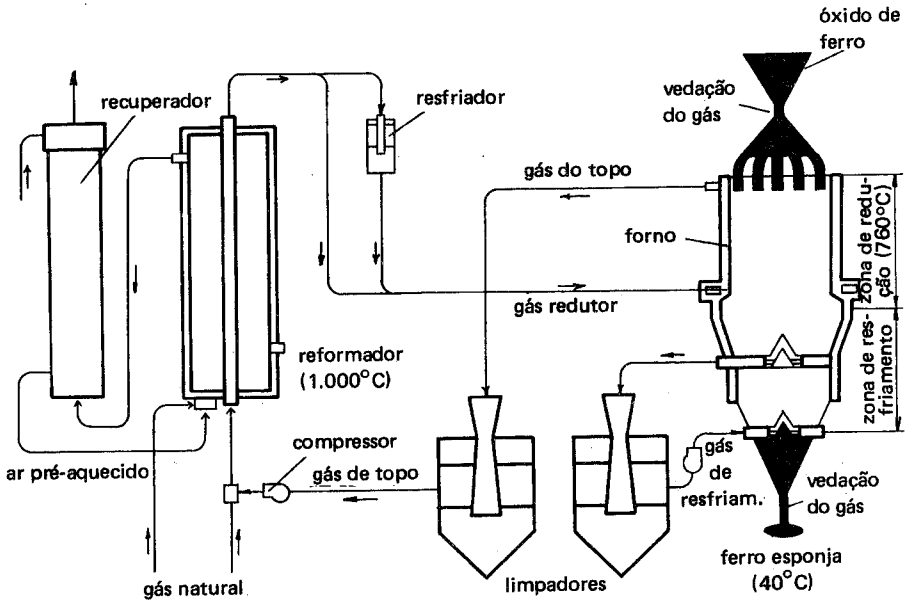


Figura 18 *Representação esquemática do processo Midrex.*

6 – Processo HyL Desenvolvido no México. O combustível resulta de gás natural misturado com vapor. A mistura é "re-formada", originando CO e H_2, e dessulfurada. Os gases passam, a seguir, por torres de resfriamento a água de modo a remover-se o excesso de vapor. Em seguida, são novamente pré-aquecidos, entre 770 e 980°C e introduzidos nas "retortas" de redução, cheias de minério de ferro de alto teor ou aglomerados a partir de finos de minério.

CAPÍTULO V

PROCESSOS DE FUNDIÇÃO CONTÍNUA

Estes processos permitem a moldagem de aço líquido diretamente em formas estruturais.

A Figura 19[18] mostra esquematicamente o princípio do processo. O aço líquido, contido numa "panela intermediária", é vazado no interior de um molde metálico (geralmente de cobre) resfriado a água, que dá passagem livre pelo fundo. Devido ao contato com as paredes do molde, forma-se inicialmente uma casca sólida, de modo a ter-se no interior uma "cratera", contendo ainda aço líquido.

A espessura da casca aumenta devido à ação dos borrifos de água e a seção solidifica inteiramente, à medida que a peça se movimenta para baixo.

A massa sólida é suportada por "cilindros de suporte"; estes servem também para controlar a velocidade de retirada da peça do interior do molde.

Um dos problemas do processo é justamente a formação da "cratera", porque se a casca solidificada tiver tendência a aderir às paredes do molde, ela poderá romper devido às forças de tração exercidas pelos cilindros de suporte.

Assim, é necessário um projeto adequado do molde, para evitar esse inconveniente.

Existem vários tipos de "máquinas para fundição contínua", de modo a permitir a produção de formas que correspondam às seções básicas intermediárias, por exemplo, seção quadrada ou retangular ou mesmo redondas de pequenas dimensões.

Aços-carbono e aços-liga, aços inoxidáveis e aços para ferramentas têm sido fundidos, com êxito, por processos de fundição contínua.

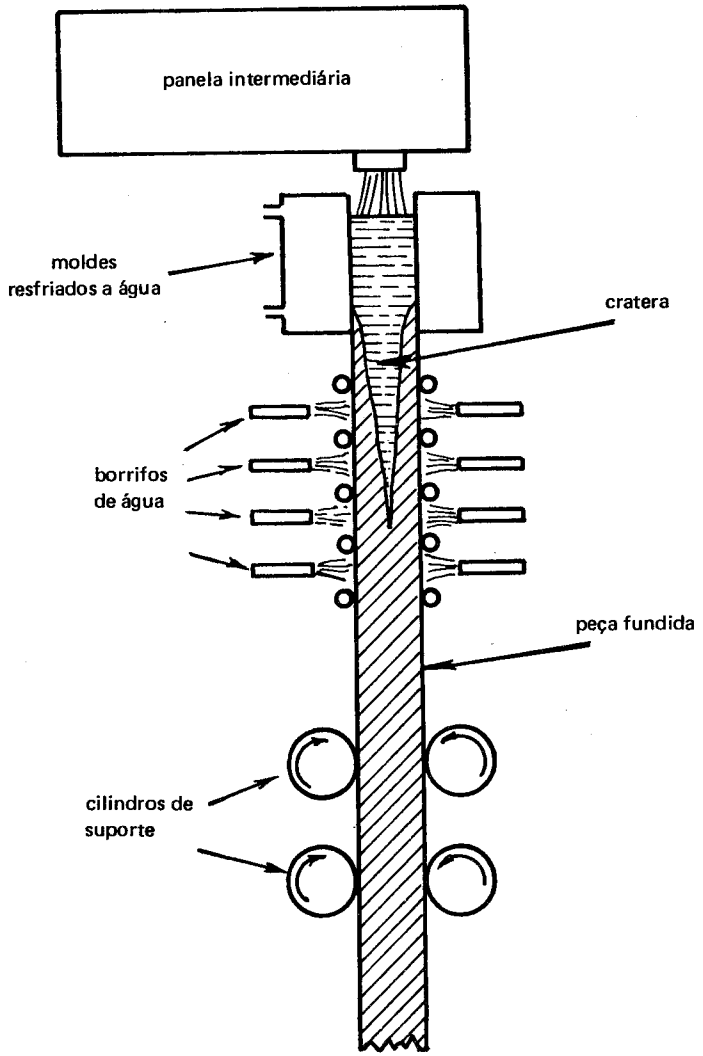


Figura 19 *Representação esquemática da fundição contínua.*

CAPÍTULO VI

PRODUÇÃO DE METAIS NÃO-FERROSOS

1 – Introdução Não cabe nesta obra um estudo pormenorizado dos métodos de processamento dos metais não-ferrosos, a partir dos seus minérios, de modo que a exposição será limitada aos principais metais outros que o ferro, ou seja, cobre, alumínio, estanho, chumbo e zinco e, ainda assim, a descrição será apenas de caráter superficial, mais a título informativo, para que o leitor adquira uma idéia dos referidos métodos e suas eventuais dificuldades.

2 – Cobre Os minérios de cobre podem ser sulfetados ou óxidos, além, mais raramente, do próprio cobre nativo.

Geralmente, o teor de metal contido é muito baixo, da ordem de 1 a 3%.

Os mais importantes são os sulfetados, entre os quais a calcopirita, de fórmula $CuFeS_2$. Além de cobre e de enxofre, esses minerais contêm ferro, zinco, arsênio, antimônio, bismuto, selênio, telúrio e outros elementos.

A primeira fase do processo de extração do cobre é a "concentração" do seu minério.

Este é peneirado, britado, moído e submetido ao processo de "flotação", que consiste na adição de água, misturada com produtos químicos adequados. Essa mistura molha somente as partículas chamadas "estéreis", que se decantam, formando um lodo. Por insuflação de ar, origina-se uma agitação e formam-se pequenas bolhas de ar onde se fixam as partículas sólidas de sulfeto de cobre e de ferro que são levadas para a superfície, flutuando e formando uma espuma rica em cobre.

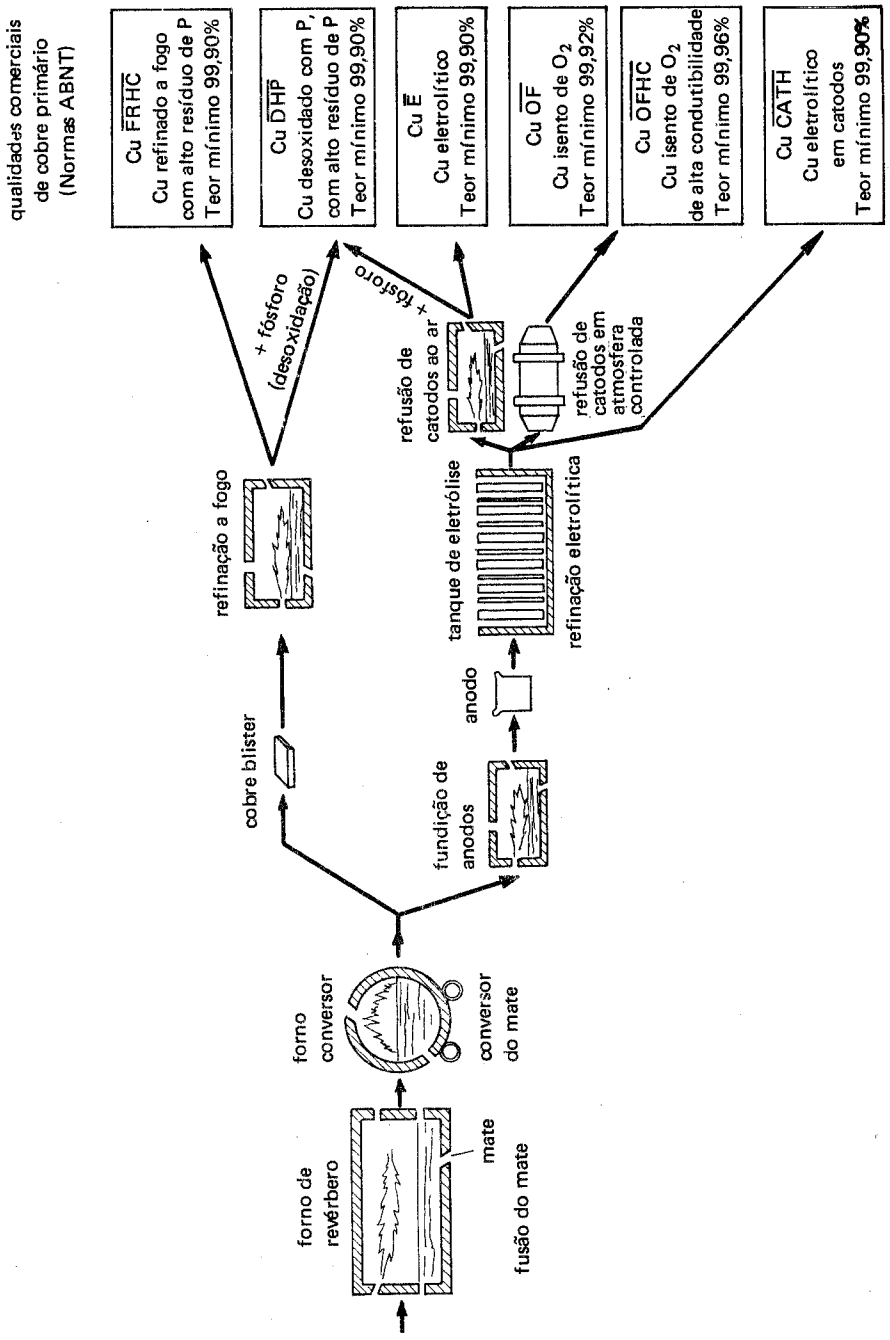


Figura 20 *Representação esquemática do processo clássico de refino do cobre.*

O material é novamente decantado e aspirado, obtendo-se, por filtragem final, um concentrado com teor de cobre entre 15 e 30%.

A Figura 20[19] representa esquematicamente o processo clássico de refino do cobre a partir do concentrado acima.

Esse concentrado é levado a um forno de revérbero, juntamente com fundente, cuja função é formar a escória pela sua combinação com as impurezas do concentrado. Obtém um sulfeto duplo de cobre e ferro, denominado "mate", contendo geralmente entre 35 e 55% de cobre metálico, além de ferro e enxofre.

A temperatura do forno é superior a 1.100°C, de modo a ter-se a fusão do material. O ferro é oxidado na forma de FeO.

As reações que ocorrem podem ser resumidas na equação abaixo:[20]

$$Cu_2S + nFeS + FeO + SiO_2 + CaO \rightarrow$$

$$\rightarrow Cu_2S,nFeS + \text{silicato complexo de Fe e Ca}$$

O $Cu_2S,nFeS$ constitui o mate e o silicato complexo de Fe e Ca, a escória. Esta sobrenada, facilitando a retirada do mate.

O mate é a seguir oxidado num "conversor", onde é introduzida uma corrente de ar que, em presença de sílica, atravessa o mate líquido.

Numa primeira fase, o sulfeto de ferro é oxidado. O óxido de ferro resultante une-se à sílica e é eliminado na escória, a qual é retirada basculando-se o conversor. As reações podem ser assim resumidas:[20]

$$2Cu_2S,nFeS + 3nO_2 \rightarrow 2Cu_2S + 2nSO_2 + 2nFeO$$

$$2n(SiO_2 + FeO) \rightarrow 2nFeSiO_3$$

Essas reações são de natureza exotérmica.

Numa segunda fase, o Cu_2S restante (mate branco) é oxidado de acordo com as reações:

$$Cu_2S + 1{,}5O_2 \rightarrow Cu_2O + SO_2$$

$$2Cu_2O + Cu_2S \rightarrow SO_2 + 6Cu$$

ou

$$Cu_2S + O_2 \rightarrow 2Cu + SO_2$$

A primeira fase dura cerca de 20 horas e, ao aproximar-se o fim, procura-se aquecer o material a uma temperatura em torno de 1.200°C.

A segunda fase dura de 4 a 7 horas e a temperatura final é de cerca de 1.100°C.

O metal resultante é chamado "cobre blister", contendo em geral de 98 a 99,5% de cobre e as impurezas antimônio, arsênio, bismuto, ferro, chumbo, níquel, selênio, enxofre, telúrio e zinco. Podem também estar presentes ouro e prata.

O "cobre blister" deve ser refinado, sendo o processo clássico o de "refinação a fogo". Os fornos empregados são do tipo "revérbero", aquecidos a óleo, gás ou carvão moído.

Junto com o cobre blister fundido, ou sólido em placas, carregam-se quantidades suficientes de fundente (sílica) para fixar os óxidos de alumínio, ferro e magnésio que se formam durante o processo.

A atmosfera do forno, cuja temperatura convém manter em torno de 1.150°C, deve ser oxidante, o que se consegue pela introdução de ar.

Numa primeira fase, forma-se óxido cuproso, Cu_2O. O ferro é eliminado pela sílica e junta-se à escória. O enxofre, o antimônio e o arsênio são eliminados na forma de vapores. O chumbo e o zinco formam, como o ferro, óxidos que se incorporam à escória.

Esta escória é, então, eliminada.

Segue-se a fase na qual se introduz uma tora de madeira verde no banho. O vapor que resulta da evaporação da seiva da madeira verde acelera a remoção do enxofre. Ao mesmo tempo, esses vapores, que contêm vapor de água, hidrogênio e hidrocarbonetos, promovem a redução parcial do Cu_2O. A redução é completada cobrindo-se o banho com uma camada de antracito, carvão vegetal ou coque.

Toda a fase de refino é longa: 16 a 24 horas.

Outro método de refino consiste na "refinação eletrolítica".

Nela, empregam-se "anodos de cobre"fundidos a partir de cobre blister refinado a fogo, com um teor mínimo de cobre de 99%.

O eletrólito, mantido a uma temperatura entre 40° e 60°C, é uma solução de sulfato de cobre.

O cobre deposita-se sobre o catodo que, por sua vez, é de cobre, com a mesma pureza do cobre a ser nele depositado.

As impurezas contidas Sb, As, Co, Fe, Ni e Zn ficam dissolvidas no banho eletrolítico ou depositam-se como compostos insolúveis. As impurezas Pb, Se, Te, Sn e os metais preciosos decantam-se no fundo do tanque, na forma de lodo, permitindo sua recuperação.

A operação demora várias semanas.

A Figura 20 mostra ainda as qualidades comerciais de cobre primário, segundo as normas ABNT, obtidas a partir do minério.

3 – Alumínio O minério de alumínio predominante é a bauxita, a qual é constituída essencialmente de um óxido hidratado – $Al_2O_3.H_2O$ –, contendo ainda óxido de ferro, sílica, óxido de titânio e pequenas quantidades de outros compostos. Nos minérios utilizados na produção de alumínio, o teor de Al_2O_3 varia de 40 a 60%.

A metalurgia do alumínio compreende basicamente duas fases:

– obtenção da alumina, a partir do minério;
– eletrólise da alumina.

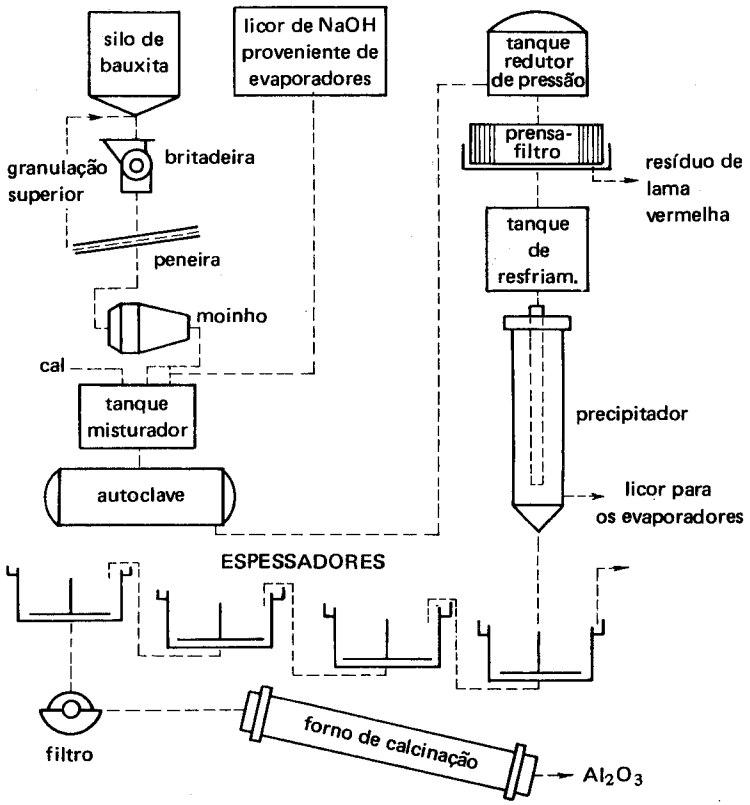


Figura 21 *Representação esquemática das principais fases de obtenção de alumina (Al_2O_3) a partir da bauxita, pelo processo Bayer.*

3.1 **Obtenção da alumina** Emprega-se, para o preparo da alumina, quase que exclusivamente o "processo Bayer", representado esquematicamente na Figura 21[21].

A bauxita é inicialmente britada e, em seguida, moída em moinhos de bola, de modo a ter-se partículas entre 80 e 100 mesh.

Esse pó é misturado intimamente, num tanque de mistura, com uma solução de hidróxido de sódio. A mistura é bombeada numa autoclave, ou seja, num recipiente de aço submetido a altas pressões (da ordem de 4 kgf/cm^2) e a elevada temperatura (da ordem de 250°C). Na autoclave ocorre o processo de "digestão", do qual resulta um aluminato de sódio solúvel, de acordo com a seguinte equação:

$$Al_2O_3 + 2NaOH \rightarrow 2NaAlO_2 + H_2O$$

A sílica forma com a soda e a alumina um silicato duplo insolúvel ($3Al_2O_3$, $3Na_2O$, $5SiO_2$, $5H_2O$). Os óxidos de ferro e de titânio permanecem praticamente insolúveis.

Completado o processo de digestão, a solução de aluminato de sódio é tratada por sedimentação ou decantação e por filtração sob pressão, de modo a separá-la dos resíduos em suspensão, constituídos essencialmente de um hidróxido de ferro impuro contendo a maior parte da sílica, outras impurezas e uma pequena quantidade de alumina. Esta última é parcialmente recuperada por lavagem com licor cáustico e água quente e devolvida ao processo.

Depois da filtração, a solução é levada a um tanque de resfriamento e aos depósitos de precipitação onde ocorre a seguinte reação:

$$2Na_3AlO_3 + 3H_2O = 3Na_2O + Al_2O_3 + 3H_2O$$

O licor de soda contém uma certa proporção de aluminatos; é ele levado a evaporadores para concentração, de modo a recircular o aluminato através do ciclo.

A suspensão de alumina hidratada é levada a espessadores, filtrada e calcinada, num forno rotativo de forma tubular, a cerca de 1.200°C, obtendo-se como produto final a alumina – Al_2O_3 –, com 99,5 a 100% de óxido de alumínio e com certas impurezas tais como óxido de ferro, óxido de silício e óxido de sódio.

3.2 **Eletrólise da alumina** A etapa seguinte é a redução da alumina. Devido à grande afinidade do alumínio com o oxigênio, não é possível reduzir a alumina pelos redutores usuais, carbono e óxido de carbono. Recorre-se, então, ao processo eletrolítico, em que o banho eletrolítico é constituído de criolita, ou seja, um fluoreto de sódio e alumínio (AlF_3, 3NaF). Neste banho de criolita, coloca-se a alumina em solução. Em outras palavras, o eletrólito atua como fundente e dissolve o óxido de alumínio.

A Figura 22[21] esquematiza o processo. O catodo corresponde ao fundo da célula eletrolítica e ao alumínio que se forma paulatinamente; o anodo é constituído de eletrodos de carbono. A operação é realizada a cerca de 950°C.

As reações que ocorrem podem ser resumidas na equação seguinte:[20]

$$Al_2O_3 \rightarrow 2Al + 1{,}5O_2$$

O alumínio deposita-se no fundo e é retirado periodicamente. Sua pureza varia de 99,4 a 99,85%, sendo o silício e o ferro as principais impurezas.

Para obter-se alumínio de pureza 99,99%, é necessária uma refinação adicional, o que pode ser feito eletroliticamente, numa cuba eletrolítica semelhante à empregada na redução da alumina, contendo três camadas líquidas: a inferior, anódica, constituída de uma liga Al-Cu com cerca de 33% de cobre; a intermediária, que constitui o eletrólito propriamente dito, e

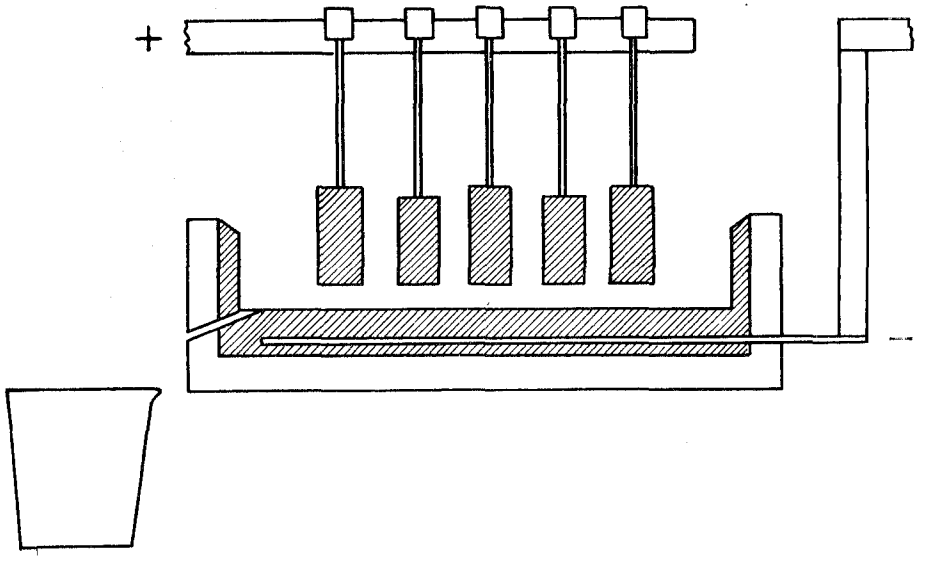


Figura 22 *Representação esquemática de um tipo de célula eletrolítica para redução de alumina.*

que é uma mistura de fluoreto de alumínio (23%), fluoreto de sódio (17%) e cloreto de bário (60%); e a superior que corresponde a alumínio refinado, protegido de oxidação pelo ar por uma crosta de banho. A temperatura do banho é da ordem de 750°C.

As impurezas, pela passagem da corrente elétrica, são retidas no anodo e no eletrólito.

Para fabricar uma tonelada de alumínio são necessárias cerca de duas toneladas de alumina.

Para produzir esta quantidade de alumina, estima-se que são necessárias 5 t de bauxita, 3 t de lignito, 0,15 t de soda e 0,250 t de óleo combustível.

Para serem transformadas em uma tonelada de alumínio metálico, as duas toneladas de alumina exigem aproximadamente 0,1 t de criolita, 0,4 t de coque de petróleo e 17.000 kWh de energia elétrica.

4 — Zinco O principal mineral de zinco é a blenda ZnS; sua ganga é de natureza sílico-calcária, podendo, às vezes, conter galena (mineral de chumbo), sulfeto de cádmio e ferro (na forma de pirita).

Outros minerais são a "smithsonita" ($ZnCO_3$) e a "willemita" ($ZnSO_4$).

Os minérios são inicialmente concentrados de modo a elevar-se o teor de zinco para 50 ou 60%. A concentração é realizada por gravidade ou por flotação.

O concentrado, além de Zn, apresenta Pb, Fe, Ca, Cu, S (em teores elevados, pois o minério é sulfeto) e, eventualmente, tálio, índio, gálio, germânio, selênio e telúrio.

A Figura 23 mostra, esquematicamente, os fluxogramas representativos dos dois processos básicos de obtenção do zinco: *processo pirometalúrgico* e *processo hidrometalúrgico.*

No *processo pirometalúrgico*, o minério concentrado sofre uma operação inicial de "ustulação", à temperatura entre 550°C e 600°C, com o objetivo de dessulfurá-lo, sendo a reação fundamental a seguinte:

$$2ZnS + 3O_2 \rightarrow 2ZnO + 2SO_2$$

Também as impurezas Fe, Cu, Cd, Sb e As são oxidadas nas formas respectivamente de Fe_2O_3, CuO, CdO, Sb_2O_3 e As_2O_3.

Misturado com coque, o minério ustulado, ou seja, o ZnO, é levado a uma retorta, onde é submetido a um processo de destilação, a cerca de 1.400°C, ocorrendo a seguinte reação básica:

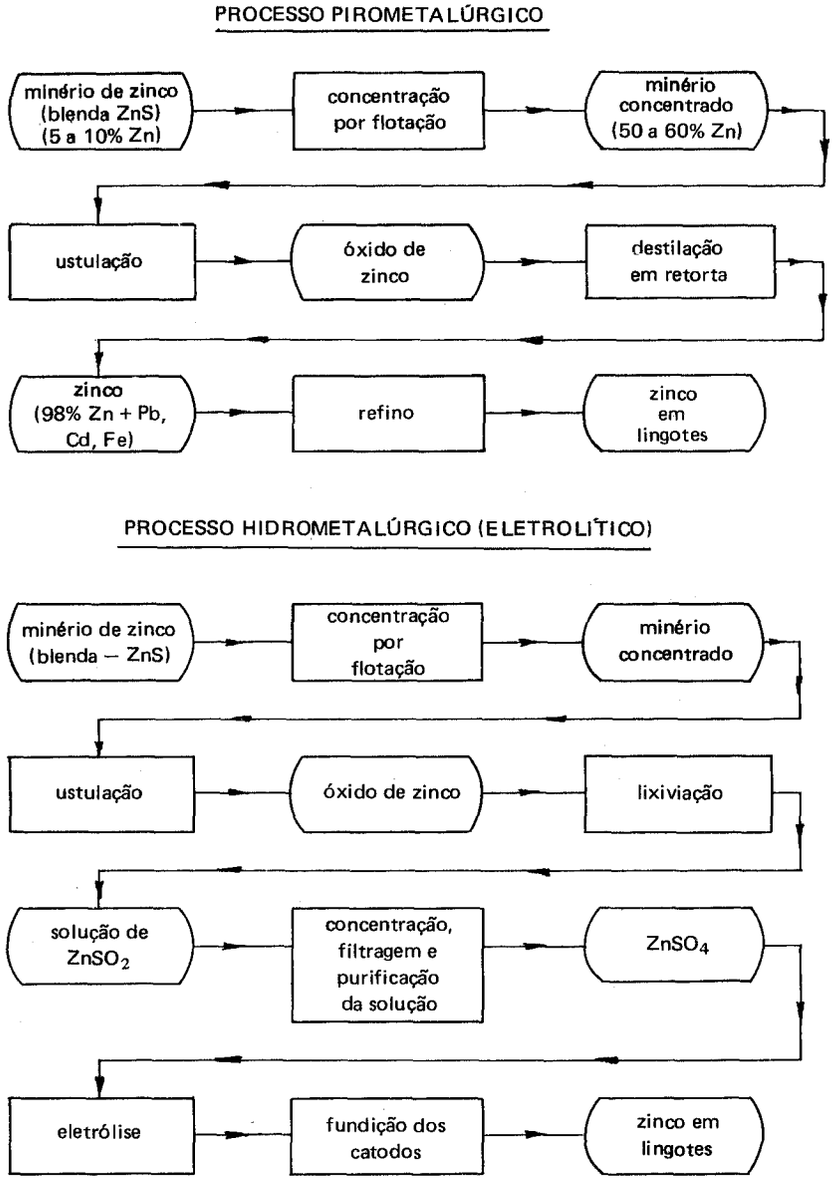


Figura 23 *Representação esquemática dos fluxogramas representativos dos métodos usuais de obtenção de zinco.*

$$ZnO + CO \rightarrow Zn(vapor) + CO_2,$$

resultando, pois, zinco no estado de vapor, de pureza aproximada 98% e contendo ainda Pb, Cd e Fe.

O vapor de zinco é condensado, resultando zinco líquido, que é vazado periodicamente em lingotes. Estes são submetidos a um processo de refinação, que pode ser realizado ou por "liquação" ou por "destilação fracionária".

No primeiro caso, o zinco é fundido em forno de revérbero. Como o Zn e o Pb não se misturam no estado líquido, ocorre uma separação em duas camadas, a superior constituída de zinco. As impurezas e os outros óxidos sobrenadam o banho e são periodicamente retirados. Resulta "zinco metálico", com pureza que pode atingir 99,99%.

Na "destilação fracionária" utiliza-se o princípio das diferenças de pressão de vapor e de pontos de ebulição do zinco e das impurezas. Obtém-se também "zinco metálico" com pureza de 99,99%.

No *processo hidrometalúrgico*, as primeiras fases – concentração e ustulação – são idênticas às do processo anterior, resultando igualmente ZnO.

Este é submetido a uma operação de "lixiviação", realizada pelo ataque com uma solução de ácido sulfúrico a 10% de concentração a 60°C. Resulta uma solução de $ZnSO_2$ que deve ser purificada, sendo, para isso, submetida a operações de concentração e filtragem.

A "purificação " permite eliminar as impurezas Cu, Cd, Fe, As e Sb. A eliminação do ferro é feita pela oxidação do sulfato ferroso por meio de MnO_2 e a eliminação do Cu e do Cd é levada a efeito pela adição de pó de zinco.

Do processo resulta uma solução pura de $ZnSO_4$, a qual é submetida a uma "eletrólise", em cuba eletrolítica onde os anodos são de chumbo e os catodos de alumínio. Opera-se essa eletrólise com elevada densidade de corrente (350 a 1.000 ampères/m^2), temperatura em torno de 400°C e tensão aproximada de 3,5 volts.

O zinco deposita-se no catodo, com pureza que pode ser superior a 99,98%.

Dos resíduos do banho, recupera-se cádmio, cobre e, eventualmente, metais preciosos e germânio.

5 – Estanho O principal minério é a cassiterita SnO_2, geralmente muito impuro, pois o teor de estanho contido é, em média, 1%. Há minérios contendo até 4% de estanho.

Os metais associados à cassiterita são, entre outros, W, Pb, Zn e Cu.

Inicialmente, procede-se, por intermédio de mesas vibratórias, flotação e separação magnética, a uma determinada concentração.

O concentrado é submetido a uma "ustulação" de modo a serem removidos o enxofre, o arsênio e o antimônio. No processo, o enxofre e o arsênio são transformados em óxidos voláteis, ao passo que o chumbo, o bismuto, o cobre e o zinco são convertidos de sulfetos a óxidos.

Em seguida, procede-se a uma lavagem com ácido sulfúrico diluído.

Neste momento, o produto contém cerca de 70% de SnO_2, com certa quantidade de óxido de ferro.

Segue-se a fase de redução, cuja reação básica é a seguinte:

$$SnO_2 + 2C \rightarrow Sn + 2CO$$

O SnO_2 é misturado com coque e fundente e levado a um forno de revérbero ou elétrico.

O processo, aparentemente simples, apresenta certas dificuldades, entre as quais a temperatura final de redução, que não pode ser muito elevada, para evitar perdas do metal por volatilização.

A redução propriamente dita é feita a temperaturas relativamente baixas, mas para a formação da escória são exigidas temperaturas mais elevadas que produzem uma liga Fe-Sn contendo geralmente 75% de Sn e 25% de Fe.

O estanho metálico obtido apresenta uma pureza de 97 a 98,5%, devendo pois ser refinado, por processos de liquação ou eletrolítico.

6 – Chumbo O principal minério é a galena PbS, em que o teor de chumbo varia de 1 a 12% e as impurezas são mais freqüentemente de natureza silicosa; às vezes, são calcárias.

Nesses minérios, os outros elementos metálicos que podem ocorrer são: zinco, prata, cobre, antimônio, arsênio, bismuto, cádmio, estanho, germânio, ouro, selênio etc.

De início, procede-se à concentração do minério por flotação, resultando um concentrado contendo de 40 a 80% de chumbo, 4 a 15% de zinco e 2 a 3% de cobre.

Antes da redução, realizam-se as fases de "ustulação" e "sinterização", em que as reações fundamentais são as seguintes:

$$PbS + 1{,}5O_2 \rightarrow SO_2 + PbO$$

$$2PbO + PbS \rightarrow SO_2 + 3Pb$$

Da "sinterização" resulta um aglomerado poroso, contendo 1,5 a 2,0% de enxofre e em condições adequadas para a operação seguinte que é a "redução".

Esta se faz em "forno de cuba", onde se introduz o "sinterizado", coque e fundente. O coque atua como combustível e redutor. A redução é direta e indireta:

$$PbO + C \rightarrow Pb + CO$$

$$PbO + CO \rightarrow Pb + CO_2$$

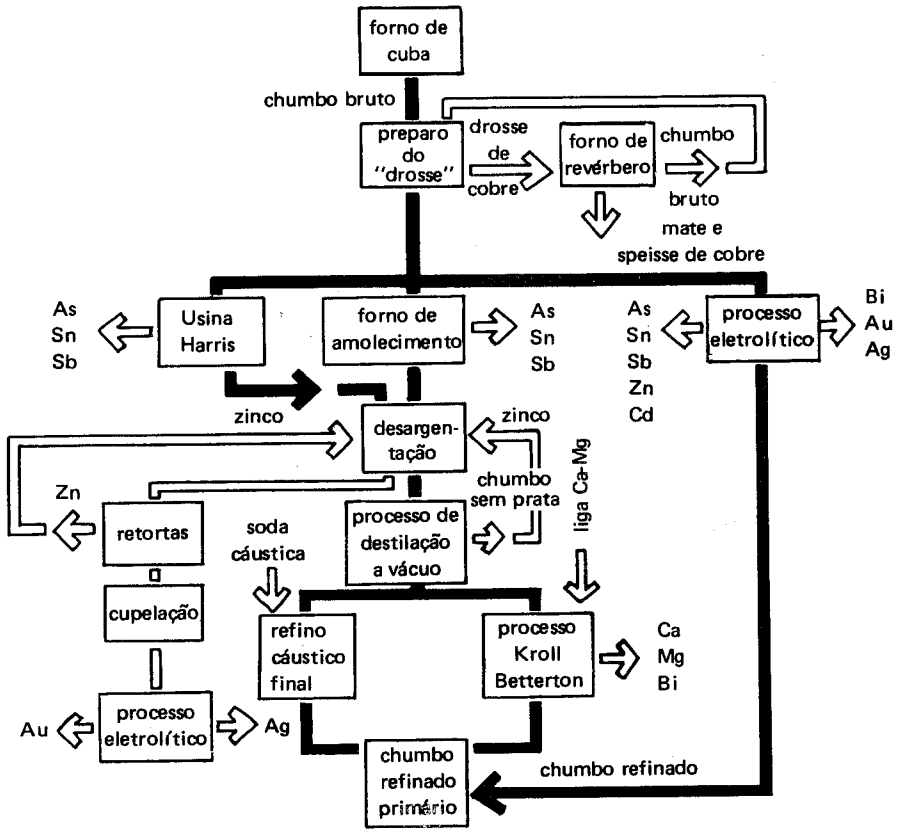


Figura 24 *Representação esquemática do fluxograma relativo à produção do chumbo.*

O fundente, contendo material ferroso, desloca o chumbo do sulfeto remanescente ou da escória silicosa, de acordo com as reações:

$$PbS + Fe \rightarrow FeS + Pb$$

$$PbSiO_3 + Fe \rightarrow FeSiO_3 + Pb$$

Os materiais líquidos juntam-se no cadinho do forno e se separam por diferença de densidades: embaixo, o chumbo metálico, mais acima uma substância constituída de arsenietos de chumbo, cobre, ferro etc., chamada de "speisse", e na superfície a escória.

O chumbo, de pureza entre 92 e 99%, é vazado e submetido a processos sucessivos de refinação, para separação do cobre, do arsênio, do estanho, do antimônio, do ouro, da prata, do zinco e do magnésio.

A Figura 24 apresenta esquematicamente o processo de obtenção do chumbo, com as várias etapas envolvidas.

O resultado final é chumbo de pureza mínima correspondente a 99,94%.

CAPÍTULO VII

LIGAS FERROSAS
DIAGRAMA DE EQUILÍBRIO FERRO-CARBONO

1 – Definições As ligas ferrosas são, em princípio, divididas em dois grupos:

– *aços*, com teores de carbono até 2,0%;
– *ferros fundidos*, com teores de carbono acima de 2,0% e raramente superior a 4,0%.

Considerando, entretanto, os elementos de liga que podem estar presentes e as estruturas que caracterizam alguns tipos desses materiais, os grupos acima considerados, com as respectivas definições, compreendem as seguintes ligas:[22-23]

– *aço-carbono*: liga ferro-carbono contendo geralmente de 0,008% até cerca de 2,11% de carbono, além de certos elementos residuais, resultantes dos processos de fabricação (Mn, Si, P e S);

– *aço-liga*: aço-carbono que contém outros elementos de liga ou apresenta os elementos residuais em teores acima dos que são considerados normais;

– *ferro fundido cinzento:* liga ferro-carbono-silício, com teor de carbono acima de 2,0% e silício presente em teores de 1,20% a 3,00%; a quantidade de carbono é de tal ordem que, conjuntamente com o relativamente elevado teor de silício, promove a formação parcial de carbono livre, na forma de lamelas ou "veios" de grafita. Nessas condições, o ferro fundido cinzento apresenta fratura com coloração escura (donde a sua denominação);

– *ferro fundido branco*: liga ferro-carbono-silício, com teor de silício menor que o cinzento e que, devido ao silício em menor quantidade e às condições de fabricação, apresenta o carbono quase que inteiramente combinado, resultando numa fratura de coloração clara (donde a sua denominação);

– *ferro fundido mesclado*: liga ferro-carbono-silício, caracterizada por composição e condições de fabricação de tal ordem que resulta uma fratura de coloração mista entre branca e cinzenta (donde a sua denominação);

– *ferro fundido maleável*: liga ferro-carbono-silício caracterizada por apresentar grafita na forma de "nódulos" (em vez de "veios"), devido a um tratamento térmico especial ("maleabilização") a que se submete um ferro fundido branco;

– *ferro fundido nodular*: liga ferro-carbono-silício caracterizada por apresentar grafita na forma esferoidal, resultante de um tratamento realizado no material ainda no estado líquido ("nodulização").

A melhor compreensão das propriedades desses materiais e dos tratamentos térmicos a que comumente são submetidos obtém-se pelo estudo do diagrama de equilíbrio ferro-carbono.

2 – Diagrama de equilíbrio Fe-C A Figura 25[24] mostra o diagrama metaestável da liga binária Fe-C.

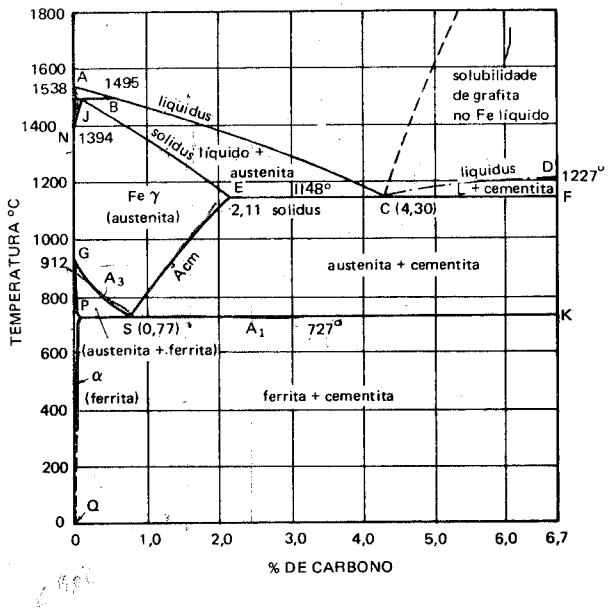


Figura 25 *Diagrama de equilíbrio Fe-C*

Posteriormente, será discutida a influência do silício sobre esse diagrama.

O diagrama é chamado de "equilíbrio metaestável" porque, na realidade, ocorrem modificações com o tempo, que afastam as reações do equilíbrio estável.

Como se vê pela figura, o diagrama abrange uma faixa de teores de carbono relativamente estreita, de 0 a 6,7%, teor este último que corresponde à composição química do carboneto de ferro Fe_3C.

A rigor, pois, o diagrama mencionado poderia ser considerado como um diagrama Fe-Fe_3C e quando se diz que o mesmo é de equilíbrio metaestável é porque pode ocorrer eventualmente decomposição do Fe_3C em ferro e carbono, este último na forma de grafita.

O diagrama abrange a faixa completa das ligas Fe-C comerciais: "aços", entre 0 e 2,11% de carbono e ferros fundidos, com carbono acima de 2,11%.

O diagrama mostra um "eutético" – ponto C – a 1.148°C e correspondente a um teor de carbono de 4,30%.

Por outro lado, na faixa correspondente aos aços, o ponto S – a 0,77%C e à temperatura de 727°C – tem característicos semelhantes ao ponto C, eutético na faixa dos ferros fundidos. Por essa razão, ponto S é chamado "eutetóide".

Em função desses dois pontos, costuma-se agrupar, teoricamente, os aços e ferros fundidos da seguinte maneira:

– aço eutetóide – com teor de carbono correspondente ao ponto eutetóide ou seja, 0,77%;

– aço hipoeutetóide – com teor de carbono entre 0 e 0,77%;

– aço hipereutetóide – com teor de carbono entre 0,77% e 2,11%;

– ferro fundido eutético – com teor de carbono correspondente ao ponto eutético ou seja 4,30%;

– ferro fundido hipoeutetóide, com teor de carbono entre 2,11% e 4,30%;

– ferro fundido hipereutético – com teor de carbono acima de 4,30%.

As principais considerações a serem feitas a respeito do diagrama binário Fe-C, das reações que ocorrem em equilíbrio e das estruturas resultantes, são as seguintes:

– o ponto A corresponde ao ponto de fusão do ferro puro – 1.538°C e o ponto D, impreciso, ao ponto de fusão do Fe_3C;

– na parte superior esquerda do diagrama, numa faixa estreita, ocorre uma reação especial chamada "peritética", na passagem do estado líquido ao sólido, em torno de 1.495°C, a qual, contudo, não apresenta importância sob o ponto de vista prático. Nesse trecho, ao solidificar, o ferro adquire a estrutura cúbica centrada – chamada, nesse caso, de δ (delta), passando, entretanto, quase a seguir, à estrutura cúbica de face centrada gama (γ), que caracteriza o ferro a alta temperatura. A 912°C, há a passagem da forma cúbica de face centrada para cubo centrado até a temperatura ambiente, na forma alotrópica alfa (α);

– na faixa de temperaturas em que o ferro está na forma alotrópica gama, ele tem capacidade de dissolver o carbono presente;

– entretanto, essa solubilidade do carbono do ferro gama não é ilimitada: ela é máxima a 1.148°C e corresponde a um teor de carbono de 2,11%. À medida que cai a temperatura, a solubilidade do carbono no ferro gama decresce; assim, a 727°C, a máxima quantidade de carbono que pode ser mantido em solução sólida no ferro gama é 0,77%; esses fatos são indicados no diagrama pelas linhas JE e Acm, esta última representando, portanto, a máxima solubilidade do carbono ou do Fe_3C no ferro gama, nas condições de equilíbrio;

– as linhas JE e ECF correspondem à linha "solidus" do diagrama;

– o carbono afeta, por outro lado, a temperatura de transformação alotrópica gama-alfa: a partir de 0% de carbono, essa temperatura de transformação decresce paulatinamente, até que para 0,77% ela se situa a 727°C. Abaixo de 727°C não poderá existir, em nenhuma hipótese, nas condições de equilíbrio, ou seja, esfriamento muito lento, ferro na forma alotrópica gama; tal fato é indicado pela linha PSK ou A_1;

– entre teores de carbono 0 e 0,77% ocorre não apenas o abaixamento da temperatura de transformação alotrópica gama-alfa, esta transformação é paulatina ou se dá em duas etapas: começa na linha GS ou A_3 e termina na linha PS ou A_1. Somente a 727°C ela é instantânea;

– a solubilidade do carbono no ferro alfa não é, de fato, nula: cerca de 0,008% de carbono dissolvem-se à temperatura ambiente, e a 727°C, a solubilidade aumenta para 0,02%; de 727°C para cima, decresce novamente a solubilidade do carbono até que a 912°C torna-se nula. Nesse instante,

entretanto, o ferro alfa passa a gama, que pode manter em solução sólida o carbono em teores bem mais elevados, como se viu; os fatos acima estão indicados pelas linhas QP e PG. Pode-se chamar a liga Fe-C com carbono até 0,008 no máximo de *ferro comercialmente puro*;

– acima de 2,11% de carbono, na faixa dos ferros fundidos, duas linhas predominam, na fase sólida: a linha ECF "solidus" e a linha SK, indicada por A_1, abaixo da qual não pode existir ferro na forma alotrópica gama;

– a solução sólida do carbono no ferro gama chama-se "austenita"; portanto, na zona limitada pelas linhas JE, ES, SG e GNJ só existe austenita; essa zona é denominada "austenítica"; esta austenita (nome derivado do metalurgista inglês Roberts Austen) é um constituinte estrutural de boa resistência mecânica e apreciável tenacidade e não-magnético;

– na zona limitada pelas linhas SE (Acm), ECF e SK (A_1) existe simultaneamente austenita e carbono, este último na forma de Fe_3C, porque, como se viu, a solubilidade do carbono no ferro gama não é ilimitada;

– o Fe_3C é um carboneto contendo 6,67% de carbono, muito duro (na escala Mohs ocuparia aproximadamente o lugar do feldspato) e frágil; esse constituinte é denominado "cementita" (do latim "caementum").

As linhas que marcam o início e o fim das transformações chamam-se *linhas de transformação* e elas limitam zonas chamadas *zonas críticas.*

2.1 **Reações que ocorrem na faixa de composições correspondentes aos aços** Na zona austenítica, após a solidificação das ligas, só ocorre austenita. No caso de um aço hipoeutetóide – entre 0,008% e 0,77% de carbono, o ferro gama da austenita começa a transformar-se em ferro alfa que se separa, visto que ele não pode manter em solução sólida senão quantidades irrisórias de carbono; assim a composição estrutural da liga vai se modificando à medida que cai a temperatura: de um lado, tem-se ferro puro alfa separando-se continuamente e do outro lado a austenita, cujo teor de carbono vai aumentando, em direção ao ponto S.

No instante que a liga atinge a temperatura correspondente a 727°C, têm-se, portanto, em equilíbrio, dois constituintes estruturais: ferro puro na forma alotrópica alfa e uma solução sólida de 0,77% de carbono no ferro gama (ou seja, austenita com 0,77% de C). Nesse momento, todo o ferro gama remanescente transforma-se bruscamente em ferro alfa. A transformação é, contudo, tão repentina que não há tempo suficiente para que ocorra uma separação nítida entre o carbono (na forma de Fe_3C ou cementita) e o ferro, na forma alotrópica alfa. Resulta um constituinte de forma lamelar, formado por lâminas muito delgadas e muito próximas umas das outras, de ferro alfa e Fe_3C, dispostas alternadamente. Com aumentos microscópicos relativamente pequenos, não dá para perceber tais lâminas. Com maiores

aumentos, acima de 1.000 vezes, por exemplo, elas são visíveis. Esquematicamente o aspecto dessa estrutura está representada na Figura 26 (aço eutetóide). Devido à nuance de madrepérola que esse constituinte adquire, quando examinado ao microscópio, é chamado *"perlita"*. Suas propriedades são intermediárias entre as do ferro puro (pouco resistente, mole e muito dúctil) e a cementita (muito resistente, muito dura e muito frágil).

O ferro puro, na forma alotrópica alfa, corresponde a uma estrutura chamada *"ferrita"* (do latim "ferrum"). A ferrita, como já se mencionou, pode manter em solução sólida até 0,008% de carbono.

Os aços hipoeutetóides, com teor de carbono entre 0,008% e 0,77%, apresentam, pois, à temperatura ambiente, uma estrutura composta de ferrita e perlita, como a Figura 26(b) mostra esquematicamente. A quantidade de perlita aumenta e a de ferrita diminui, à medida que a composição do aço cresce em direção ao ponto eutetóide.

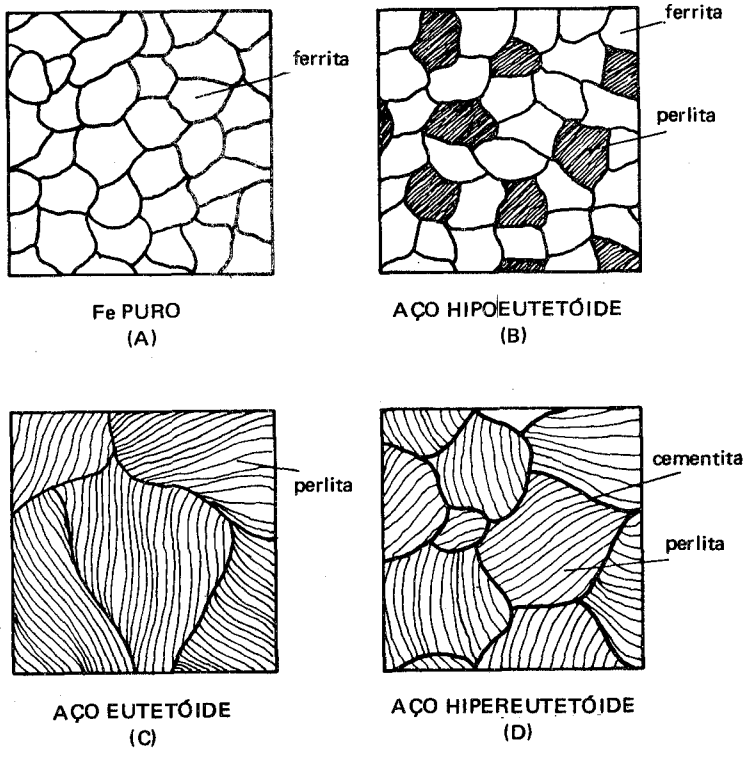


Figura 26 *Representação esquemática das estruturas das ligas Fe-C, na faixa correspondente aos aços, resfriados lentamente, conforme o diagrama de equilíbrio Fe-C*

Ao resfriar-se lentamente um aço com a composição exatamente eutetóide (0,77%C), a única transformação que ocorre é no ponto S, quando a austenita passa bruscamente a perlita, cuja estrutura está representada esquematicamente na Figura 26(c).

Para os aços hipereutetóides, entre 0,77 e 2,11% de carbono as reações que ocorrem podem ser assim explicadas: a austenita, ao atravessar a linha SE ou Acm, de máxima solubilidade do carbono no ferro gama, começa a expulsar o excesso de carbono que não pode ser mantido em solução. Em conseqüência, numa temperatura intermediária entre Acm e A_1, haverá em equilíbrio duas fases: uma, representada pela austenita que vai se empobrecendo em carbono e outra, pelo carbono paulatinamente expulso, na forma de Fe_3C ou cementita.

À temperatura de 727°C (linha A_1), as fases que estão em equilíbrio serão, portanto: de um lado o Fe_3C e do outro a austenita com 0,77% de carbono, a qual se transforma imediatamente em perlita ao atingir e ultrapassar a linha A_1. A estrutura correspondente, que permanece até a temperatura ambiente, como nos casos anteriores, é perlita mais cementita; esta última vai localizar-se nos contornos dos grãos, como a Figura 26(D) esquematicamente indica.

Assim, em resumo, para os aços, têm-se as seguintes estruturas, à temperatura ambiente (ou abaixo da linha A_1):

– *ferro comercialmente puro*: "ferrita", mole, dúctil, e pouco resistente;

– *aços hipoeutetóides:* "ferrita mais perlita", cuja resistência e dureza vão aumentando e cuja ductilidade vai diminuindo, à medida que se caminha em direção ao teor 0,77% de carbono;

– *aços hipereutetóides:* "perlita mais cementita"; a quantidade desta, disposta nos contornos dos grãos, aumenta à medida que se caminha para teores mais elevados de carbono; essa estrutura é dura, resistente e pouco dúctil, característicos que se acentuam à medida que aumenta o teor de carbono.

Em função dessas propriedades das estruturas, os aços têm suas propriedades modificadas, à medida que o teor de carbono aumenta, conforme mostra o gráfico da Figura 27.

2.2 **Reações que ocorrem na faixa de composições correspondentes aos ferros fundidos** Para facilitar o estudo dessas reações, convém verificar inicialmente qual a estrutura do eutético – ponto C – solidificado, porque, a partir desse eutético, podem ser facilmente determinadas as estruturas dos ferros fundidos hipo e hipereutéticos.

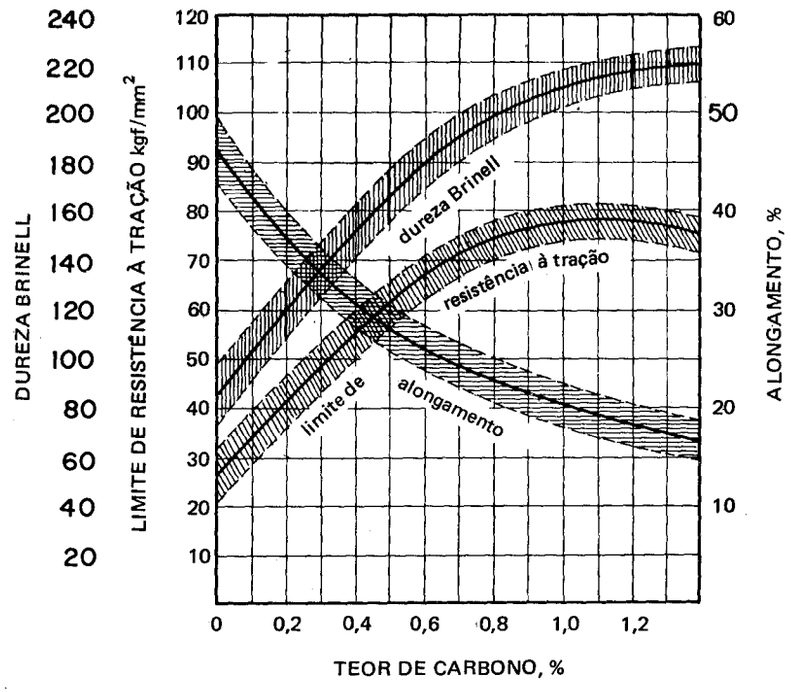


Figura 27 *Propriedades mecânicas dos aços em função do teor de carbono.*

No ponto C, estão em equilíbrio duas fases: de um lado, à esquerda, a austenita com 2,11% de carbono, o máximo que pode ser mantido em solução sólida; do outro lado, à direita, o Fe_3C que corresponde à extremidade do diagrama. Esse eutético – austenita mais cementita – é chamado *ledeburita*. Sua constituição estrutural corresponde a um fundo de cementita, com 6,67% de carbono e cristais dendríticos de austenita contendo 2,11% de carbono.

Pelo exame do diagrama, verifica-se que, ultrapassada a linha "solidus" ECF, ocorre uma diminuição gradativa do teor de carbono da austenita, cuja composição acompanha a inclinação da linha Acm, até que, ao atingir-se a temperatura 727°C (ponto S), correspondente a 0,77% de carbono, na linha A_1, essa austenita se transforma repentinamente em perlita.

Assim, ao ultrapassar a linha A_1, a ledeburita será constituída de glóbulos de perlita sobre um fundo de cementita. Esse aspecto, que permanece até a temperatura ambiente, está indicado esquematicamente na Figura 28(C).

No caso de um ferro fundido hipoeutético (entre 2,11% e 4,30% de carbono), na faixa de temperaturas entre as linhas "solidus" e A_1, estão em equilíbrio as fases seguintes: de um lado, a austenita que se empobrece paulatinamente de carbono até, ao atingir a linha A_1, transformar-se em perlita; do outro lado, a ledeburita, constituída agora de glóbulos de perlita sobre um fundo de cementita. A estrutura está esquematizada na Figura 28(A).

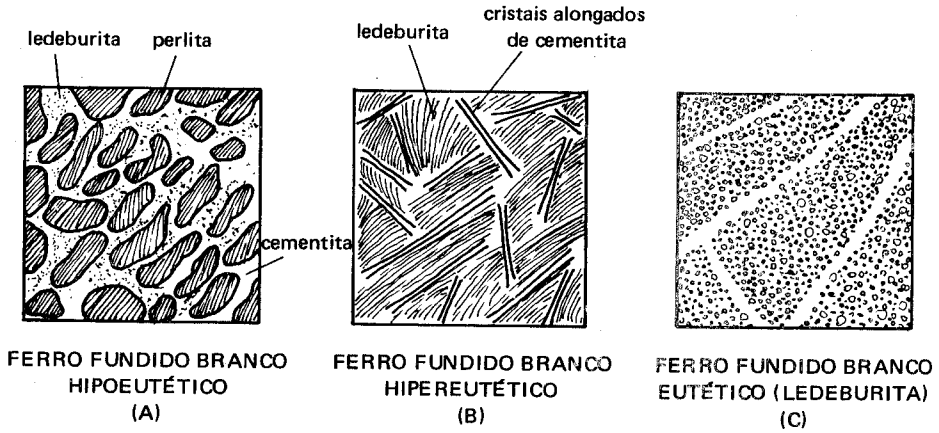


Figura 28 *Representação esquemática das estruturas das ligas Fe-C, na faixa correspondente aos ferros fundidos, resfriados lentamente, conforme o diagrama de equilíbrio Fe-C.*

No caso de um ferro fundido hipereutético (entre 4,30% e 6,67% de carbono), entre as linhas "solidus" e a linha A_1, nada ocorre com a cementita separada durante o resfriamento na fase líquida. Mas a ledeburita sofre transformações, porque a sua austenita tem o teor de carbono decrescendo paulatinamente, à medida que, no resfriamento, se aproxima da linha A_1, onde ela, a austenita, se transforma em perlita. Assim, abaixo de A_1, até a temperatura ambiente, a estrutura dos ferros fundidos hipereutéticos – representada esquematicamente na Figura 28(B) – é constituída de cristais alongados de cementita e um fundo de ledeburita (glóbulos de perlita mais cementita).

Essas estruturas correspondem aos ferros fundidos brancos, em que não existe qualquer carbono na forma livre de grafita.

Tais ferros fundidos são de relativamente pouco uso comercial, devido a sua grande dureza e fragilidade e baixa usinabilidade.

2.3 **Ligas Fe-C-Si** Os ferros fundidos mais usados são os cinzentos, caracterizados pela presença de silício, geralmente em teores superiores a 2,0%. A presença desse elemento, além de outros fatores a serem posteriormente considerados, produz uma decomposição do Fe_3C, em Fe e C, este último na forma de grafita. Por essa razão, o silício é freqüentemente chamado elemento "grafitizante".

A forma como a grafita se apresenta nos ferros fundidos cinzentos está representada esquematicamente na Figura 29.

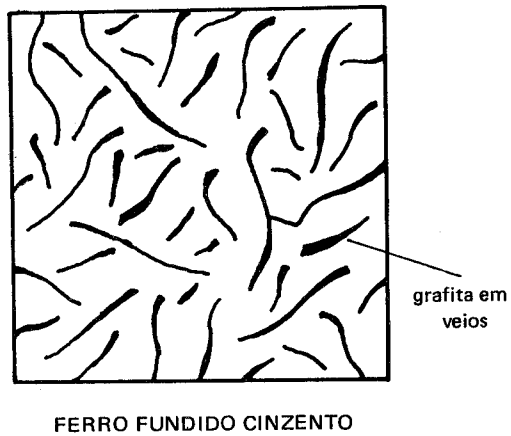


Figura 29 *Representação esquemática do aspecto micrográfico de um ferro fundido cinzento, sem ataque, podendo-se notar a presença de carbono livre, sob a forma de veios de grafita.*

A forma e a distribuição dos veios de grafita variam, o que levou associações técnicas, como a ASTM (American Society for Testing Material) e a AFS (American Foundrymen's Society) a promover a sua classificação em cinco tipos:[25]

A – irregular desorientada
B – em roseta
C – desigual irregular
D – interdendrítica desorientada
E – interdendrítica orientada

que conferem propriedades diferentes aos vários tipos de ferros fundidos cinzentos.

De qualquer modo, o carbono livre nos ferros fundidos desempenha um papel importante, porque os conceitos de variação de propriedades mecânicas em função do teor de carbono, que se aplicam nos aços, não podem ser aplicados com o mesmo sentido nos ferros fundidos.

Estes, à medida que o teor de carbono aumenta, tornam-se mais moles, menos resistentes e mais usináveis. Entretanto, sua ductilidade, qualquer que seja o teor de carbono, é praticamente nula, devido à presença de carbono livre, em veios de grafita.

Ver-se-á, mais adiante, no estudo dos ferros fundidos maleáveis e nodulares, como essa ductilidade pode ser melhorada.

3 – Fatores que influem na posição das linhas de transformação do diagrama de equilíbrio Fe-C A posição das linhas de transformação do diagrama Fe-C é afetada por diversos fatores, a saber:

3.1 **Aquecimento ou resfriamento** A posição das linhas A_3, A_2 e Acm* corresponde a resfriamento lento. Para aquecimento lento, as mesmas reações que levam às modificações estruturais ocorrem em sentido inverso. Entretanto, a posição das linhas é diferente, ficando as mesmas ligeiramente deslocadas para cima.

3.2 **Presença de elementos de liga** Os elementos de liga usuais – Mn e Si – e os que são propositadamente adicionados para alterar as propriedades dos aços – Ni, Cr, Mo, W, Ti etc., – atuam diferentemente nas duas formas alotrópicas que caracterizam o ferro e, por essa razão, na posição das linhas de transformação, ou seja, na zona crítica e na zona austenítica.

Como se viu, o carbono cria uma faixa de temperaturas onde as duas formas alotrópicas alfa e gama podem existir. Da mesma maneira, atuam certos elementos de liga.

Os efeitos em particular de alguns elementos sobre o campo austenítico são os seguintes:

– Mn, Ni e Co alargam a faixa de temperaturas para austenita estável;

– Si, Cr, Mo, Ti, entre outros, estreitam a faixa de temperaturas de austenita estável.

Os elementos de liga influem igualmente sobre a temperatura e a composição do eutetóide, o que, evidentemente, significa deslocar as linhas de transformação.

A maioria dos elementos de liga – Ti, W, Mo, Si, Ni, Mn, Cr, uns mais do que os outros – tende a deslocar o eutetóide para a esquerda, ou seja, diminui o seu teor de carbono.

* As iniciais A são do francês "arrêt"; a terminologia original é francesa, pois foi Le Châtelier um dos primeiros estudiosos da matéria.

Quanto à temperatura do eutetóide, com exceção do Mn e do Ni, que diminuem essa temperatura, os outros elementos mais comuns – Cr, W, Si, Mo e Ti – tendem a aumentá-la.

Na faixa de composições correspondentes aos ferros fundidos, o efeito mais importante é o do silício. A tendência grafitizante desse elemento altera totalmente as propriedades desses materiais.

Outros elementos podem atuar em sentido contrário, em particular o manganês, que é um dos mais importantes estabilizadores da cementita, ou seja, dificulta ou impede a sua decomposição.

Em resumo, as propriedades das ligas ferro-carbono são influenciadas pelas suas estruturas. Estas dependem das reações que ocorrem no diagrama de equilíbrio, onde os elementos de liga atuam diretamente nas linhas de transformação, na faixa austenítica e na temperatura e composição do eutetóide, no caso dos aços, e na capacidade grafitizante ou estabilizadora da cementita.

CAPÍTULO VIII

DIAGRAMA TRANSFORMAÇÃO-TEMPO-TEMPERATURA

1 – Introdução Um dos fatores mais importantes que influenciam a posição das linhas de transformação, ou seja, a própria transformação da austenita, é a velocidade de esfriamento.

De fato, se se aumentar essa velocidade, haverá um afastamento das condições de equilíbrio e as reações de transformação tendem a modificar-se, pois, como a alteração do reticulado cristalino do ferro gama e ferro alfa depende da movimentação atômica, esta não se completa e, em conseqüência, os constituintes normais resultantes da transformação da austenita – como a perlita – deixam de formar-se ou até mesmo podem surgir novos constituintes estruturais.

Tais fatos são expressos também por uma alteração de posição da zona crítica, em virtude de um abaixamento gradual das linhas de transformação A_3 e A_1, à medida que aumenta a velocidade de resfriamento.

O que ocorre, na realidade, não é um rebaixamento da zona crítica, mas sim um atraso do início das reações ou das transformações estruturais, devido a uma inércia própria de alguns fenômenos físicos.

As pesquisas experimentais que levaram a essas conclusões foram realizadas pela primeira vez por Davenport e Bain.(26) Essas pesquisas possibilitaram igualmente explicar mais cientificamente os fenômenos que levam à formação dos constituintes que se originam na têmpera dos aços.

2 – Diagrama de transformação isotérmica ou curvas em C ou TTT O estudo experimental, que pode ser facilmente reproduzido em laboratório, consiste no seguinte: corpos de prova de aço de dimensões pequenas, para

que, quando resfriados a diferentes velocidades, o resfriamento se dê ao mesmo tempo através de toda a sua seção, são aquecidos a temperatura acima da zona crítica, de modo a apresentarem a estrutura austenítica. A seguir, são rapidamente mergulhados em banho líquido (sal ou chumbo fundido), a temperaturas variáveis abaixo da zona crítica. São mantidos a essas temperaturas durante os tempos necessários para que a austenita se transforme nos produtos normais (ferrita mais perlita, somente perlita, ou perlita mais cementita).

O processo de transformação pode ser acompanhado por diversos meios. Entre eles, pelo exame da microestrutura, ou seja, uma vez mantido à temperatura desejada, durante o tempo escolhido, o corpo da prova é esfriado rapidamente em água ou salmoura.

Se houve transformação da austenita nos seus produtos normais, estes são detectados no microscópio. Se não houve transformação, a observação microscópica evidenciará o fato, detectando eventualmente a presença de um outro constituinte estrutural que não o normal.

Para tornar a experiência mais simples, escolhem-se corpos de prova de um aço eutetóide, visto que, para ele, só há um produto normal de transformação da austenita, a perlita.

Em resumo:

– uma série de corpos de prova de diminutas dimensões é aquecida na faixa austenítica;

– um certo número é mergulhado num banho de chumbo fundido, mantido por exemplo, a 680°C e aí permanece durante tempos diferentes para cada um, por exemplo, 10, 100, 200, 500 etc. segundos;

– pelo que foi explicado no início, a austenita permanece estável durante um certo tempo, ou seja, decorrido este tempo ela começa a transformar-se e, decorrido um tempo maior, ela termina de se transformar;

– repete-se a experiência mergulhando-se outros corpos de prova em banhos de chumbo fundido mantidos a temperaturas cada vez mais baixas e, para cada nível de temperatura, observa-se o início e o fim da transformação.

Tem-se, assim, uma série de tempos que marcam, para os vários níveis de temperatura, o início e o fim da transformação da austenita.

Adota-se, para maior segurança no exame da estrutura originada pela transformação da austenita, como início de transformação, o ponto correspondente à formação de 0,5% de perlita e como fim de transformação o ponto correspondente à formação de 99,5% de perlita.

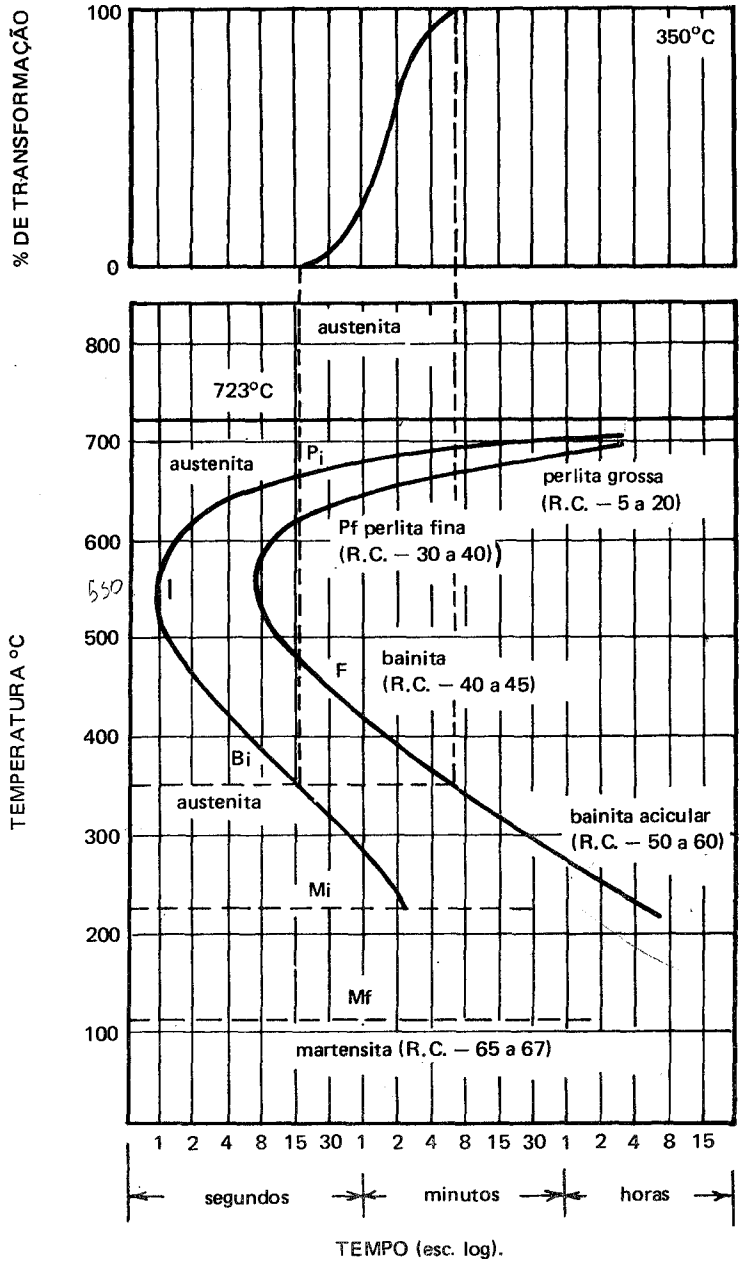


Figura 30 *Diagrama de transformação isotérmica de um aço eutetóide e estruturas resultantes.*

Com os dados obtidos, pode-se construir um diagrama *"temperatura-tempo"*. Esse diagrama é chamado *"transformação isotérmica"* ou *"a temperatura constante"*.

O seu aspecto, para o aço eutetóide mencionado, está representado na Figura 30.

Devido ao longo tempo que ocorre, em certos níveis de temperatura para que a transformação se inicie e se complete, essa variável é lançada, no gráfico, em escala logarítmica.

Em função de suas formas, as curvas obtidas são também chamadas *"em C"*. Outra denominação usada é *"curvas TTT"* (transformação-tempo-temperatura).

Nas experiências originais de Davenport e Bain, essas curvas apresentam a forma de um S; por isso ainda hoje elas são comumente chamadas *"em S"*.

O seu exame mostra que:

– na faixa superior de temperatura, o início da transformação da austenita (curva I) é muito demorado, assim como o fim. A estrutura resultante é perlita, de granulação grosseira, chamada "perlita grossa", com baixa dureza, variável de 5 a 20 Rockwell C, os valores mais elevados correspondendo aos níveis mais baixos de temperatura;

– à medida que a temperatura decresce, a demora para início e fim de transformação é menor; a granulação da perlita vai se tornando mais fina, originando-se a estrutura chamada "perlita fina", com dureza cada vez mais elevada. Os seus valores podem chegar a 40-45 Rockwell C;

– em torno de 550°C (lembre-se de que está sendo considerado um aço eutetóide), ocorre o menor tempo para início e fim de transformação. Esse ponto corresponde ao chamado "joelho" ou "cotovelo" das curvas em C;

– a partir dessa temperatura começa novamente a aumentar o tempo para a transformação da austenita iniciar-se e completar-se; surge, nas faixas de temperaturas correspondentes, um novo constituinte – a "bainita" (em homenagem a Bain) – completamente diferente de perlita: trata-se de uma estrutura cujo aspecto varia desde um agregado de ferrita em forma de pena e um carboneto muito fino (em torno de 450°C), até um constituinte em forma de agulhas (em torno de 200°C), com coloração escura. A dureza desse constituinte é elevada, variando de 50 a 60 Rockwell C;

– finalmente, nos níveis mais baixos de temperatura, na faixa aproximada de 200°C a 100°C, ocorre uma nova transformação, a qual independe do tempo, como as linhas horizontais M_i e M_f estão indicando. Surge mais

um novo constituinte – a "martensita" – cuja formação brusca começa na linha M_i e termina na linha M_f. Esse constituinte apresenta-se em forma de agulhas, com coloração clara. Freqüentemente, a martensita é chamada "acicular". Sua dureza é muito elevada: 65 a 67 RC. Uma das teorias para explicar essa dureza elevada é ligada à velocidade de resfriamento. Realmente, a transformação do reticulado cúbico de face centrada (gama) característico da austenita, para reticulado cúbico centrado (alfa) não é evitada, qualquer que seja a velocidade de esfriamento. Sendo esta muito rápida, não se dá, portanto, tempo para que o carbono que está em solução sólida na austenita seja expulso. Forma-se, por assim dizer, uma solução sólida supersaturada de carbono ou de Fe_3C no ferro alfa, cujo reticulado fica distorcido, aumentando grandemente a dureza da estrutura resultante. Admite-se hoje que a estrutura cristalina da martensita seja tetragonal compacta e não cúbica. Essa estrutura está sujeita a elevadas microtensões e apresenta-se supersaturada de carbono. Essa estrutura martensítica é considerada a mais dura e mais frágil dos aços.

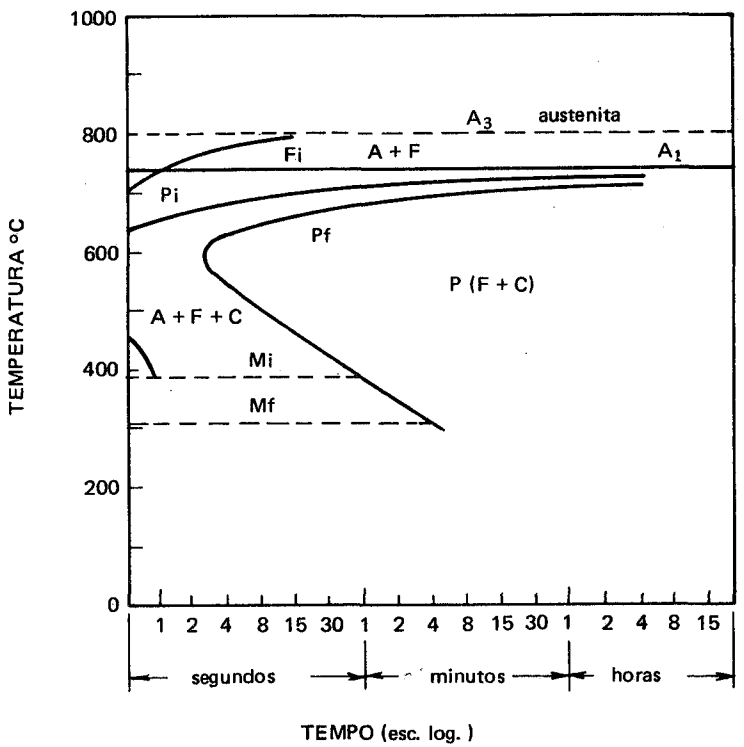


Figura 31 *Diagrama de transformação isotérmica de um aço hipoeutetóide.*

2.1 **Curvas TTT para vários tipos de aços** As Figuras 31 e 32 correspondem aos diagramas de transformação isotérmica ou curvas em C para um aço hipoeutetóide e para um aço hipereutetóide, respectivamente.

Na Figura 31, observa-se uma nova curva – F_i; ela indica que na transformação da austenita, forma-se em primeiro lugar ferrita; do mesmo modo, na Figura 32, a curva C_i indica que, na transformação da austenita, forma-se inicialmente a cementita.

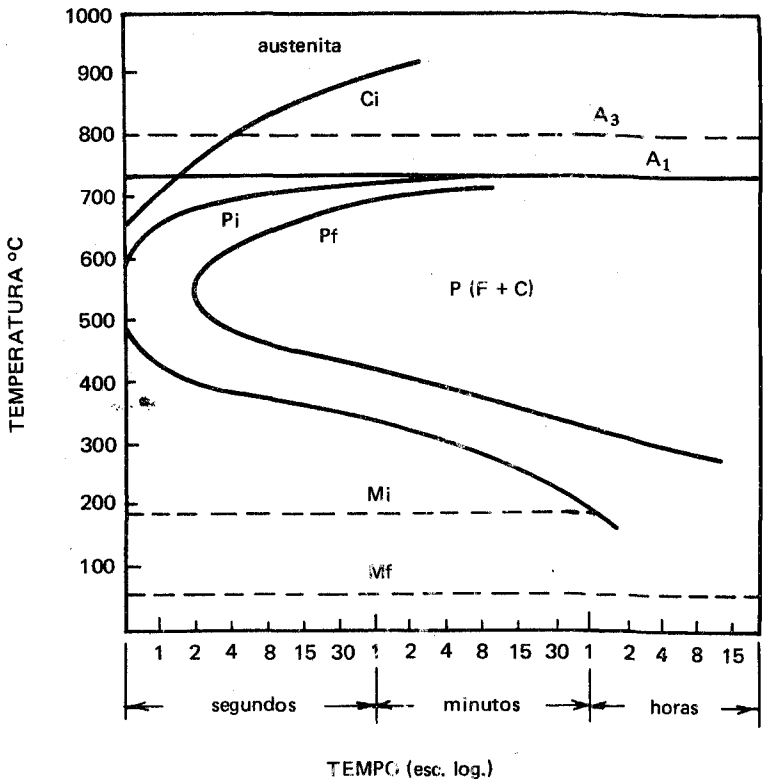


Figura 32 *Diagrama de transformação isotérmica de um aço hipereutetóide.*

A Figura 33 refere-se a um aço com 0,37% C, 0,68% Mn e 3,41% Ni e a Figura 34 um aço contendo 0,42% C, 0,78% Mn, 1,79% Ni, 0,80% Cr e 0,38% Mo. Note-se o efeito dos elementos de liga na forma e posição das curvas.

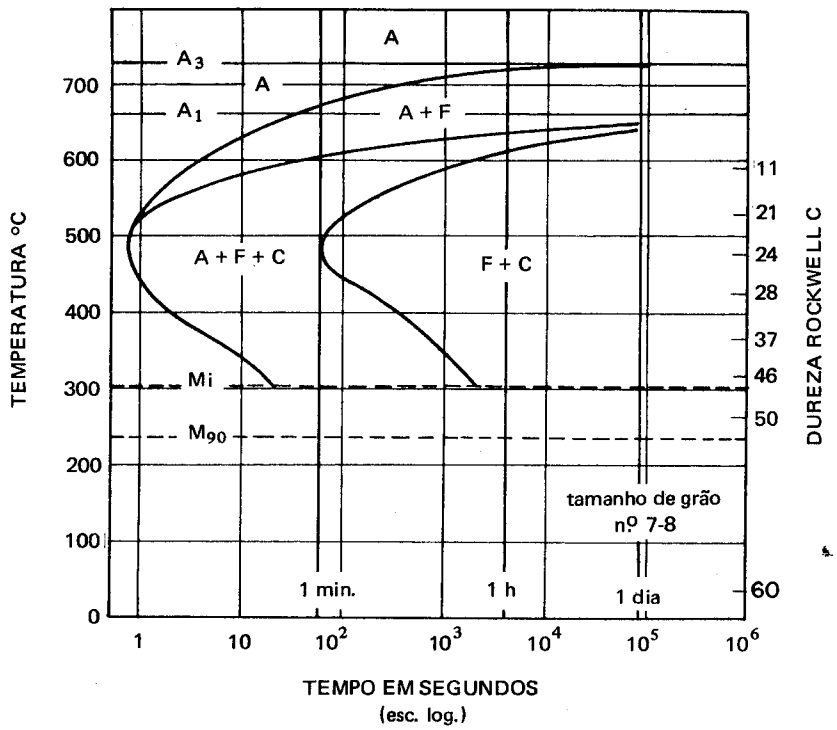


Figura 33 *Curva TTT para aço com 0,37% C, 0,68% Mn e 3,41% Ni.*

Essa influência será objeto de outros comentários mais adiante.

Finalmente, a Figura 35 mostra o aspecto das curvas para um ferro fundido de composição equivalente a 3,75% Ct, 2,90% Si, 0,55% Mn, 0,40% P e 0,065% S*

3 — Diagrama de transformação para resfriamento contínuo Na prática, a grande maioria de operações de tratamento térmico aplicada nas ligas ferrosas, consiste em resfriamento contínuo, ainda que a velocidades diferentes. Assim sendo, os diagramas de transformação isotérmica não deveriam ser utilizados como base para o estudo dos tratamentos térmicos. Por essa razão, desenvol-

* A "American Society for Metals" acaba de publicar o manual *Atlas of isothermal transformation and cooling transformation diagrams* que cobre um grande número de aços comuns e especiais, assim como de ferros fundidos. Essa publicação é de grande utilidade para projetar adequadamente as operações de tratamento térmico.

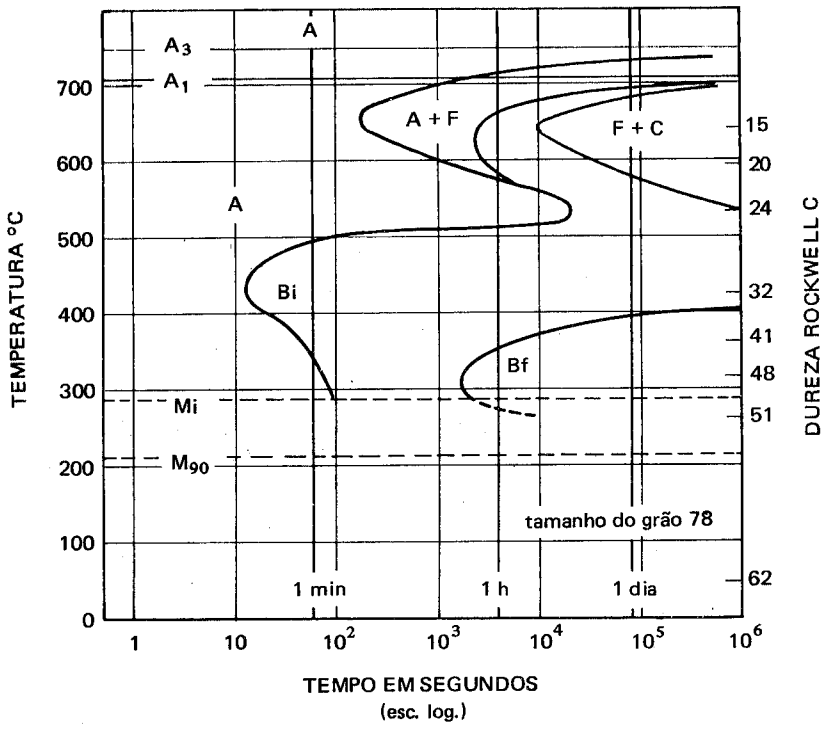


Figura 34 *Curva TTT para aços com 0,42% C, 0,78% Mn, 1,79% Ni, 0,80% Cr e 0,38% Mo.*

veram-se os diagramas para resfriamento contínuo, obtidos por intermédio da mesma técnica utilizada no traçado das curvas isotérmicas, ou seja, em vez de detectar-se as estruturas obtidas por resfriamentos bruscos em vários níveis de temperaturas, os corpos de prova são deixados resfriar continuamente e o resfriamento é interrompido às temperaturas escolhidas.

As curvas obtidas têm a forma representada na Figura 36; nota-se que, como seria de esperar, somente podem ser traçadas curvas na parte superior do diagrama, correspondente à formação das várias formas de perlita.

Abaixo do joelho ou cotovelo não existem curvas para resfriamento contínuo, não sendo possível, pelo menos para os aços-carbono, obter-se estrutura bainítica.

A estrutura martensítica é, contudo, formada da mesma maneira que para resfriamento isotérmico.

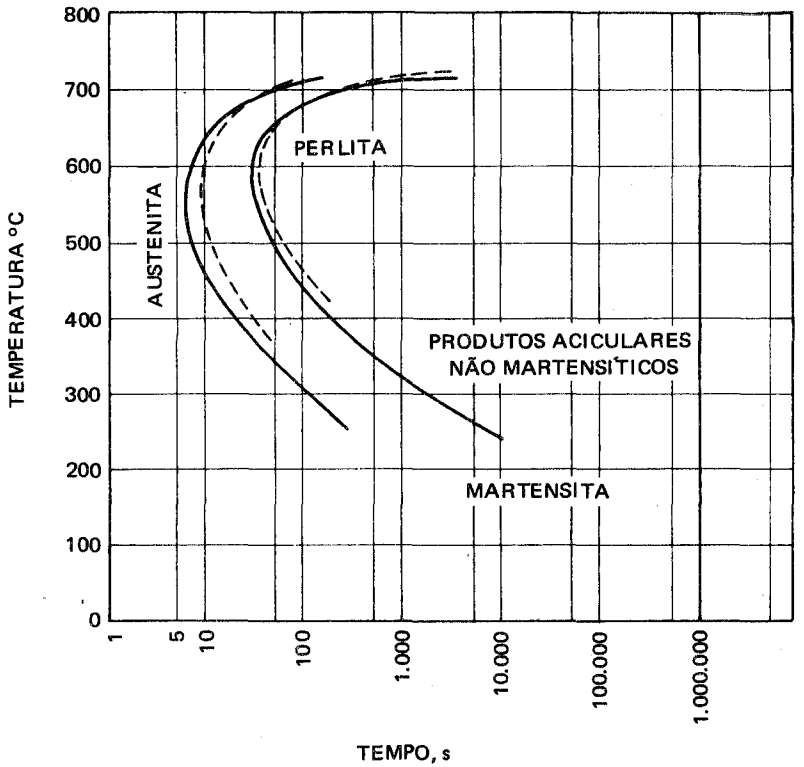


Figura 35 *Curva TTT para ferro fundido cinzento, com 3,75% Ct, 3,90% Si, 0,55% Mn, 0,40% P e 0,065 S.*

As curvas superiores do diagrama para resfriamento contínuo assemelham-se às curvas para resfriamento isotérmico, apresentando apenas um ligeiro deslocamento para baixo, como é demonstrado na Figura 37. Na prática, portanto, os diagramas de transformação isotérmica podem ser utilizados para o estudo dos tratamentos térmicos das ligas ferrosas.

4 – Efeito da seção das peças Ao tratar-se termicamente peças metálicas, as condições ou velocidades de resfriamento são diferentes através de sua seção: obviamente, as camadas superficiais resfriam mais rapidamente, o contrário acontecendo com o seu núcleo.

Assim sendo, as transformações da austenita podem dar origem a produtos diferentes no centro das peças, em comparação com sua superfície.

O fato está ilustrado na Figura 38, em que se representa não só a influência da seção da peça como também do meio de resfriamento.

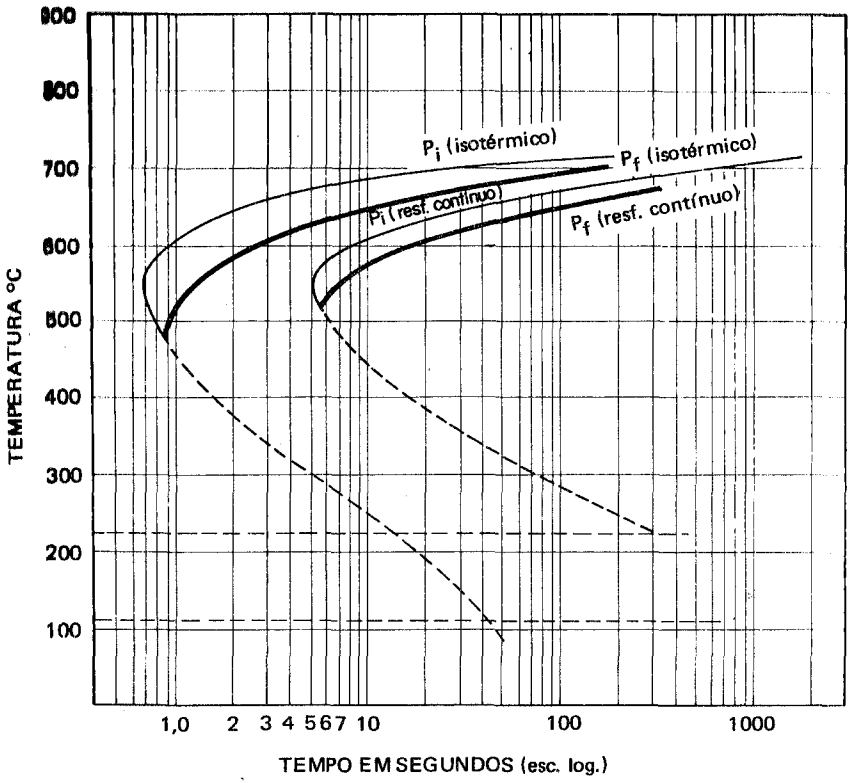


Figura 36 *Representação esquemática do diagrama de transformação para resfriamento contínuo.*

No primeiro exemplo esquemático representado na figura – resfriamento em água – as camadas superficiais atingem as linhas de formação da martensita sem tocarem as curvas de transformação da austenita; o centro, ao contrário, sofre transformação parcial da austenita em perlita fina.

No segundo exemplo – resfriamento em óleo, menos drástico do que em água – tanto o centro como a superfície cortam as curvas de transformação. O centro da peça sofre transformação total em perlita fina, ao passo que a superfície sofre uma transformação parcial, pois a curva de esfriamento só corta a curva de início de transformação. A parcela não transformada da austenita adquirirá a estrutura martensítica mais abaixo.

Finalmente, no terceiro exemplo – esfriamento ao ar – a seção inteira sofre transformação da austenita: a superfície, apresentará uma perlita mais fina do que o centro.

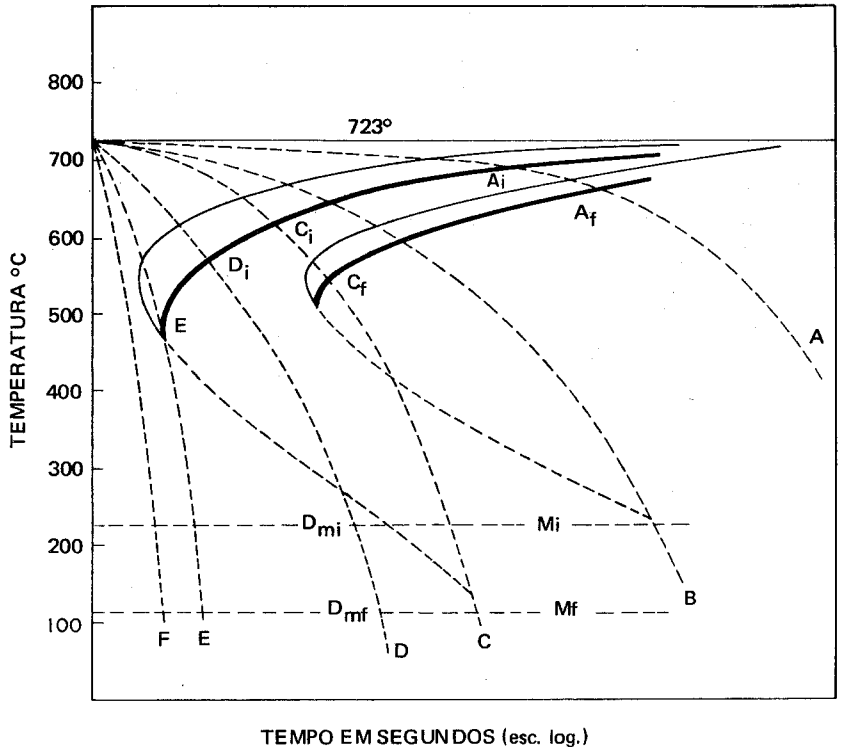


Figura 37 *Superposição de curvas de resfriamento no diagrama de transformação para resfriamento contínuo.*

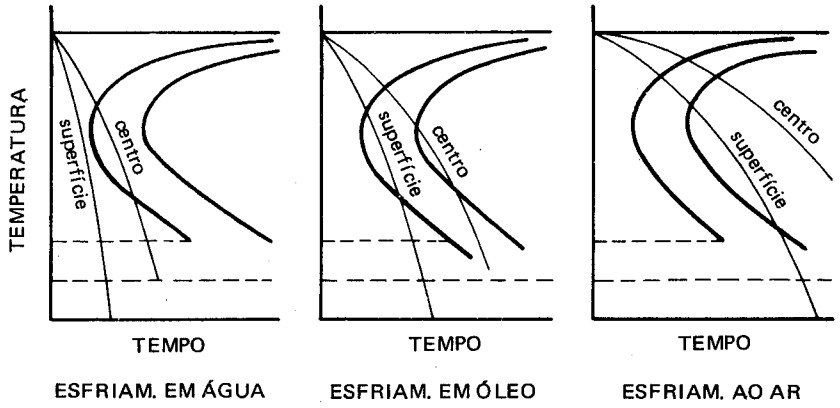


Figura 38 *Efeito da seção da peça sobre a velocidade de esfriamento em meios diferentes.*

5 – Fatores que influem na posição das linhas em C Da mesma maneira que ocorre com as linhas de transformação ou zona crítica do diagrama de equilíbrio Fe-C, a posição das linhas em C do diagrama de transformação isotérmica é influenciada por diversos fatores.

Esses fatores são os seguintes:

- composição química
- tamanho de grão
- homogeneidade da austenita.

5.1 **Composição química** As curvas em C dos diagramas representados nas Figuras 31, 32, 33, 34 e 35 já permitem perceber-se que o carbono e os elementos de liga tendem a deslocar as curvas em C para a direita, ou seja, retardar a transformação da austenita.

A única exceção conhecida é o cobalto.

TABELA 3

DISTRIBUIÇÃO DOS ELEMENTOS DE LIGA NOS AÇOS ESFRIADOS LENTAMENTE

Dissolvido na ferrita	Combinado na forma de carboneto	Na forma de inclusões não-metálicas	Na forma de compostos intermetálicos
Ni	–	–	–
Si	–	SiO_2, M_xO_y	–
Al	–	Al_2O_3	Al_xN_y
Zr	–	ZrO_2	Zr_xN_y
Cu	–	–	–
P	–	–	–
Mn(forte)	Mn(fraca)	MnS, $MnO.SiO_2$	–
Cr(forte)	Cr(moderada)	Cr_xO_y	–
W(fraca)	W(moderada)	–	–
Mo(fraca)	Mo(moderada)	–	–
V(muito fraca)	V(forte)	V_xO_y	V_xN_y
Ti(muito fraca)	Ti(forte)	Ti_xO_y	$Ti_xN_yC_z$, Ti_xN_y
Nb(muito fraca)	Nb(forte)	–	–

A tendência de retardamento da transformação é fácil de entender desde que se lembre o comportamento do carbono e dos outros elementos de liga quando o ferro se encontra na fase gama. Neste estado, o ferro tende a dissolver o carbono e os outros elementos de liga presentes na liga Fe-C. Ao passar o ferro gama a alfa, o comportamento, contudo, se modifica, conforme mostra a Tabela 3.[27]

Os elementos Ni, Si, Al, Zr, Cu e P, por exemplo, podem ser mantidos em solução na ferrita. Alguns deles, como o Si, o Al, o Zr podem formar ainda compostos intermediários ou aparecer como inclusões não-metálicas.

Outros, além de se dissolverem na ferrita, podem formar carbonetos. Alguns desses elementos, como o V, o Ti e o Nb têm uma tendência muito forte de formação de carbonetos e alguns formam, igualmente, inclusões não-metálicas e compostos intermetálicos.

TABELA 4

EFEITO DO TAMANHO DE GRÃO AUSTENÍTICO SOBRE CERTOS CARACTERÍSTICOS DOS AÇOS

PROPRIEDADE	TENDÊNCIAS DOS AÇOS TEMPERADOS	
	Aços de austenita grosseira (nº 5 e acima)	Aços de austenita fina (mais fina que nº 5, de 5 a 8)
Endurecibilidade	Endurecimento mais profundo	Endurecimento menos profundo
Tenacidade à mesma dureza	Menos tenazes	Mais tenazes
Empenamento	Maior	Menor
Fissuras de têmpera	Mais freqüente	Menos freqüentes
Tensões residuais	Maiores	Menores
Austenita retida	Mais	Menos
	NOS AÇOS RECOZIDOS E NORMALIZADOS	
Usinabilidade	Desbaste (melhor)	Desbaste (inferior)
Usinabilidade (casos especiais)	Acabamento fino (inferior)	Acabamento fino (melhor)
Trabalhabilidade (casos especiais)	Superior	Inferior

De qualquer modo, essa tendência de distribuição ou disposição diferente, quando as ligas Fe-C entram na zona crítica, origina reações complexas que se traduzem por um apreciável tempo para se iniciarem ou se completarem ou, em outras palavras, num deslocamento das curvas em C para a direita.

5.2 **Tamanho de grão** Admitindo-se dois grãos de austenita de tamanhos diferentes e admitindo-se ainda que a transformação da austenita comece nos contornos dos grãos e ao mesmo tempo, é claro que no grão menor a transformação se completa num tempo mais curto. O tamanho de grão, portanto, tende a deslocar as curvas em C para a direita.

Em princípio, pois, se o tamanho de grão maior retarda a transformação da austenita, isso significa que essa condição é mais favorável nos tratamentos térmicos.

Entretanto, essa vantagem de um tamanho de grão maior é anulada pelas desvantagens que o mesmo apresenta, como a Tabela 4[28] mostra, de modo que se prefere utilizar aços de granulação menor. O tamanho de grãos dos aços deve ser portanto controlado; esse controle é feito mediante a adição de elementos como Al, Ti, Zr e V que, por uma ação mecânica, ou seja, pela formação de carbonetos, evitam seu crescimento.

A ASTM classificou os tamanhos de grão em 8 grupos e as especificações modernas exigem, por assim dizer, tamanhos de grão determinados, conforme as aplicações dos aços em construção mecânica. Pode-se notar que, em alguns dos diagramas de transformação isotérmica apresentados, o tamanho de grão é especificado.

5.3 **Homogeneidade da austenita** A austenita, quanto menos homogênea, ou seja, quanto maior a quantidade de carbonetos residuais ou de áreas localizadas ricas em carbono, confere a tendência de acelerar o início e o fim das reações de transformação, isto é, deslocar as curvas em C para a esquerda. Isso deve-se ao fato das heterogeneidades atuarem como núcleos para a reação de formação dos constituintes normais.

6 – Temperabilidade ou endurecibilidade Uma das primeiras conclusões que se pode tirar do estudo das curvas isotérmicas é que a obtenção da estrutura martensítica, extremamente dura e necessária em muitos empregos dos aços em construção mecânica, exige um resfriamento muito rápido, de modo que a curva de esfriamento não toque a curva de início de transformação ou, quando muito, a tangencie.

A velocidade que corresponde a essa curva é chamada "velocidade crítica de esfriamento".

Geralmente, entretanto, não basta que se tenha a formação da martensita, ou seja, endurecimento do aço, apenas superficialmente. É necessário que o endurecimento seja profundo ou total às várias profundidades abaixo da superfície.

Chama-se "temperabilidade" ou "endurecibilidade" à capacidade do aço endurecer ou à "profundidade de endurecimento".

Essas expressões não devem ser confundidas com a máxima dureza que o aço pode adquirir pelo esfriamento rápido, a qual é função quase que exclusiva do carbono, enquanto a "endurecibilidade" depende mais da presença de elementos de liga e do tamanho de grão da austenita.

O conhecimento e a determinação da temperabilidade dos aços são, portanto, muito importantes, pois o que se procura, geralmente, é que o material endureça à máxima profundidade possível

Existem dois métodos básicos para a determinação desse característico: o método de Grossmann e o método de Jominy.

O mais utilizado é o *"método de Jominy"*, também conhecido como *"ensaio do resfriamento da extremidade"*, já padronizado no Brasil pela ABNT.

Consiste no seguinte:

Um corpo de prova de um aço determinado, de forma cilíndrica, de 1" de diâmetro e 4" de comprimento, é aquecido de modo a ter-se formação da estrutura austenítica. Para esse fim, utiliza-se um dispositivo adequado, representado na Figura 39.(29) *Sua extremidade livre é sujeita a um jato de água, sob condições controladas de quantidade, pressão e temperatura. O corpo de prova, depois de resfriado, é cortado longitudinalmente; as duas partes paralelas e opostas são retificadas e submetidas a um ensaio de dureza, a distâncias variáveis (intervalos geralmente de 1/16"), a partir da extremidade que recebeu o jato de água. Pode-se, assim, traçar um gráfico, como o da Figura 40, em que se lançam* em *abscissas as distâncias da extremidade esfriada, em 1/16" e em ordenadas a dureza Rockwell C.*

Pelo método Jominy, pode-se definir a "distância crítica Jominy J_p" que corresponde ao valor da distância para a qual ocorre brusca queda de dureza. Na Figura 40, a distância crítica corresponderia a 7/16".

A Figura 41 representa "faixas de temperabilidade"; este é o critério empregado atualmente para especificar os aços sob o ponto de vista desse característico.

Os aços, quando especificados pela temperabilidade, são conhecidos como "aços H" (H de "hardenability").

6.1 Fatores que afetam a temperabilidade São os mesmos que afetam a posição das curvas em C. Em resumo:

– fatores que diminuem a temperabilidade:

  – granulação fina da austenita
  – inclusões não dissolvidas

– fatores que aumentam a temperabilidade:

  – elementos de liga (exceto o cobalto)
  – granulação grosseira da austenita
  – homogeneidade da austenita

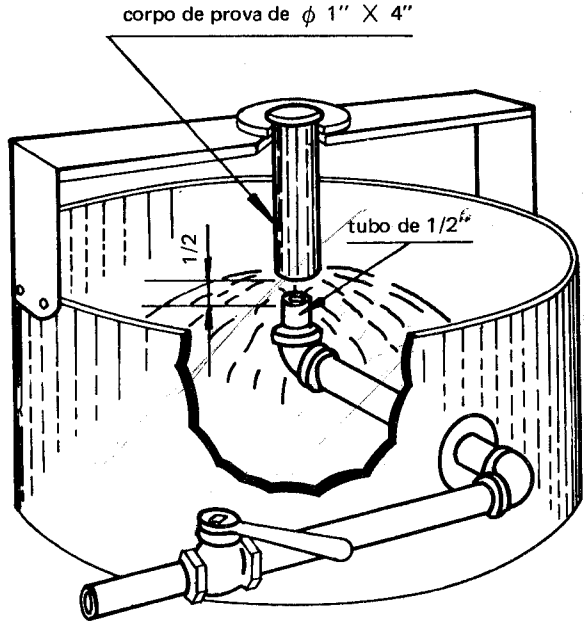


Figura 39 *Dispositivo Jominy para determinação da temperabilidade dos aços.*

As Figuras 42 e 43 mostram, respectivamente as faixas de temperabilidade de aço SAE 1045H e SAE 6150H.

As composições estão indicadas nas figuras.

A letra N corresponde à temperatura de normalização e a letra A à temperatura de austenitização.

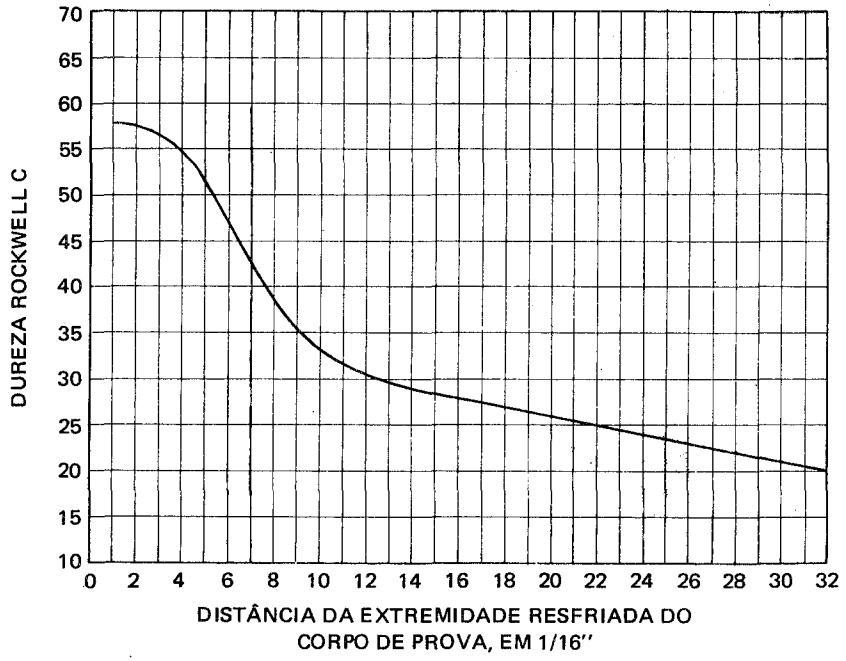


Figura 40 *Curva de temperabilidade de Jominy.*

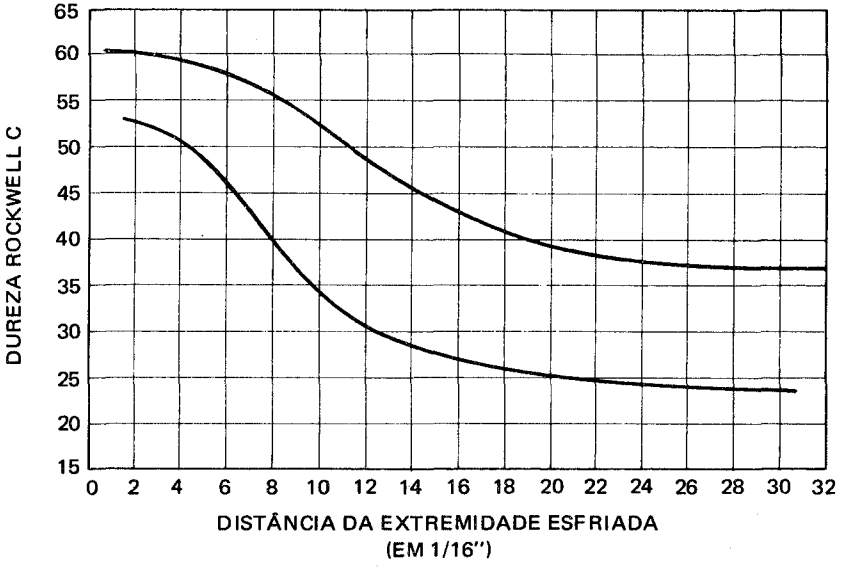


Figura 41 *Faixas de temperabilidade para aços SAE 4140.*

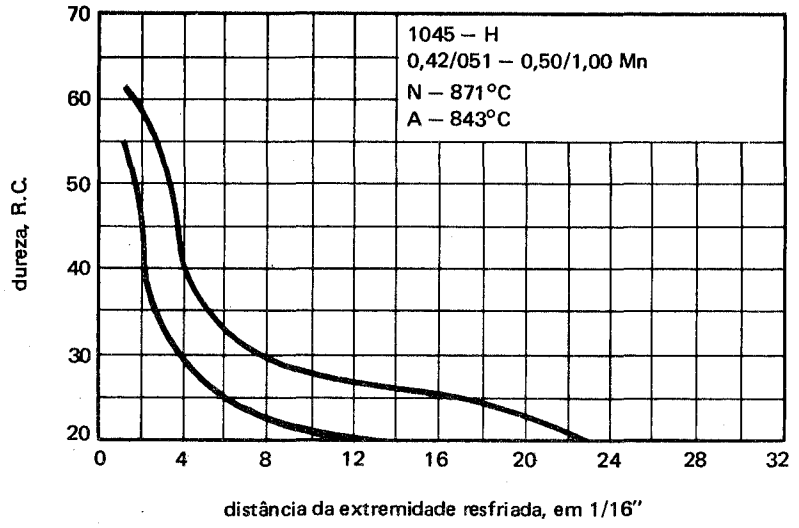


Figura 42 *Faixa de endurecibilidade de aço SAE 1045H.*

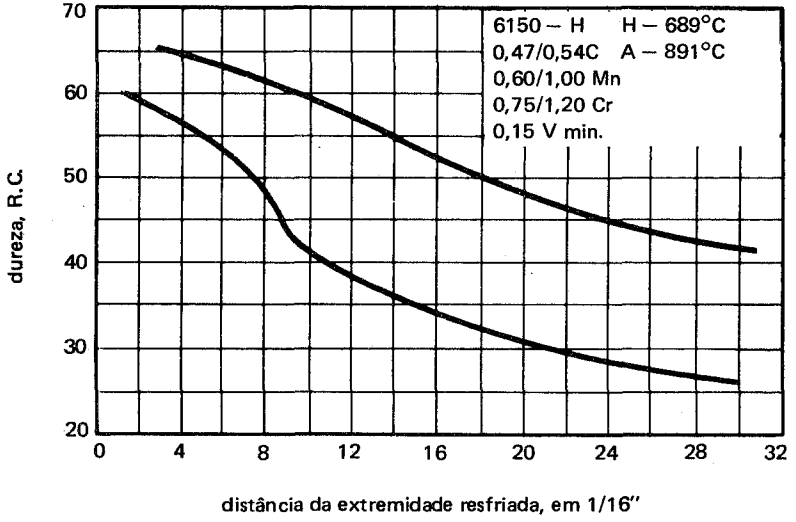


Figura 43 *Faixa de endurecibilidade de aço SAE 6150H.*

CAPÍTULO IX

TRATAMENTOS TÉRMICOS E TERMOQUÍMICOS DAS LIGAS FERRO-CARBONO

1 – Introdução As ligas ferro-carbono, antes de serem utilizadas na forma de peças, são, na maioria dos casos, principalmente quando aplicadas em construção mecânica, submetidas a tratamentos térmicos ou a tratamentos termoquímicos.

No primeiro caso, como já se explicou no primeiro volume desta obra, visa-se modificar as propriedades das ligas, sobretudo as mecânicas, ou aliviar as tensões e restabelecer a estrutura cristalina normal.

No segundo caso, procura-se apenas o endurecimento superficial, pela alteração da composição química da camada superficial do material, até uma certa profundidade.

Os aços, dentre as ligas ferrosas, são os materiais mais comumente submetidos a esses tratamentos.

2 – Recozimento e Normalização Em função dos diagramas de transformação para resfriamento contínuo, pode-se representar esquematicamente os tratamentos mencionados, como a Figura 44 indica.

Considerando-se, em primeiro lugar, o caso dos aços e lembrando as definições já estudadas, têm-se:

2.1 **Recozimento** Seus objetivos são os seguintes: remover tensões devidas a tratamentos mecânicos, diminuir a dureza, aumentar a ductilidade, regularizar a textura bruta de fusão, eliminar, finalmente, o efeito de quaisquer tratamentos térmicos ou mecânicos a que o aço tenha sido submetido anteriormente.

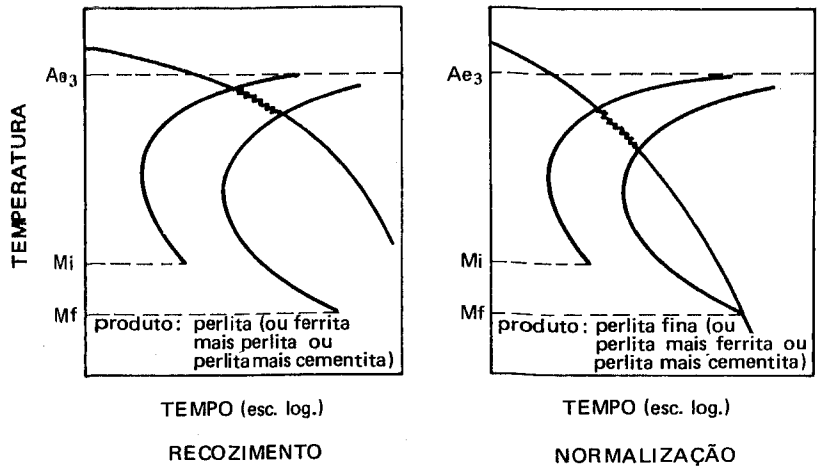


Figura 44 *Diagramas esquemáticos representativos dos tratamentos de recozimento e normalização.*

A estrutura resultante do recozimento é a normal, ou seja, ferrita mais perlita, se o aço for hipoeutetóide, perlita mais cementita, se o aço for hipereutetóide e somente perlita, se for eutetóide.

No aquecimento para o recozimento, a temperatura deve situar-se a mais ou menos 50°C acima do limite superior da zona crítica – linha A_3 – para os aços hipoeutetóides e acima do limite inferior da zona crítica – linha A_1 – para os aços hipereutetóides. Nesses últimos aços, procura-se não ultrapassar a linha A_3, porque no resfriamento lento que se segue – típico da operação de recozimento para os aços-carbono – pode ocorrer a formação, nos contornos dos grãos da austenita, de um invólucro contínuo e frágil de carbonetos, conferindo fragilidade aos aços.(30)

Para evitar-se o tempo muito longo exigido pelo recozimento, pode-se substituir o recozimento comum pelo "recozimento isotérmico ou cíclico", em que o aquecimento é realizado nas mesmas condições que no recozimento comum, mas o esfriamento é dividido em duas etapas: esfriamento rápido até uma temperatura situada na parte superior do diagrama de transformação isotérmica, aí permanecendo o material durante o tempo necessário para que a austenita se transforme nos produtos normais de transformação; a segunda etapa consiste no esfriamento até a temperatura ambiente, depois de completada a transformação da primeira etapa.

Outro tipo de recozimento é o "para alívio de tensões", em que o aquecimento é feito a temperaturas abaixo da zona crítica. Seu objetivo é

apenas aliviar as tensões originadas em processos de conformação mecânica, soldagem, corte por chama, endireitamento, usinagem etc.

A Tabela 5[31] apresenta alguns exemplos típicos de ciclos de recozimento para alívio de tensões.

Finalmente, deve-se considerar o "recozimento em caixa" aplicado principalmente em chapas e tiras de aço laminadas a frio; consiste em colocar-se essas peças em recipientes vedados no interior do forno. O aquecimento deve ser lento e a temperatura varia de 600°C a 700°C.

TABELA 5

TRATAMENTOS TÍPICOS DE ALÍVIO DE TENSÕES PARA DIVERSOS AÇOS

Tipo de aço	Temperatura °C	Tempo, horas por polegada de seção
Aço com 0,35% C, com menos de 3/4" de seção	alívio de tensões geralmente desnecessário	
Aço com 0,35% C, com 3/4" de seção ou mais	595 a 675	1
Aço com mais que 0,35% C, com menos que 1/2" de seção	alívio de tensões geralmente desnecessário	
Aço com mais que 0,35% C, com 1/2" ou mais de seção	595 a 675	1
Aço C-Mo, com menos que 0,20% C (qualquer seção)	595 a 675	2
Aço C-Mo, com 0,20 a 0,35% C (qualquer seção)	675 a 760	3 a 2
Aço Cr-Mo, com 2% Cr e 0,5Mo (qualquer seção)	720 a 745	2
Aço Cr-Mo com 2,25% Cr, 1,0% Mo e 5,0% Cr, 0,5% Mo (qualquer seção)	730 a 760	3
Aço Cr-Mo com 9% Cr e 1% Mo (qualquer seção)	745 a 775	3
Aços inoxidáveis 410 e 430 (qualquer seção)	775 a 800	2
Aços inoxidáveis 309 e 310 (seção superior a 3/4")	870	2

No caso dos ferros fundidos, o recozimento é aplicado quando se deseja:

– no ferro fundido branco, reduzir tensões e melhorar as propriedades mecânicas. Aquece-se geralmente acima da linha de transformação A_1 – acima de 800°C – durante tempos que podem ser muito longos, dependendo da temperatura de aquecimento. O resfriamento deve ser muito lento. Resulta uma estrutura em que os carbonetos livres são finos, eliminando-se quase que totalmente a estrutura típica do material fundido;

– ferro fundido cinzento, melhorar a usinabilidade do material, além de aliviar as tensões originadas durante o resfriamento das peças fundidas. Na verdade, o tratamento térmico mais empregado nos ferros fundidos cinzentos é o "recozimento para alívio de tensões", em que raramente se atinge a zona crítica, no aquecimento. As temperaturas usuais para o "envelhecimento artificial" (ou alívio de tensões) de peças de ferro fundido cinzento são as seguintes:

– sem elementos de liga – 500 a 565°C
– sem baixo teor em ligas – 565 a 600°C
– de alto teor em ligas – 600 a 650°C.

O tempo à temperatura depende das dimensões das peças e o resfriamento subseqüente deve ser muito lento.

Para diminuir a dureza ou, mais precisamente, melhorar a usinabilidade do ferro fundido cinzento, a temperatura de aquecimento deve situar-se sempre acima da linha A_1 e será tanto maior quanto mais ligado o ferro fundido. O tempo à temperatura deve ser, no mínimo, de 15 min por cm de seção transversal. O resfriamento, finalmente, deve ser muito lento.

O recozimento dos ferros fundidos nodulares será estudado quando tais materiais forem discutidos.

2.2 **Normalização** Os objetivos da normalização são idênticos aos do recozimento, com a diferença de que se procura obter uma granulação mais fina e, portanto, melhores propriedades mecânicas. As condições de aquecimento do material são idênticas às que ocorrem no recozimento, porém o resfriamento é mais rápido: ao ar. A Figura 44 mostra esquematicamente a operação. A estrutura obtida é a mesma da obtida no recozimento, porém mais uniforme e fina.

A normalização é ainda utilizada como tratamento preliminar à têmpera e revenido, justamente porque, sendo a estrutura normalizada mais homogênea que a de um aço laminado, por exemplo, reduz-se a tendência ao empenamento e facilita-se a solução de carbonetos e elementos de liga, principalmente quando o aço é ligado.

No aquecimento dos aços hipereutetóides para a normalização, pode-se ultrapassar a linha A_{cm} (o que se deve evitar no recozimento, como se viu), porque, sendo o resfriamento posterior ao ar mais rápido, não há a formação do invólucro frágil de carbonetos, mencionado no caso anterior.

3 – Têmpera e revenido O objetivo fundamental da têmpera das ligas ferro-carbono é obter uma estrutura martensítica, o que exige esfriamento rápido, de modo a evitar-se a transformação da austenita em seus produtos normais. Isso está indicado na Figura 45.

Em resumo: na têmpera, aquece-se o aço acima de sua zona crítica (mais ou menos 50°C acima de A_1 para os aços hipoeutetóides e abaixo da linha A_{cm} para os aços hipereutetóides), durante o tempo necessário, em função da seção das peças, seguido de resfriamento rápido em um meio como o óleo, água, salmoura ou mesmo ar (este último meio dependendo da posição das curvas em C do aço).

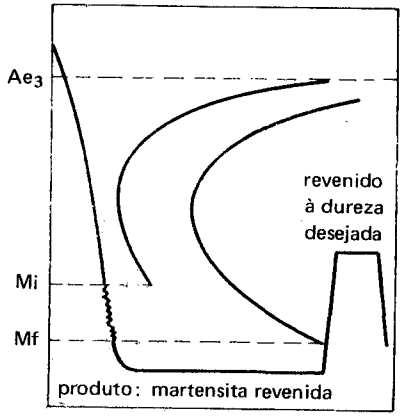


Figura 45 *Diagramas esquemáticos representativos dos tratamentos de têmpera e revenido.*

A temperatura de aquecimento dos aços hipereutetóides não necessita ser superior à linha A_{cm} pelo seguinte motivo: acima de A_1, o aço é constituído de austenita e pequenas partículas de carbonetos secundários ainda não dissolvidos. No resfriamento que se segue, a estrutura será constituída de martensita e dos mesmos carbonetos secundários, os quais, possuindo dureza elevada, não apresentam qualquer inconveniente, pois o que se visa exatamente na têmpera é obter a máxima dureza.

A martensita possui uma dureza Rockwell de 65 a 67.

A razão da alta dureza da martensita pode ser assim explicada:

– o carbono que se dissolve prontamente no ferro gama é praticamente insolúvel no ferro alfa. No resfriamento rápido típico da têmpera, não se evita a transformação alotrópica gama a alfa, mas não se dá tempo suficiente para que o carbono se separe totalmente. Contudo, os espaços do reticulado cúbico centrado do ferro alfa não são suficientes para alojar o carbono, de modo que este fica aí retido, formando o que se poderia chamar de uma solução sólida supersaturada de carbono no ferro alfa.

Admite-se presentemente que a martensita apresenta uma estrutura tetragonal compacta, resultante de um movimento de átomos em planos específicos da austenita. Essa estrutura, além de estar supersaturada de carbono, pode apresentar partículas de carbonetos grandemente dispersas e caracteriza-se por estar em estado de elevadas tensões; o reticulado da martensita apresenta-se ainda distorcido.

O estado de altas tensões, a distorção do reticulado e a dureza extremamente elevada da martensita constituem inconvenientes que devem ser atenuados ou corrigidos. Para isso, submete-se o aço temperado à operação de *revenido*, indicada também no desenho da Figura 45, indicativa da têmpera.

O *revenido* visa, portanto, corrigir os excessos da têmpera ou, em particular, aliviar, senão eliminar totalmente, as tensões e corrigir a excessiva dureza e conseqüente fragilidade do material, melhorando sua ductilidade e resistência ao choque.

A operação de revenido é realizada no aço temperado, imediatamente após a têmpera, a temperaturas abaixo da zona crítica, desde poucas centenas de grau até as proximidades da linha A_1. A temperatura será escolhida de acordo com os resultados finais desejados: aliviar apenas as tensões ou eliminá-las completamente e produzir redução de certo modo apreciável da dureza.

Originam-se, conforme as faixas de aquecimento da martensita, transformações estruturais, as quais determinam as propriedades finais do material.

Essas transformações são as seguintes:[32]

– entre 100° e 250°C, ou seja, na faixa que é às vezes denominada primeiro estágio do revenido, ocorre a precipitação de um carboneto de ferro de reticulado hexagonal e a dureza cai a cerca de 60 Rockwell C;

– entre 200° e 300°C, faixa às vezes chamada segundo estágio do revenido, a dureza Rockwell continua a cair; em aços de médio ou alto carbono ou ligeiramente ligados, onde, na têmpera, pode ter sido retida alguma austenita, esta tende a se transformar em bainita;

– entre 250° e 350°C – faixa às vezes chamada terceiro estágio do revenido – forma-se outro tipo de carboneto, sobretudo em aços de alto carbono, e já se nota, ao microscópio, uma mudança sensível do aspecto da estrutura; esta se apresenta como uma massa escura, que era, até há algum tempo atrás, chamada "troostita"; a dureza continua caindo, atingindo valores da ordem de 50 RC;

– entre 400° e 600°C, os carbonetos precipitados adquirem uma formação esferoidal sobre um fundo de ferrita fina acicular; a dureza Rockwell C cai a valores de 45 a 25. Estas estruturas são chamadas "sorbíticas";

– entre 600° e 700°C, começa a ocorrer recristalização e crescimento de grão; os carbonetos precipitados, em particular a cementita nos aços-carbono, apresentam-se em forma nitidamente esferoidal sobre um fundo de ferrita; essa estrutura é chamada freqüentemente "esferoidita" e corresponde a um tratamento que será abordado logo a seguir, chamado "coalescimento". Essa estrutura é muito tenaz e mole: sua dureza varia de 5 a 20 RC.

A Figura 46[32] mostra o efeito da temperatura de revenido sobre a dureza e a resistência ao choque de um aço-carbono temperado.

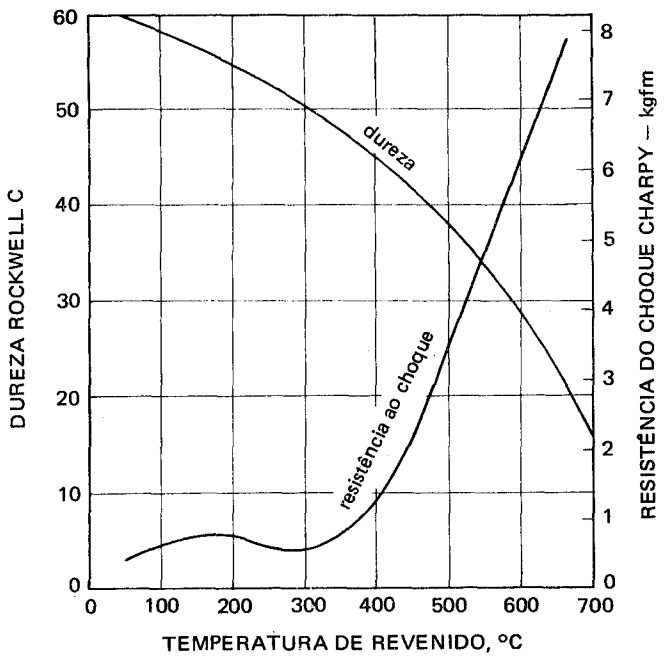


Figura 46 *Efeito da temperatura de revenido sobre a dureza e a resistência ao choque de um aço 1045 temperado.*

3.1 Têmpera e revenido dos ferros fundidos Não são tratamentos ainda muito generalizados. Objetivam, como no caso de aços, aumentar a resistência mecânica, a dureza e a resistência ao desgaste.

O material é aquecido acima da zona crítica, a temperaturas e durante tempos que dependem muito da composição do ferro fundido. Em tipos com silício mais elevado, por exemplo, as temperaturas devem ser mais elevadas, visto que o silício reduz a solubilidade do carbono na austenita. Por outro lado, quando o teor de carbono combinado for baixo, o aquecimento durante a austenitização deve ser mais longo.

O resfriamento é realizado geralmente em óleo ou ao ar em ferros fundidos cinzentos altamente ligados.

O revenido, após a têmpera, reduz a fragilidade, alivia as tensões, diminui a dureza e melhora a tenacidade.

As temperaturas de revenido variam de 370° a 600°C, as mais elevadas aplicando-se a ferros fundidos cinzentos ligados.

4 – Coalescimento Neste tratamento, visa-se a produção da estrutura "esferoidita" que, pelos seus característicos, confere aos aços uma dureza muito baixa e, principalmente, condições que facilitam certas operações de deformação a frio e a usinagem. Aplica-se sobretudo em aços de alto teor de carbono e consiste em aquecer-se o material a uma temperatura logo abaixo da linha A_1 por tempo relativamente longo, ou em aquecer-se e resfriar-se alternadamente o aço entre temperaturas logo acima e logo abaixo de A_1, isto é, fazer a temperatura de aquecimento oscilar em torno de A_1.

5 – Têmpera superficial Essa operação tem por objetivo produzir um endurecimento superficial, pela obtenção de martensita apenas na camada externa do aço.

É aplicado em peças que, pela sua forma e dimensões, são impossíveis de temperar inteiramente, ou quando se deseja alta dureza e alta resistência ao desgaste superficiais, aliadas a boa ductilidade e tenacidade no núcleo das peças.

É um tratamento rápido que, além disso, não exige fornos de aquecimento.

Em função da fonte de aquecimento, a têmpera superficial compreende dois processos:

– têmpera por chama
– têmpera por indução.

Na *têmpera por chama*, a superfície a ser endurecida é rapidamente aquecida à temperatura de austenitização por intermédio de uma chama de oxiacetileno e é logo a seguir esfriada por meio de um borrifo de água.

O meio mais simples para temperar por chama é aquele em que se utiliza um dispositivo semelhante a um torno; a peça a ser endurecida superficialmente é colocada entre as pontas do torno e a torcha de oxiacetileno e o bocal de água colocados no carro do torno. A torcha, dimensionada de acordo com a extensão da superfície a ser tratada, aquece sucessivamente a peça que gira com uma velocidade de rotação pré-determinada; segue-se imediatamente o resfriamento com água.

Na *têmpera por indução*, o calor é gerado na própria peça por indução eletromagnética, utilizando-se, para isso, bobinas de indução através das quais flui uma corrente elétrica.

O aquecimento é mais rápido por esse processo, o qual apresenta ainda a vantagem de bobinas de diversos formatos poderem ser facilmente construídas e adaptadas à forma das peças a serem tratadas.

Pode-se controlar a profundidade de aquecimento pela forma da bobina, espaço entre a bobina de indução e a peça, taxa de alimentação da força elétrica, freqüência e tempo de aquecimento.

Após a têmpera superficial, os aços são revenidos geralmente a temperaturas baixas, com o objetivo principal de aliviar as tensões originadas.

Os ferros fundidos cinzentos comuns ou ligados podem igualmente ser temperados superficialmente, por chama ou indução, de modo a produzir uma camada superficial martensítica dura e resistente ao desgaste.

6 — Tratamentos isotérmicos O conhecimento dos diagramas de transformação isotérmica permitiu desenvolver novos tipos de tratamentos térmicos, visando um deles em particular, a obtenção da estrutura "bainita". Alguns desses tratamentos substituem com vantagens, em determinados casos particulares, os tratamentos térmicos convencionais.

Os dois tratamentos isotérmicos mais importantes estão representados na Figura 47.

6.1 **Austêmpera** Consiste no aquecimento do aço a temperaturas acima da crítica, seguido de esfriamento rápido de modo a evitar a transformação da austenita, até o nível de temperaturas correspondentes à formação de bainita. O aço é mantido a essa temperatura o tempo necessário para que a transformação da austenita em bainita se complete. Dependendo da temperatura do banho (de sal fundido ou chumbo derretido) onde o aço é esfriado, obtém-se bainita mais ou menos dura (Figura 47).

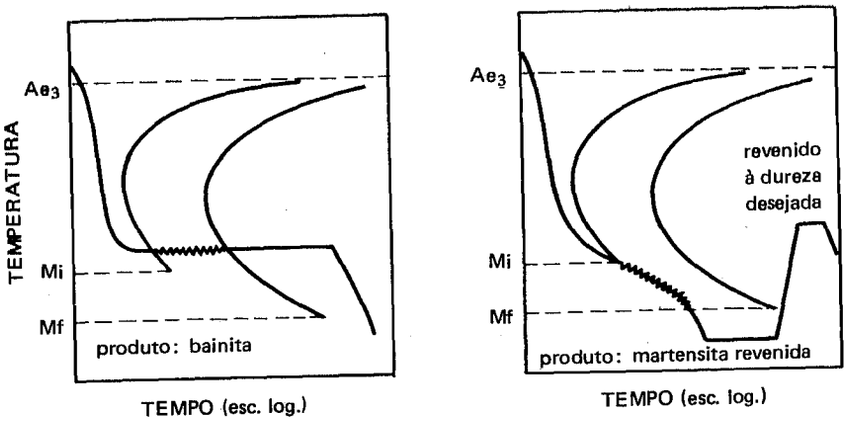


Figura 47 *Diagramas esquemáticos representativos dos tratamentos isotérmicos da austêmpera e martêmpera.*

O banho é, portanto, mantido a temperaturas entre 260°C e 440°C.

A seguir, o aço é esfriado, ao ar tranqüilo.

A bainita é uma estrutura que, de um modo geral, substitui uma estrutura martensítica revenida. Em outras palavras, em muitos casos, a austêmpera substitui, com vantagens, os tratamentos de têmpera e revenido.

Entre as vantagens, deve-se mencionar o fato de que as tensões internas resultantes no processo são muito menores, não ocorrendo praticamente qualquer empenamento das peças tratadas. Essa quase ausência de tensões internas é facilmente compreendida, se se lembrar que a bainita se forma a uma temperatura bem mais alta do que a que corresponde às de início e fim de formação da martensita.

A austêmpera aplica-se em aços de temperabilidade relativamente elevada, como os que contêm carbono acima de 0,50% ou com carbono mais baixo, porém manganês mais elevado ou com a presença de elementos de liga.

Por outro lado, devido à influência da seção das peças nas curvas de esfriamento, a austêmpera não apresenta bons resultados em peças de grandes dimensões. Não convém, em outras palavras, que a seção das peças a serem austemperadas seja maior que 5 mm, se se tratar de aço-carbono; no caso de aços-liga, pode-se admitir seções até 25 mm.

6.2 **Martêmpera** Como a Figura 47 mostra, na martêmpera o objetivo é obter martensita, como na têmpera. Entretanto, o tratamento difere da têmpera comum, porque, ao atingir, no resfriamento, a linha M_i de início de formação da martensita, o resfriamento é retardado, de modo a que esta se forme mais lentamente. O meio de resfriamento – óleo quente ou sal fundido – deve, pois, ser mantido a uma temperatura correspondente à linha M_i ou pouco acima. O material é mantido nessa temperatura, durante um tempo suficiente para que ela fique uniforme através de toda a sua seção. Em seguida, as peças são resfriadas ao ar.

A formação da martensita se dá de modo uniforme através de toda a seção da peça e evita-se o aparecimento de quantidade excessiva de tensões internas.

Em seguida, procede-se ao revenido, como na têmpera comum.

O tratamento de martêmpera diminui o risco de empenamento das peças durante o tratamento.

Os aços-liga são os materiais que mais se prestam a esse tipo de tratamento e, como na austêmpera, a seção das peças é uma variável importante.

As propriedades de um aço martemperado e revenido são idênticas às de um aço temperado e revenido.

Embora não muito comumente, a austêmpera e a martêmpera são aplicadas igualmente em ferros fundidos cinzentos.

7 – **Tratamentos termoquímicos** O endurecimento superficial dos aços, pela modificação parcial da sua composição química e aplicação simultânea de um tratamento térmico, compreende as seguintes operações:

7.1 **Cementação** É o tratamento mais empregado e mais antigo, pois os romanos já o utilizavam. Consiste na introdução de carbono na superfície de aços de baixo carbono, de modo que o teor superficial desse elemento atinja valores até em torno de 1%, a uma profundidade determinada. O processo é seguido por têmpera.

A temperatura do tratamento deve ser elevada, acima da zona crítica – mais especificamente entre 900° e 950°C – para que a estrutura austenítica esteja em condições de absorver e dissolver carbono.

A têmpera posterior produzirá martensita na camada enriquecida em carbono.

A profundidade de cementação depende da temperatura, do tempo à temperatura, da concentração de carbono; o teor de carbono decresce, à medida que se penetra em profundidade.

A Figura 48 mostra a influência do tempo e da temperatura no processo de cementação.

Os aços para cementação, além de teor de carbono relativamente baixo e eventualmente apresentarem alguns elementos de liga em baixos teores, devem possuir granulação fina, para melhor tenacidade tanto na superfície endurecida como no núcleo.

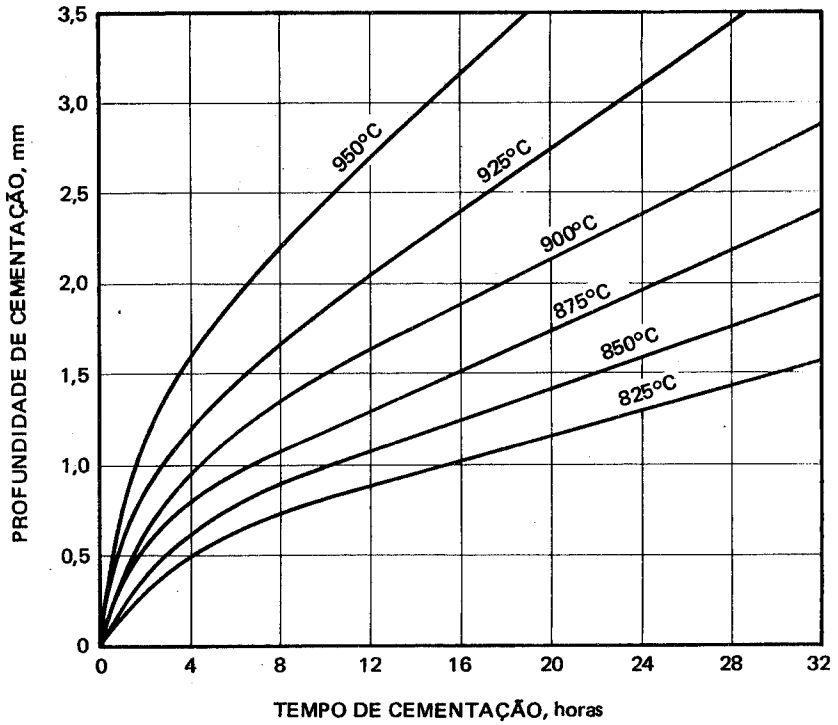


Figura 48 *Curvas representando a influência do tempo e da temperatura na penetração superficial de carbono.*

Antes da cementação, os aços devem ser normalizados para permitir usinagem, pois, após a cementação, somente operações de retificação podem conferir as dimensões e tolerâncias definitivas.

Finalmente, deve-se procurar obter uma distribuição de carbono, da superfície para o interior, gradual, ou seja, deve-se evitar linha nítida de demarcação entre a camada endurecida e o núcleo.

Na cementação, as reações fundamentais são:[33]

$$2CO + 3Fe \rightleftharpoons Fe_3C + CO_2$$

$$CH_4 + 3Fe \rightleftharpoons Fe_3C + 2H_2$$

Os gases promotores da formação de Fe_3C são, portanto, o CO e o CH_4. As reações são reversíveis, ou seja, partindo-se de gases ricos em CO e CH_4 ocorre a cementação; ao contrário, gases ricos em CO_2 e H_2 tendem a remover carbono da superfície. Assim sendo, deve-se procurar evitar CO_2 e H_2 e produzir mais CO e CH_4.

A cementação pode ser realizada por três processos:

7.1.1 **Cementação sólida ou "em caixa"** Neste processo, a substância carbonácea, ou seja, fornecedora do carbono, é sólida, constituída das chamadas "misturas carburizantes". As misturas mais usadas incluem carvão de madeira, aglomerado com 5 a 20%, por meio de óleo comum ou óleo de linhaça, com uma substância ativadora, que pode ser, entre outras, carbonato de sódio, carbonato de potássio, carbonato de cálcio ou carbonato de bário.

As peças a serem cementadas são colocadas em caixas metálicas envoltas pela mistura carburizante.

As principais reações de cementação sólida são:

– às temperaturas elevadas, típicas do processo, o carbono reage e combina com o oxigênio do ar:

$$C + O_2 \rightarrow CO_2$$

– o CO_2 reage com o carbono do carvão incandescente:

$$CO_2 + C \rightarrow 2CO$$

– o CO reage, por sua vez, com o ferro do aço segundo a reação

$$3Fe + 2CO \rightarrow Fe_3C + CO_2$$

– o CO_2 originado reage novamente com o C do carvão incandescente e assim em seguida.

A presença do ativador – por exemplo $BaCO_3$ – contribui para aumentar a velocidade de fornecimento do CO, pois às temperaturas de cementação, ocorrem as reações

$$BaCO_3 \rightarrow BaO + CO_2$$

$$CO_2 + C \rightarrow 2CO$$

A cementação sólida é geralmente levada a efeito entre 850° e 950°C. Novas técnicas têm permitido elevar-se a temperatura para além de 1.000°C, com a vantagem de ter-se um enriquecimento superficial de carbono mais rápido e um gradiente de carbono entre a superfície e o centro mais gradual.

Na cementação sólida, a profundidade de penetração do carbono pode atingir 2 mm ou mais; como o processo é de controle relativamente difícil, não se deve forçar a obtenção de uma camada cementada além de 0,6 a 0,7 mm, devido à quase impossibilidade de ter-se uma camada uniforme.

O processo, de qualquer modo, é relativamente simples, pode utilizar vários tipos de fornos de aquecimento, não exige atmosfera protetora, não há necessidade de um operador muito experiente, diminui a tendência ao empenamento das peças por elas estarem sustentadas na mistura carburizante sólida etc.

Entretanto, o processo não é tão limpo quanto os outros, não é recomendável para a obtenção de camadas cementadas muito finas, não permite um controle muito rigoroso do teor de carbono, não é adequado para têmpera direta, pois a melhor técnica consiste em retirar as caixas do forno e deixá-las resfriar ao ar etc.

7.1.2 **Cementação gasosa** Neste processo, a substância carbonácea é uma atmosfera gasosa, como CO, gases derivados de hidrocarbonetos (gás natural, propana, etana, butana) etc.

As reações fundamentais são

$$2CO \rightleftharpoons (C) + CO_2$$

$$CO + H_2 \rightleftharpoons (C) + H_2O$$

$$CH_4 \rightleftharpoons (C) + 2H_2$$
(metana)

$$C_2H_6 \rightleftharpoons (C) + xCH_4 + yH_2$$
(etana)

$$C_3H_8 \rightleftharpoons (C) + xC_2H_6 + yCH_4 + 2H_2$$
(propana)

onde (C) é o carbono que se dissolverá na austenita e irá difundir-se no interior do aço.

A propana é o gás mais empregado.

O processo é mais limpo que o anterior, permite melhor controle do teor de carbono e da espessura da camada cementada e é mais rápido. Contudo, as reações são mais complexas, a instalação de tratamento é mais onerosa, existindo ainda aparelhagem mais complexa de controle e segurança e o pessoal encarregado deve ser mais experiente.

TABELA 6

COMPOSIÇÃO DE BANHOS DE SAL PARA CEMENTAÇÃO LÍQUIDA

Constituinte	Composição do banho, %	
	Camada de pequena espessura Baixa temperatura (840° a 900°C)	Camada de grande espessura Alta temperatura (900° a 955°C)
Cianeto de sódio	10 a 23	6 a 16
Cloreto de bário	0 a 40	30 a 35
Outros sais alcalinos	0 a 10	0 a 10
Cloreto de potássio	0 a 25	0 a 20
Cloreto de sódio	20 a 40	0 a 20
Carbonato de sódio	30 máx.	30 máx.
Aceleradores outros que compostos de metais alcalinos-ferrosos*	0 a 5	0 a 2
Cianato de sódio	1 máx.	0,5 máx.

7.1.3 **Cementação líquida** O meio carburizante, neste processo, é um sal fundido cuja composição é variável e está indicada na Tabela 6.(34)

Verifica-se, por essa Tabela, quais os componentes essenciais dos banhos de sal e como sua quantidade varia em função da espessura da camada cementada e da temperatura utilizada.

* Dentre esses aceleradores incluem-se dióxido de manganês, óxido de boro, fluoreto de sódio e carboneto de silício.

O mecanismo da cementação líquida pode ser explicado pelas seguintes reações:(34)

$$2NaCN \rightleftharpoons Na_2CN_2 + C$$

ou

$$2NaCN + O_2 \rightleftharpoons 2NaCNO$$

ou

$$NaCN + CO_2 \rightleftharpoons NaCNO + CO$$

resultando

$$3Fe + C \rightarrow Fe_3C$$

ou

$$3Fe + 2CO \rightarrow Fe_3C + CO_2$$

A rigor, a ação carburizante é devida ao cianeto de sódio NaCN ativado pela presença de sais alcalino-terrosos, como cloreto de bário

$$2NaCN + BaCl_2 \rightarrow Ba(CN)_2 + 2NaCl$$

A operação de cementação líquida é rápida e limpa; permite maiores profundidades de cementação, protege eficientemente as peças contra corrosão e descarbonetação, elimina praticamente o empenamento, possibilita melhor controle do teor de carbono, possibilita a cementação localizada, visto que as peças são mergulhadas suspensas no banho de sal; apresenta ainda outras vantagens.

Contudo, os fornos de banho de sal para a cementação líquida exigem exaustão, porque os cianetos a altas temperaturas podem ser venenosos; além disso, o banho de sal deve ser protegido com uma cobertura obtida pela adição de grafita de baixo teor em sílica no banho fundido.

7.1.4 **Cementação sob vácuo** É este um processo relativamente novo, pois foi introduzido em escala comercial em 1970.(35) As peças são introduzidas no forno, onde se processa o vácuo. Em seguida, a temperatura é elevada na faixa de 925° a 1.040°C, em que a austenita fica rapidamente saturada de carbono. Introduz-se, então, um fluxo controlado de hidrocarbonetos gasosos (metana, propana ou outro gás), em quantidade que depende da

carga, da área das superfícies a serem cementadas, do teor de carbono desejado e da profundidade de cementação. O gás, ao entrar em contato com a superfície do aço, desprende vapor de carbono, depositando uma camada muito fina de carbono na superfície do material. Esse carbono é imediatamente absorvido pelo aço, até o limite de saturação.

O fluxo de gás é a seguir interrompido e as bombas de vácuo, que estão operando durante todo o processo, retiram o excesso de gás. Neste instante, começa a segunda fase do processo, ou o chamado "ciclo de difusão controlada", onde se atingem os desejados teores de carbono e de profundidade da camada cementada.

As peças assim cementadas são menos suscetíveis à formação de óxidos, microfissuras, descarbonetação e outros defeitos.

7.1.5 **Tratamentos térmicos da cementação** A têmpera é o tratamento térmico que se realiza nos aços cementados. Ao temperar-se esses aços, deve-se levar em conta que o material apresenta duas seções distintas: uma correspondente à camada cementada, de alto carbono, muito dura e de alta temperabilidade e outra, central, de baixo carbono e dúctil.

De fato, o aço apresenta duas temperaturas críticas, o que significa que, no aquecimento para têmpera, a temperatura crítica do núcleo pode não ser atingida eventualmente.

A têmpera pode ser realizada de acordo com as seguintes técnicas principais:(34)

– *têmpera direta,* que consiste em se temperar imediatamente após a cementação; recomenda-se para aços de granulação fina ou no caso de peças cementadas em banhos de sal, onde o tempo de permanência à temperatura de cementação é geralmente mais curto, não ocorrendo, pois, excessivo crescimento do grão do material;

– *têmpera simples*, em que o aço após a cementação é esfriado ao ar. Em seguida é aquecido e temperado. A temperatura de reaquecimento para a têmpera vai depender da granulação do aço: quando esta é mais fina, aquece-se logo acima da linha A_1, ou seja, austenitiza-se somente a camada cementada; ou aquece-se acima de A_{cm}, o que facilita a dissolução do carboneto e se atinge o núcleo também; pode-se aquecer numa temperatura intermediária, que produz um núcleo mais resistente e tenaz;

– *têmpera dupla*, consiste em duas têmperas: na primeira, aquece-se acima de A_3 para atingir o núcleo e na segunda, aquece-se logo acima de A_1 para atingir a camada cementada. Uma das variedades é realizar a primeira têmpera, logo após a cementação.

Geralmente, os aços cementados e temperados não são revenidos. Eventualmente, procede-se a um revenido a baixa temperatura – entre 135° e 175°C – para alívio de tensões.

7.2 **Nitretação** Neste processo, o endurecimento superficial é obtido pela ação do nitrogênio, quando o aço é aquecido numa determinada temperatura, sob a ação de um ambiente nitrogenoso.

O processo permite, além de alta dureza superficial e elevada resistência ao desgaste, melhorar a resistência à fadiga, à corrosão e ao calor.

No processo de nitretação clássico, a faixa de temperaturas é mais baixa que na cementação, situando-se entre 500° e 560°C. Esse fato acarreta menor probabilidade de empenamento das peças durante o tratamento. Além disso, a camada superficial, uma vez nitretada, apresenta-se suficientemente dura para as aplicações desejadas, não exigindo qualquer tratamento térmico posterior.

Normalmente, entretanto, antes da nitretação, as peças sofrem um tratamento de têmpera e revenido; esta última operação é realizada entre 600° e 700°C, de modo a produzir estrutura mole, que permite usinagem das peças até as tolerâncias desejadas, visto que, após a nitretação, qualquer correção dimensional só pode ser levada a efeito mediante retificação.

Os processos de nitretação são os seguintes:

7.2.1 **Nitretação a gás** É o processo clássico, que exige um tempo muito longo, de 48 a 72 horas (às vezes cerca de 90 horas). A nitretação é levada a efeito na presença de amônia.

Durante o processo, a amônia se dissocia parcialmente em nitrogênio, conforme a seguinte reação:

$$2NH_3 \rightarrow 2N + 3H_2$$

O nitrogênio produzido combina-se com os elementos de liga do aço e forma nitretos complexos de elevada dureza.

Um dos inconvenientes do processo, além do tempo e em função de sua própria demora, é o crescimento que o material sofre enquanto submetido ao tratamento. Assim sendo, esse fato precisa ser levado em conta na usinagem a que são submetidas as peças antes da nitretação.

Na nitretação a gás, a espessura nitretada raramente ultrapassa 0,8 mm e a dureza superficial obtida é da ordem de 1.000 a 1.100 Vickers.

7.2.2 **Nitretação líquida ou em banho de sal** O meio nitretante é uma mistura de sais de sódio e potássio, como o NaCN, em predominância, Na_2CO_3 e NaCNO ou KCN, em predominância, K_2CO_3, KCNO e KCl.

A faixa de temperaturas varia de 500 a 560°C e o tempo é muito mais curto que na nitretação a gás, raramente ultrapassando duas horas.

As camadas nitretadas são geralmente menos espessas que na nitretação a gás.

As propriedades obtidas são semelhantes às obtidas no outro processo; aparentemente conseguem-se melhores propriedades de fadiga.

Finalmente, enquanto na nitretação a gás os aços devem possuir certos elementos de liga (em particular alumínio e cromo), qualquer tipo de aço, simplesmente ao carbono ou ligado, pode ser nitretado em banho de sal.

7.3 **Cianetação** Consiste no aquecimento de um aço a uma temperatura acima de A_1 num banho de sal de cianeto fundido, acarretando enriquecimento superficial de carbono e nitrogênio simultaneamente. Segue-se resfriamento em água ou salmoura e, assim, obtém-se uma superfície dura e resistente ao desgaste.

A faixa de temperaturas varia de 760° a 870°C e o tempo, dentro do banho de sal fundido, varia de 30 a 60 min. A espessura da camada cianetada varia, em geral, de 0,10 a 0,30 mm.

O processo é aplicado em aços-carbono de baixo teor de carbono.

7.4 **Carbo-nitretação** O meio carbo-nitretante é uma atmosfera gasosa, contendo carbono e nitrogênio ao mesmo tempo. A atmosfera pode ser constituída pelos seguintes gases:

- gás de gerador: 77 a 89%
- gás natural: 9 a 15%
- amônia: 2 a 8%

A temperatura varia de 700° a 900°C e o tempo de tratamento é relativamente pequeno; a espessura das camadas carbo-nitretadas varia de 0,07 a 0,7 mm.

7.5 **Boretação** Um tratamento superficial relativamente recente consiste na introdução, por difusão, do elemento boro; origina-se boreto de ferro com dureza muito elevada – 1.700 a 2.000 Vickers.

O processo é realizado em meio sólido constituído de um granulado composto de carboneto de boro B_4C e de um ativador, fluoreto duplo de boro e potássio.

A temperatura do tratamento situa-se em torno de 900°C e o tempo depende da espessura desejada na camada boretada; por exemplo, para um aço comum com 0,45% de carbono, consegue-se, em 4 horas, uma camada com pouco mais de 100 μ de espessura; em 12 horas, a espessura ultrapassa 200 μ.(34)

CAPÍTULO X

AÇOS PARA CONSTRUÇÃO MECÂNICA

1 – Introdução É, de certo modo, difícil determinar com precisão o que seja aço para construção mecânica. Por essa razão, o autor procurou aplicar os critérios adotados no estudo dos aços. Serão, assim, abordados os aços – como todos os materiais incluídos na presente obra – empregados não somente na construção de equipamentos para a indústria mecânica, como igualmente os utilizados em veículos de transporte de toda a natureza, em aparelhos elétricos, eletrônicos, em máquinas em geral, eletrodomésticos etc.

2 – Sistemas de classificação dos aços O número de tipos de aço é muito elevado, pois além dos aços simplesmente ao carbono com teores variáveis de carbono, é muito grande a quantidade de aços ligados.

Para facilitar sua seleção, associações técnicas especializadas classificam os aços pela sua composição química, dando origem aos sistemas SAE e AISI (americanos), DIN (alemão), ABNT (brasileiro) etc.

Alguns desses sistemas estão indicados nos Anexos 1, 2 e 3.

O sistema brasileiro da ABNT baseou-se nos sistemas americanos. Neles, basicamente, os vários tipos de aços até 1% de carbono, com os elementos comuns manganês, silício, fósforo e enxofre ou com a presença de elementos de liga em baixos teores, são indicados por quatro algarismos: os dois últimos correspondem ao teor de carbono médio e os dois primeiros à presença ou não de elementos de liga. Assim, toda vez que os dois primeiros algarismos sejam 1 e 0, trata-se de aços-carbono; a mudança de um desses algarismos ou de ambos indica um novo tipo de aço, com a presença de outros elementos que não os comuns, ou com estes elementos comuns em teores superiores aos que são considerados normais. Por exemplo:

1045 – aço-carbono com teor médio de C 0,45%
1120 – aço de usinagem fácil, ao enxofre, com 0,20% de carbono médio
4420 – aços ao Ni-Cr-Mo, com 1,85% Ni, 0,50% Cr, 0,25% Mo e 0,20% C
5140 – aço ao Cr com 0,70% a 0,90% Cr e 0,40% C.

A norma alemã DIN adota outro critério para classificar os aços. Os aços comuns, por exemplo, são indicados pelo símbolo St (Stahl = aço), seguido de um algarismo que corresponde ao valor mínimo de resistência à tração – St42, St35 etc.

Os aços especiais, com teores de carbono acima de 1% ou com a presença de elementos de liga em altos teores, como aços para ferramentas e matrizes, resistentes à corrosão e ao calor etc., obedecem a outros critérios de classificação, como se verá por ocasião do seu estudo.

3 – Composição química e propriedades dos aços-carbono Os aços comuns, além do carbono que é o seu principal elemento de liga, apresentam manganês, silício, fósforo e enxofre como elementos sempre presentes, em função das matérias-primas que foram utilizadas na fabricação do ferro gusa e do aço. Por essa razão, esses elementos são normalmente especificados.

O efeito do *carbono* é conhecido: é o responsável direto pela dureza do material no estado recozido e normalizado e pela sua temperabilidade. Sem carbono, o ferro não pode ser endurecido pela têmpera, pois não haverá formação da martensita. Assim, é o carbono que determina a estrutura e, em conseqüência, as propriedades mecânicas do aço nos estados recozido e normalizado, ao mesmo tempo que sua presença, em maior ou menor quantidade, torna o aço mais ou menos temperável ou endurecível.

O *silício*, nos teores normais – entre 0,15 e 0,30% – é elemento essencialmente desoxidante, pois neutraliza a ação de formação de CO ou CO_2, por ocasião da fusão e solidificação dos aços.

O *manganês*, em teores entre 0,30 e 0,60%, atua como desoxidante do mesmo modo que o silício e como dessulfurante, ao combinar-se com o enxofre de preferência ao ferro, formando um sulfeto de Mn, eliminando o problema da fragilidade a quente que pode ocorrer na presença do FeS.

Finalmente, o *fósforo* e o *enxofre* são geralmente considerados elementos nocivos, de modo que as especificações, a não ser em casos especiais, procuram fixar os teores desses elementos em valores baixos. De fato, em certos casos, como nos aços de usinagem fácil, esses elementos, sobretudo o enxofre, podem ser especificados com teores acima dos normais, desde que o seu efeito seja contrabalançado pelo aumento do teor de outro elemento (Mn, na presença de S).

Levando a determinação da composição química dos aços a uma maior precisão, outros elementos podem ser encontrados, como *alumínio*, adicionado como desoxidante e os gases *oxigênio*, *nitrogênio* e *hidrogênio*, presentes devido aos processos de fabricação.

Normalmente, esses elementos, na faixa das quantidades encontradas, pouco afetam as propriedades do aço.

As propriedades dos aços-carbono dependem, basicamente, de dois fatores:

– composição química
– estrutura.

O primeiro fator já foi analisado, pois ficou claro que o carbono é o elemento fundamental.

Quanto à *estrutura*, ela, por sua vez, é influenciada pelos seguintes fatores:

– composição química
– tratamento mecânico
– tratamento térmico.

A *composição química* determina, em função do teor de carbono, se o aço é hipoeutetóide, hipereutetóide ou eutetóide. O gráfico da Figura 27 já apresentada elucida com precisão esse aspecto estrutural.

O *tratamento mecânico* relaciona-se com as condições de deformação do material: se a quente ou se a frio e, neste caso, a intensidade do encruamento resultante.

Sabe-se que a deformação a quente dos metais tende a eliminar algumas imperfeições ou defeitos ou heterogeneidades, como bolhas, vazios, estrutura dendrítica etc., o que, em última análise, produz uma estrutura granular mais homogênea, com reflexos positivos nas propriedades mecânicas.

Por outro lado, a deformação a frio que resulta num encruamento do aço, provoca deformação cristalina com os conhecidos efeitos de aumentar as propriedades relacionadas com a resistência mecânica e prejudicar as relacionadas com a ductilidade e tenacidade.

Esse efeito é tanto mais acentuado quanto mais intensa a deformação produzida, o que fica bem claro pelo exame das curvas tensão-deformação da Figura 49.

O *tratamento térmico* influi sob dois aspectos:

– temperatura e tempo de aquecimento
– velocidade de esfriamento.

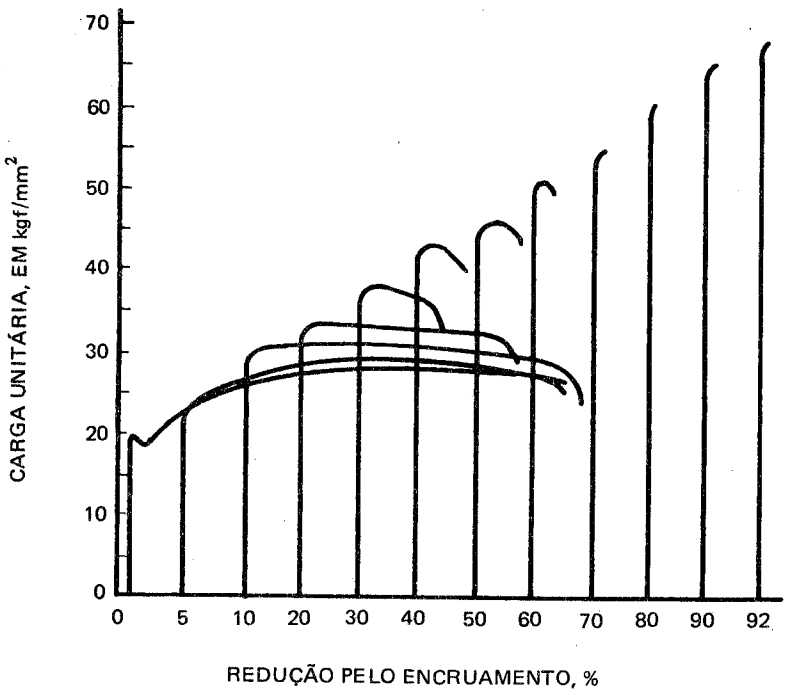


Figura 49 *Influência do encruamento sobre as curvas tensão-deformação num aço de baixo carbono.*

O efeito da temperatura de aquecimento é bem conhecido. No caso dos aços, é necessário ter bem em mente a posição das linhas de transformação ou da zona crítica, para que, ao chegar-se à temperatura de austenitização que corresponde aproximadamente à de recristalização, sejam evitados dois inconvenientes: temperatura muito elevada, dentro da zona austenítica, podendo ocasionar indesejável aumento de grão ou temperatura insuficiente, dificultando a solução total dos carbonetos de ferro e, eventualmente, de outros, no ferro gama. Em ambos os casos, as conseqüências serão sentidas na estrutura final. Deve-se ter em mente, igualmente, o tipo de aço que está sendo tratado, em função da operação de tratamento térmico que está sendo executada, devido à posição da linha A_{cm} em relação à linha A_3 (aços hipereutetóides e aços hipoeutetóides).

O tempo de aquecimento, sob o ponto de vista de crescimento de grão ou dissolução de carbonetos, atua praticamente como a temperatura, de modo que as mesmas observações feitas em relação a este último fator se aplicam no caso do tempo de aquecimento.

O esfriamento, depois do material ter sido convenientemente aquecido, vai determinar sua estrutura final, de modo que as condições segundo as quais o esfriamento é levado a efeito até a temperatura ambiente irão estabelecer a natureza do constituinte final: se perlita grossa, perlita fina, bainita comum, bainita acicular, martensita, martensita com austenita retida etc. Os efeitos dessas estruturas sobre as propriedades dos aços já são conhecidos. Mais um exemplo elucidativo está contido na Tabela 7.[36]

A Tabela 8[37] dá uma idéia das propriedades mecânicas de aços-carbono comuns, em vários estados.

4 — Efeitos dos elementos de liga nos aços De um modo geral, ao introduzir-se elementos de liga nos aços, visam-se os seguintes objetivos:

- alterar as propriedades mecânicas
- aumentar a usinabilidade
- aumentar a temperabilidade
- conferir dureza a quente
- aumentar a capacidade de corte
- conferir resistência ao desgaste
- conferir resistência à corrosão
- conferir resistência à oxidação (ao calor)
- modificar os característicos elétricos e magnéticos

Os elementos de liga são introduzidos em teores e em número os mais variados. A não ser nos casos em que se desejem característicos especiais, como dureza a quente, inoxidabilidade, refratariedade etc., a tendência moderna é adicionar vários elementos de li simultaneamente, em teores baixos e médios.

Os teores elevados de um ou mais elementos de liga são destinados exatamente para os casos em que se procuram característicos especiais.

O aumento dos valores das propriedades mecânicas, como dureza, resistência à tração, é conseguido sobretudo porque os elementos de liga, além de aumentarem a resistência da ferrita, formam outros carbonetos, além do Fe_3C.

A Figura 50[36] mostra a ação de alguns elementos de liga que se dissolvem na ferrita, no sentido de aumentar a dureza dos aços. As ações mais positivas correspondem às do fósforo, silício, manganês e níquel. Os dois primeiros, na realidade, não são empregados com esse objetivo.

O aumento da temperabilidade deve-se, como se viu, à tendência dos elementos de liga, com exceção do cobalto, de deslocarem as curvas em C para a direita.

TABELA 7

EFEITO DA ESTRUTURA SOBRE ALGUMAS PROPRIEDADES DO AÇO

PROPRIEDADE	Ferro comercialmente puro	Aço com 1% de carbono		
		Perlítico	Coalescido	Temperado e revenido
Limite de escoamento, kgf/mm²	18,2	59,5	28,0	–
Limite de resistência à tração, kgf/mm²	29,4	105,0	54,6	182,0
Alongamento, %	40–44	10	31	13
Estrição, %	70–75	12–15	57	45
Dureza Brinell	80–85	300	156	540

TABELA 8

PROPRIEDADES MECÂNICAS DE AÇOS-CARBONO TÍPICOS

Tipo AISI e condição	Resist. à tração kgf/mm²	Along. em 2" %	Dureza Brinell	Resist. ao choque kgf.m
1010, laminado	28-45,5	25-50	110-140	–
1020, laminado	42-49,0	35-40	125-150	8,3-11,0
1030, temperado e revenido	52,5-84,0	17-35	180-490	–
1050, temperado e revenido	66,5-105,0	10-30	190-320	2,2-6,9
1080, temperado e revenido	81,2-133,0	10-25	220-390	1,4-1,6
1095, temperado e revenido	84,0-133,0	10-26	230-400	0,69-0,83

Nota: As faixas de valores representam as diferenças nos tratamentos térmicos.

A influência dos elementos de liga nas propriedades dos aços será mais pormenorizada quando se estudar em particular cada tipo de aço.

A Tabela 9[37] dá uma idéia das propriedades mecânicas de aços-liga com baixo teor de elementos de liga.

5 – Tipos de aços Em face das aplicações dadas na Introdução deste Capítulo, serão considerados os seguintes tipos de aço:

- aços para fundição
- aços estruturais
- aços para chapas
- aços para tubos
- aços para arames, fios e molas
- aços de usinagem fácil
- aços para cementação e nitretação
- aços para fins especiais.

TABELA 9

PROPRIEDADES MECÂNICAS DE AÇOS-LIGA DE BAIXO TEOR EM LIGA

Tipo AISI e condição	Resist. à tração kgf/mm²	Along. em 2" %	Dureza	Resist. ao choque Izod kgf.m
Tipos para cementação temperados e revenidos				
4320	150,5	12	60 RC	3,8
4620	82,6	20	60 RC	7,7
8620	122,5	13	62 RC	3,8
Tipos totalmente endurecíveis temperados e revenidos				
1340	70-98	20-26	212-285	6,9-12,4
4130	70-115,5	16-25	195-330	5,5-12,4
8740	80,5-126	13-23	230-250	4,8-12,4

Nota: A dureza dos tipos para cementação corresponde à camada cementada. A dureza dos tipos totalmente endurecíveis foi determinada pelo método Brinell.
A faixa de valores representa diferenças nos tratamentos térmicos.

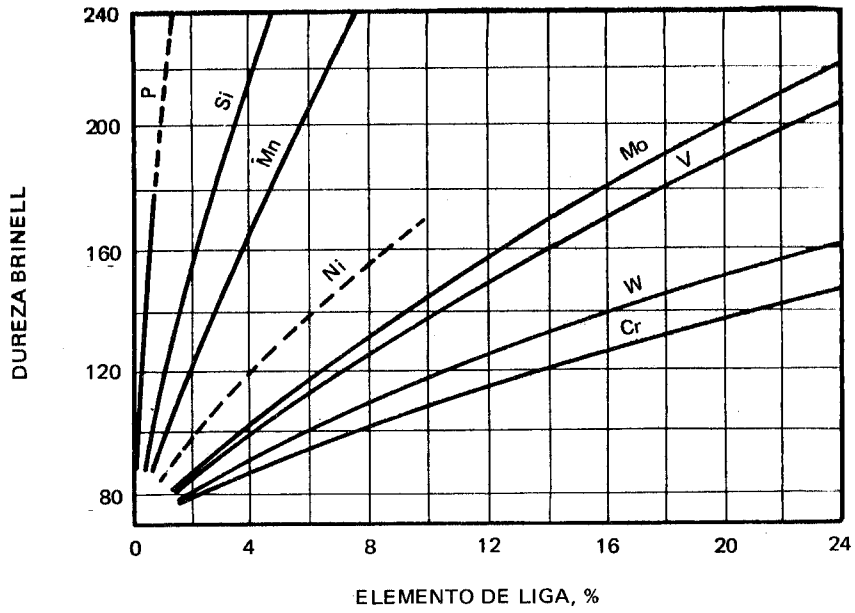


Figura 50 *Ação relativa na dureza do aço de alguns elementos de liga que se dissolvem na ferrita.*

5.1 **Aços para fundição** São os recomendados para fundição de peças empregadas em máquinas operatrizes, indústria automobilística, indústria ferroviária, indústria naval, implementos agrícolas, tratores, equipamento para escavação e construção, equipamento elétrico, na indústria química, em equipamento para refino de petróleo, para a indústria de papel e muitas outras aplicações.

Os *requisitos* exigidos nos aços para fundição são *homogeneidade*, ou seja, seção sã em toda a sua extensão, *granulação fina e regular* e *completa isenção de tensões*. Além disso, propriedades mecânicas adequadas, as quais vão depender da maior ou menor responsabilidade das aplicações e são reguladas pelo teor de carbono, eventual adição de elementos de liga e apropriado tratamento térmico.

A homogeneidade das peças é obtida por projeto adequado tanto da peça como dos modelos e dos moldes e técnica apropriada de fundição.

A granulação é controlada pelo tratamento posterior de recozimento ou normalização e as tensões internas, se totalmente impossíveis de eliminar por projeto adequado, serão contornadas pelo tratamento térmico de alívio de tensões.

Os aços para fundição podem ser classificados nos seguintes grupos:

- aços de baixo carbono, até 0,20%
- aços de médio carbono, de 0,20 a 0,50%
- aços de alto carbono, acima de 0,50%
- aços-liga de baixo teor em liga (soma dos elementos de liga inferior a 8%)
- aços-liga de alto teor em liga (soma dos elementos de liga acima de 8%)

Estes últimos, que incluem, entre outros, aços inoxidáveis, aços refratários etc., serão discutidos em outros capítulos.

5.1.1 **Aços-carbono para fundição** Nestes, a faixa de composição dos principais elementos é a seguinte:

- carbono – 0,09 a 0,90%
- manganês – 0,50 a 1,00%
- silício – 0,20 a 0,75%

O fósforo e o enxofre são mantidos no máximo em 0,05% e 0,06% respectivamente, devendo o seu teor ser tanto menor quanto maior o teor de carbono, sobretudo no que diz respeito ao fósforo.

O carbono será tanto mais elevado, quanto maiores forem os valores desejados para limite de escoamento (ou limite n), limite de resistência à tração e dureza.

O manganês, acima de 0,50/0,60%, melhora a resistência mecânica e a temperabilidade, o que é vantajoso na hipótese de tornar-se conveniente a têmpera das peças fundidas.

5.1.2 **Aços-liga para fundição** Obviamente, apresentam melhores propriedades mecânicas. Assim sendo, podem suportar maiores pressões, maiores esforços de tração, temperaturas relativamente mais elevadas etc.

Possuem igualmente uma resistência ao desgaste relativamente mais elevada e maior temperabilidade.

Dependendo dos elementos de liga presentes e do tratamento de têmpera e revenido aplicado, podem atingir limites de resistência à tração até 150 kgf/mm^2.

O principal e mais econômico elemento de liga utilizado é o manganês, entre 1 e 3%.

Outros elementos eventualmente adicionados são:

- níquel – 0,50 a 3,50%
- cromo – 0,50 a 3,50%
- vanádio – 0,10 a 0,20%
- molibdênio – até 0,60%

5.2 **Aços estruturais** São aços empregados principalmente em construção civil e, sob o ponto de vista das aplicações que mais interessam aos leitores desta obra, em equipamento de transporte: veículos em geral, equipamento rodoviário, ferroviário, naval etc.

Nessas aplicações, alguns requisitos fundamentais são:

- baixo custo
- resistência mecânica
- deformabilidade
- soldabilidade
- relação adequada resistência/peso

Em princípio, devem ser considerados dois tipos fundamentais:

- aços-carbono
- aços de alta resistência e baixo teor em liga.

Os primeiros são utilizados no estado simplesmente laminado, na forma de perfis estruturais como barras, tiras, cantoneiras, vigas em T, em U, em I, em L etc.

A maioria deles apresenta baixo a médio teor de carbono – entre 0,15 a 0,40% – o que lhes confere baixo custo, boa trabalhabilidade (ductilidade) e soldabilidade e resistência mecânica satisfatória.

Quando se deseja melhorar a resistência à corrosão, introduz-se pequenas quantidades de cobre: em torno de 0,25%.

Em determinadas aplicações, procura-se encruar o material, principalmente quando na forma de barras, de modo a aumentar a resistência mecânica.

Nos casos dos aços-liga de baixo teor em liga e alta resistência mecânica, o que se faz é introduzir vários elementos de liga simultaneamente em pequenas quantidades, mantendo o carbono até um máximo de 0,25%. Por exemplo, pode-se aumentar o silício e o manganês até 0,90 e 1,75%, respectivamente, além de adicionar cobre até 1,30%, cromo até 1,25%, níquel até 2,00%, molibdênio até 0,25%, zircônio até 0,15% etc. Nióbio e vanádio também são adicionados.

Os efeitos consistem em:

– aumento da resistência mecânica, o que possibilita um acréscimo apreciável na carga unitária aplicada na estrutura ou uma diminuição proporcional da seção; obviamente, tal resultado é muito importante na estrutura de veículos de transporte de todos os tipos;

– melhora da resistência à corrosão atmosférica, fator importante sobretudo no emprego de seções mais leves;

– melhora do limite de fadiga;

– elevação da relação do limite de fadiga para o limite de resistência à tração.

Embora, numa primeira análise, possa parecer que esses aços sejam menos deformáveis e sua soldabilidade seja grandemente prejudicada, na realidade esses característicos são pouco afetados, de modo que tais aços representam hoje um papel muito importante em construção mecânica.

O efeito dos elementos de liga nesses aços já é conhecido; entretanto, pode ser rapidamente resumido da seguinte maneira:

– manganês – melhora a resistência mecânica, desde que seu teor supere a 1%; pode ser empregado isoladamente;

– níquel – melhora as propriedades mecânicas, a resistência à corrosão e contribui para refinar o grão;

– cobre – melhora a resistência à corrosão atmosférica;

– cromo – melhora a resistência mecânica quando em teores baixos; em maior quantidade, melhora a resistência ao desgaste, por formar carbonetos; é adicionado juntamente com níquel e cobre;

– molibdênio – mesmo efeito do níquel, cromo e manganês sobre as propriedades mecânicas, com a vantagem de melhorá-las igualmente a temperaturas mais elevadas.

Alguns exemplos de composições de aços de alta resistência e baixo teor em liga, com as respectivas propriedades mecânicas, estão representadas na Tabela 10.

Como se vê, em alguns casos, mesmo com teor de carbono muito baixo (último exemplo da Tabela), a presença simultânea de manganês, cobre, molibdênio e níquel produz apreciável melhora na resistência mecânica, sem que a ductilidade seja grandemente afetada.

TABELA 10

ALGUNS TIPOS E PROPRIEDADES DE AÇOS ESTRUTURAIS DE ALTA RESISTÊNCIA E BAIXO TEOR EM LIGA

Composição química %	Propriedades mecânicas típicas		
	Limite de escoamento kgf/mm²	Limite de resist. à tração kgf/mm²	Alongamento em 2", %
0,22 C – 1,15 Mn – 0,005 Nb ou 0,005 V	31,5	45,4	19
0,26 C – 1,35 Mn – 0,01 Nb ou 0,01 V	42,0	63,0	14
0,12 C – 0,75 Mn – 0,015 Nb ou 0,22 Cu	31,5	43,4	28
0,12 C – 0,75 Mn – 0,55/1,30 Cu – 0,18 Mo – 0,30/0,75 Ni	35,0	49	22
0,15 C – 1,00 Mn – 0,90/1,40 Cu – 0,20/0,30 Mo – 1,0/1,5 Ni	45,4	59,5	20

Os teores de P, S e Si são mantidos baixos.

5.3 **Aços para chapas** As chapas são materiais que exigem:

- elevada deformabilidade ou ductilidade, ainda que com prejuízo da resistência mecânica;
- soldabilidade adequada;
- superfície sem defeitos;
- baixo custo.

A expressão "chapa" compreende uma série de produtos, todos importantes na indústria.

A ABNT, pela sua P-TB-20 de 1968, assim distingue os vários produtos laminados planos de aço:

- *folha* – produto plano com espessura inferior a 0,30 mm e qualquer largura;
- *tira* – produto plano com espessura compreendida entre 0,30 mm e 5,00 mm e largura inferior a 300 mm;
- *chapa fina* – produto plano com espessura compreendida entre 0,30 mm e 6,00 mm e largura igual ou superior a 300 mm;
- *barra chata* – produto plano com espessura superior a 5,00 mm e largura inferior a 300 mm;
- *chapa grossa* – produto plano com espessura superior a 5,00 mm e largura igual ou superior a 300 mm.

Por outro lado, deve-se distinguir, ainda, dois tipos de produtos planos de aço, de acordo com o revestimento protetor superficial:

- *chapas galvanizadas*, quando recobertas de zinco;
- *folhas-de-flandres*, quando recobertas de estanho.

Finalmente, de acordo com as publicações ABNT EB-255, EB-276, EB-295, EB-325, NB-82, EB-593, EB-248, as chapas de aço-carbono são especificadas de acordo com o uso nas seguintes qualidades:

- *qualidade usos gerais* – chapas finas a frio; chapas finas a quente;
- *qualidade estrutural para automóveis* – chapas grossas, chapas finas a quente;
- *qualidade recipientes transportáveis para gases liquefeitos de petróleo; cubas de galvanização* – chapas finas a quente; chapas grossas, sendo estas últimas utilizadas para cubas de galvanização;

- *qualidade estrutural* – chapas finas a frio; chapas finas a quente; para partes de máquinas e veículos, tubos, recipientes, estruturas metálicas etc.;
- *qualidade estrutural* – chapas grossas; pontes, locomotivas, vagões, edifícios, máquinas, equipamentos em geral;
- *qualidade soldável de alta resistência* – chapas grossas; chapas finas a quente; para estruturas em geral; pontes, edifícios, navios, guindastes, vagões, implementos agrícolas, vasos de pressão etc.;
- *qualidade tubos* – chapas grossas; chapas finas a quente; para tubulações, oleodutos etc.;
- *qualidade estampagem* – chapas finas a frio; chapas finas a quente; para estampagem média, estampagem profunda ou extraprofunda e resistência ao envelhecimento.

Pela relação acima, tem-se uma idéia dos vastos campos de aplicação desses produtos.

As aplicações acima especificam aços-carbono; de acordo com o emprego, a composição química situa-se dentro das seguintes faixas:

carbono	– 0,05 a 0,55%
manganês	– 0,15 a 1,50%
silício	– 0,30 a 0,50%
fósforo e enxofre	– 0,05% máx.

É claro que os teores de carbono e manganês são mais elevados nas aplicações mais críticas, em que se exige maior resistência mecânica.

De qualquer modo, as principais propriedades variam dentro dos seguintes limites:

limite de escoamento	– 19 a 40 kgf/mm^2
limite de resistência à tração	– 28 a 50 kgf/mm^2
alongamento (em 50 mm)	– 40 a 14%.

Na qualidade estampagem, exige-se embutimento de 12 mm em média, para espessura de 2,0 mm.

Em alguns tipos, pode-se especificar cobre até 0,20%.

As chapas e tiras são produzidas a partir de bobinas de aço relaminadas a frio, até a espessura desejada e geralmente recozidas em caixa.

Às vezes, sobretudo nas tiras, a sua utilização é feita no estado encruado. Então, as propriedades de resistência podem atingir valores mais

elevados, com prejuízo da ductilidade; esses valores irão depender, obviamente, do grau do encruamento.

Assim, por exemplo, na condição chamada *"dura"*, o aço de baixo carbono em tiras pode apresentar um limite de resistência à tração da ordem de 65 kgf/mm^2, alongamento baixo (da ordem de 1%) e dureza Rockwell B de cerca de 96, enquanto o mesmo material no estado *"muito mole"* (totalmente recozido) apresenta limite de resistência à tração de 28 kgf/mm^2, com alongamentos de 45% e dureza Rockwell B de 38.(38)

Normalmente, esses produtos são laminados a partir de aços "acalmados" ou "efervescentes". Os primeiros produzem material de superiores qualidades.

Na fabricação das chapas, deve-se evitar os defeitos superficiais conhecidos com os nomes de "linhas de Luder" ou "linhas de distensão" e "casca de laranja".

O primeiro defeito, caracterizado pelo aparecimento de tiras alongadas, ocorre quando o aço é laminado pouco acima da carga correspondente ao limite de escoamento, condição essa que deve, portanto, ser evitada, porque se o fenômeno não afeta as propriedades mecânicas do material, este se apresenta com mau aspecto superficial, o qual não pode ser disfarçado nem pela aplicação de pintura.

A "casca de laranja" corresponde a uma superfície grosseira e rugosa que aparece após a estampagem; o defeito é causado por granulação grosseira do material que vai ser estampado. Assim sendo, para chapas que vão ser submetidas a estampagem profunda, recomenda-se tamanho de grão intermediário – entre 5 e 8 ASTM –, devendo-se, por outro lado, evitar granulação muito fina que pode prejudicar a qualidade de estampagem do aço.

5.4 **Aços para tubos** Pouco há que dizer sobre esses tipos de aços, visto que, de certo modo, eles foram abordados no item anterior.

Como se sabe, os tubos são produzidos essencialmente por dois processos:

– a partir de tarugos cheios, adequadamente perfurados, como no processo Mannesmann (tubos inteiriços ou sem costura);

– a partir de chapas grossas ou finas a quente que são dobradas na largura e suas extremidades soldadas (tubos soldados ou com costura).

Freqüentemente, os tubos são estirados a frio para produzir paredes mais finas, diâmetros muito pequenos, proporcionar melhor acabamento superficial, obter tolerâncias dimensionais mais estreitas, obter formas diferentes da circular e melhorar igualmente as propriedades de resistência à tração.

Os aços para tubos são comumente de baixo carbono (até um máximo de 0,30%) e manganês até 1,50%.

O limite de resistência à tração, no estado recozido, pode variar de 32 a 50 kgf/mm^2, o alongamento de 28 a 18%; no estado trefilado duro, o limite de resistência à tração varia de 45 a 65 kgf/mm^2 e o alongamento de 6 a 4%.

Para aplicações a temperaturas mais elevadas, torna-se conveniente adicionar cromo, que melhora a resistência à corrosão e à oxidação, e molibdênio, que melhora as propriedades de fluência.

Esses elementos são adicionados em teores de 0,50% a 10,00% para o cromo 0,45 a 1,10% para o molibdênio, dependendo das condições de serviço.

As propriedades de alguns tipos de aços-liga para tubos estão representadas na Tabela. 11.

5.5 **Aços para arames e fios; aços para molas** Os arames e fios são produtos com as mais variadas aplicações, desde as mais simples, como para cercas ou fabricação de pregos, até as mais críticas, para molas, para cabos de elevadores, de guindastes, de pontes rolantes, de pontes pênseis e os chamados "fios de música" ou "cordas de piano", os quais, devido à composição química, controle de fabricação e tratamento térmico especial ("patenteamento") são considerados entre os mais sofisticados produtos de aço.

Neste item serão tratados os materiais de aço-carbono ou com elementos de liga em baixos teores.

Não há uma distinção precisa entre "arame" e "fio". Pode-se definir ambos como produtos obtidos por trefilação, apresentando seção transversal uniforme, muito pequena em relação ao comprimento, geralmente circular, mas eventualmente quadrada, ovalada, meio-circular, hexagonal etc.

A trefilação, feita normalmente a frio, encrua o material, que pode ser empregado nesse estado ou então ser a seguir recozido.

Os fios de aço-carbono são os mais importantes, porque apresentam as melhores propriedades mecânicas e se destinam às aplicações da indústria mecânica.

Esses aços podem ser agrupados em dois grupos:

– *não patenteados*, indicados para eletrodos de soldagem utilizados no revestimento de peças que devam apresentar considerável resistência ao desgaste ou em peças que serão submetidas a tratamentos térmicos posteriores, como arruelas de pressão e certos tipos de molas, peças essas que, depois de conformadas, serão temperadas e revenidas;

TABELA 11

PROPRIEDADES DE ALGUNS TIPOS DE AÇOS-LIGA PARA TUBOS

Tipo de aço	Limite de escoamento kgf/mm²	Limite de resist. à tração kgf/mm²	Alongamento em 2", %	Dureza Brinell	Resist. ao choque Charpy kgf.m
0,10 – 0,20 C	30,0	42,0	46	117	6,3
0,5 Mo	34,5	45,0	47	141	7,3
0,5 Cr – 0,5 Mo	30,0	43,5	50	140	7,2
1,0 Cr – 0,5 Mo	24,5	48,5	40	130	6,3
3,0 Cr – 1,0 Mo	28,0	48,5	53	146	7,3
5,0 Cr – 0,5 Mo	27,0	49,0	47	139	6,3
9,0 Cr – 1,0 Mo	30,5	51,5	41	145	6,3

– *patenteados,* ou seja, sujeitos ao tratamento térmico de *"patenteamento"*, o qual consiste em aquecer o fio a uma temperatura acima de A_3, seguindo-se resfriamento rápido ao ar ou preferivelmente em banho de sal ou de chumbo mantidos a uma temperatura entre 450° e 550°C. A estrutura resultante é perlita fina ou bainita, ou perlita fina e ferrita, dependendo da composição do aço e do meio de esfriamento. Essa estrutura é a que melhor se presta para produzir, após a trefilação, os mais elevados limites de proporcionalidade, escoamento (ou n) e de resistência à tração. Além disso, a tenacidade do material é elevada, de modo que ele pode ser convenientemente deformado ou conformado.

A Tabela 12[39] apresenta uma tentativa de classificação dos aços para arames ou fios, em função da composição química e das aplicações.

Os aços de alto carbono, no estado patenteado e trefilado – sendo os exemplos mais típicos o "fio de música" ou "corda de piano" –, podem atingir limites de resistência à tração da ordem de 280 kgf/mm².

5.5.1 **Aços para molas** As molas, quaisquer que sejam os seus tipos – helicoidais (de extensão, de compressão, de torção) ou semi-elípticas – são materiais que devem apresentar, em princípio, as seguintes propriedades:

– altos valores para os limites de proporcionalidade ou elasticidade sob tensão ou de proporcionalidade sob torção; nessas condições, as molas poderão suportar as cargas de serviço, geralmente apreciáveis, sem deformação permanente;

– elevada resistência ao choque, sobretudo no caso de serviço mais pesado em veículos em geral;

– alto limite de fadiga, visto que normalmente, na indústria automobilística, as molas falham por fadiga, a ruptura se iniciando em algum ponto de concentração de tensões.

Esses pontos de concentração de tensões são resultantes de imperfeições ou defeitos como marcas de ferramentas, riscos de matrizes de trefilação, rugosidade superficial, descarbonetação superficial, inclusões etc., defeitos esses que devem ser evitados tanto quanto possível.

Os requisitos citados são atingidos mediante composição química do aço, processo de fabricação e acabamento superficial adequados.

O teor de carbono varia de 0,50 a 1,20%; o aço pode ainda conter certos elementos de liga. Os mais usados são o cromo e o vanádio, além do silício e do manganês em teores mais elevados do que os normais. Esses aços ligados apresentam melhores limites de fadiga.

TABELA 12

CLASSIFICAÇÃO DE FIOS E ARAMES

Tipo de aço	Teor de carbono %	Estado	Aplicações mais importantes
baixo C	0,08/0,20	Sem tratamento térmico (no estado encruado)	Eletrodos de soldagem, pregos, pinos e outras peças. Resistência à tração entre 50 e 100 kgf/mm²
		Recozido ou normalizado	Arames lisos ou farpados, arames para telas, pregos, parafusos, rebites etc.
médio C	0,20/0,50	Recozido	Parafusos (posteriormente temperados e revenidos)
		Patenteado e trefilado	Cabos, molas de pequena responsabilidade etc.
alto C	0,60/1,00	Sem tratamento térmico	Eletrodos de soldagem, arruelas de pressão (posteriormente temperadas e revenidas) etc.
		Patenteado e trefilado	Fio (ou corda) de piano (ou de música); cabos para serviço pesado; tirantes e aplicações semelhantes; molas etc.

Em princípio, as molas são fabricadas por dois métodos básicos:(40)

– a partir de tiras ou fios de aços (ao carbono ou ligado) no estado recozido; esses materiais são conformados de modo a resultar as molas, as quais são a seguir temperadas e revenidas;

– a partir de tiras ou fios de aço já endurecido – por têmpera e revenido ou por patenteamento – e estirado, em seguida, a frio; as molas são então conformadas e submetidas a um tratamento térmico a baixa temperatura para alívio de tensões.

Os aços mais utilizados em molas são os SAE 1050, 1065, 1074, 1080, 1090, 1095, 6150, 9260. Estes últimos são ligados.

Os tipos SAE 6150 são ao Cr-V, contendo carbono de 0,48 a 0,53%, manganês de 0,70 a 0,90%, cromo de 0,80 a 1,10% e vanádio de 0,15 a 0,20%. No estado temperado e revenido, esse aço apresenta as seguintes propriedades:

- limite de resistência à tração – 140 a 175 kgf/mm²
- limite de elasticidade sob tração – 126 a 161 kgf/mm²
- resistência à torção – 112 a 136 kgf/mm²
- limite de elasticidade sob torção – 105 a 126 kgf/mm²

As molas confeccionadas com tais aços apresentam resistência à corrosão e ao calor superiores às dos aços-carbono para molas.

Os tipos SAE 9260 são ao Si-Mn, contendo 0,55 a 0,65% de carbono, 0,70 a 1,00% de manganês e 1,80 a 2,20% de silício. Suas propriedades, no estado temperado e revenido, são as seguintes:

- limite de resistência à tração – 140 a 175 kgf/mm²
- limite de elasticidade sob tração – 126 a 161 kgf/mm²
- resistência à torção – 98 a 136 kgf/mm²
- limite de elasticidade sob torção – 84 a 126 kgf/mm²

Sua resistência ao calor é superior à do aço Cr-V.

Quando se deseja melhorar o limite de fadiga dos aços para molas, recorre-se à operação de "jato-percussão".

O "jato-percussão" é um processo de trabalho a frio ou encruamento em que se introduzem tensões de compressão nas camadas superficiais do metal, pela aplicação de choques repetidos e a altas velocidades por intermédio de grânulos de aço duro.

As molas são, às vezes, revestidas de cádmio por deposição eletrolítica, de modo a melhorar sua resistência à corrosão e à abrasão.

Em resumo: para a confecção de molas, nas condições normais de serviço e à temperatura ambiente, os aços mais recomendados são os simplesmente ao carbono, com este elemento em teor elevado.

Quando as condições de serviço são mais severas, exigindo maiores valores dos limites de elasticidade ou de resistência à tração e quando as temperaturas são ligeiramente superiores à ambiente, recomenda-se aços-liga, dentre os quais os tipos mais conhecidos são os SAE 6150 ao Cr-V e SAE 9260 ao Si-Mn.

5.6 **Aços de usinagem fácil** A importância desses aços reside no fato de que a indústria moderna emprega cada vez mais processos de produção em massa, os quais exigem máquinas automáticas que possibilitem a produção de elevado número de peças em tempo relativamente curto.

É necessário, pois, que os materiais empregados na fabricação dessas peças apresentem característicos adequados de usinabilidade. No caso do aço – assim como de outros materiais metálicos –, o fator metalúrgico predominante, para caracterizar a "usinabilidade", é a "dureza", pois se esta propriedade apresentar valores elevados, fica prejudicada a facilidade de usinagem.

A dureza, entretanto, não é o único fator: poder-se-ia até mesmo dizer que, em determinados casos, dureza muito baixa pode significar maior dificuldade na operação de usinagem, devido à formação de cavaco dúctil e longo que interfere na operação, levando ao artifício de modificações das ferramentas, pela introdução dos dispositivos chamados "quebra-cavacos".

Ao lado da dureza deve, pois, ser considerado outro fator metalúrgico: a "microestrutura".

Assim, por exemplo, um aço de baixo carbono – como 0,15% – pode ter sua usinabilidade melhorada, no estado normalizado (em vez de recozido) ou no estado ligeiramente encruado.

Os efeitos da microestrutura na usinabilidade dos aços podem ser resumidos da seguinte maneira[41,42]:

– aços de carbono muito baixo (até 0,20%) são melhor usinados no estado encruado (desde que as tensões sejam aliviadas);

– aços de carbono entre 0,20 e 0,30% são melhor usinados quando a estrutura é normalizada, sobretudo em seções pequenas;

– aços de carbono entre 0,30 e 0,40% devem apresentar, para melhor usinabilidade, a perlita com estrutura grosseira;

– aços de carbono entre 0,40 e 0,60% são melhor usinados quando a perlita se apresenta grosseira ou quando houver esferoidita;

– a introdução controlada de inclusões não-metálicas melhora apreciavelmente a usinabilidade, assim como a introdução de metais moles, como o chumbo e o bismuto.

Este último efeito é que deu origem aos chamados "aços de usinagem fácil".

Tratando-se de inclusões não-metálicas, estas são de sulfeto de manganês. Em conseqüência, os aços correspondentes caracterizam-se por apresentarem enxofre e manganês em teores acima dos normais.

Os aços desse tipo são classificados, nos sistemas ABNT e SAE, como pertencendo aos tipos 1100, onde o teor de carbono varia de 0,08 a 0,55%, o teor de manganês de 0,50 a 1,65% e o teor de enxofre de 0,08 a 0,33%.

O tipo considerado padrão é o 1112, cuja composição e propriedades mecânicas, no estado encruado, são as seguintes:

carbono	– 0,13% máx.
manganês	– 0,70 a 1,00%
fósforo	– 0,07 a 0,12%
enxofre	– 0,16 a 0,23%
limite de escoamento	– 149,0 a 56,0 kgf/mm^2
limite de resistência à tração	– 56,0 a 70,0 kgf/mm^2
alongamento em 2"	– 20 a 10%
estrição	– 50 a 40%
dureza Brinell	– 170 a 202 kgf/mm^2

O índice de usinabilidade desse aço é 100 e ele é utilizado como padrão para qualificar qualquer outro material sob o ponto de vista de usinabilidade.

Os aços com chumbo levaram à criação dos tipos 11L00. O chumbo pode ser introduzido em teores de 0,15 a 0,35% na maioria dos aços das séries 10XX e 11XX.

Esse metal é adicionado no aço líquido durante o seu vazamento nos moldes. Forma-se uma fina dispersão de partículas de chumbo, às vezes imperceptíveis ao microscópio.

Esses aços devem, entretanto, ser empregados em condições em que não se desenvolvam temperaturas elevadas, pois o chumbo funde a 260°C.

A Tabela 13[41] indica a usinabilidade de alguns aços ao chumbo. Como se vê, esse metal é introduzido também em certos aços-liga para melhorar a sua usinabilidade.

TABELA 13

USINABILIDADE DE ALGUNS AÇOS CONTENDO CHUMBO

Tipo	Usinabilidade
11L17	100
11L37	85
11L44*	93
11L53*	75
12L13	175
12L15	170
41L30	85
41L47*	80
61L50*	72
52L50*	52
86L30	85
86L50*	75

* Recozido

5.7 **Aços para cementação e nitretação** Os melhores aços para os tratamentos termoquímicos são aços ligados, embora na cementação muitos aços-carbono sejam empregados, o mesmo acontecendo com o processo de nitretação em banho de sal.

5.7.1 **Aços para cementação** No caso de utilizar-se aço ao carbono, este situa-se na faixa de 0,08 a 0,25%, sendo o tipo padrão o ABNT ou SAE 1020. Pode-se ainda empregar uma variação desse aço aumentando-se o teor de manganês (0,70 a 1,00%), o que proporcionará melhor usinabilidade, melhor capacidade de carbonetação e menor tendência à formação de pontos moles.

Os aços-carbono, depois de cementados, temperados e revenidos, adquirem um núcleo de boa resistência mecânica (70 kgf/mm^2 para limite de resistência à tração) combinado com uma camada superficial dura e resistente ao desgaste, de modo que suas aplicações são muito amplas: pinos, pequenas engrenagens, alavancas, fusos, roletes, eixos de comando de válvulas e outros tipos de mecanismos sujeitos a desgaste superficial.

A introdução de elementos de liga é feita com o objetivo de produzir um núcleo mais tenaz, uma camada superficial mais dura e igualmente tenaz e uma zona de transição mais gradual, para proporcionar melhor suporte

à camada cementada. A zona de transição, devido à maior temperabilidade adquirida pelo aço em função da presença de elementos de liga, torna-se também mais resistente, o que favorece a desejada condição de melhor suporte da camada superficial endurecida.

Os aços-liga mais empregados na cementação são os tipos SAE 3100, 4100, 4600, 5100 e 6100, com teor de carbono máximo de 0,23%.

Como se pode deduzir, pelo exame dos Anexos relativos aos sistemas de classificação, os aços 3100 contêm níquel entre 1,10 e 1,40% e cromo entre 0,55 e 0,95%; os 4100, cromo entre 0,40 e 0,60% e molibdênio entre 0,08 e 0,15%; os 4600, níquel entre 1,65 e 2,00% e molibdênio entre 0,20 e 0,30%; os 5100, cromo entre 0,80 e 1,05% e os 6100, cromo entre 0,70 e 0,95%, com 0,10% mín. de vanádio.

Aplicações típicas desses aços são: engrenagens de transmissão de tratores, mancais antifricção, coroas, pinhões, pinos, engrenagens de diferencial, parafusos para veículos, eixos de comando de válvulas, eixos de bombas, engrenagens de redução, engrenagens de máquinas operatrizes etc.

Nos aços-liga acima, a soma total dos elementos de liga raramente ultrapassa 2,0%. Se se desejar valores ainda mais elevados para a resistência mecânica e a tenacidade do núcleo, importantes para condições de serviço mais críticas, aumenta-se o teor dos elementos de liga, de modo a que a soma total ultrapasse 2,0%.

Alguns desses aços típicos compreendem as classes SAE 2300, 3300, 4300 e 4800, com teor de carbono máximo de 0,23%.

Os tipos 2300 contêm níquel entre 3,25 e 3,75%; os 2500, níquel entre 4,75 e 5,25%; os 3300, níquel entre 3,25 e 3,75% e cromo entre 1,40 e 1,75%; os 4300, níquel entre 1,65 e 2,00%, cromo entre 0,40 e 0,60% e molibdênio entre 0,20 e 0,30% e, finalmente, os tipos 4800, níquel entre 3,25 e 3,75% e molibdênio entre 0,20 e 0,30%.

Suas aplicações são para os mesmos tipos de mecanismos dos aços anteriores, porém para serviços mais pesados, como em caminhões, tratores, ônibus, indústria aeronáutica etc.

5.7.2 **Aços para nitretação** O processo clássico de nitretação a gás exige a presença, nos aços a serem nitretados, dos elementos de liga alumínio, cromo e molibdênio e, eventualmente, níquel, porque esses são os elementos que facilitam a difusão do nitrogênio, que formam os nitretos e que produzem a camada superficial nitretada da espessura adequada.

O alumínio é adicionado em teores entre 0,85 e 1,20%, o cromo entre 0,90 e 1,80%, o molibdênio, entre 0,15 e 0,45%. O níquel, geralmente ausente, é, entretanto, adicionado quando se deseja um núcleo de dureza mais elevada. Sua quantidade variará de 3,25 a 3,95%.

O carbono nesses aços varia entre 0,30 e 0,45%, quantidade suficiente para conferir suporte adequado à camada nitretada que é muito dura e, geralmente, de pequena espessura.

Esses aços são conhecidos com o nome de "Nitralloy".(44)

Há um tipo de aço utilizado em nitretação de alto teor de carbono (entre 1,25 e 1,50%) e alto silício (entre 1,25 e 1,50%), com cromo (0,25% em média), alumínio (1,35% em média) e molibdênio (0,25% em média). Tal aço é chamado "grafítico" e apresenta uma parte do carbono no estado livre, sob a forma de grafita. Essa condição confere ao aço uma espécie de propriedade lubrificante, que se alia à superfície dura e resistente ao desgaste, com aparentes vantagens em certas aplicações, onde possam ser desenvolvidas temperaturas elevadas, como em mancais.

Como se sabe, os aços, depois de nitretados, estão prontos para ser utilizados; não há, em outras palavras, tratamento térmico posterior, como ocorre com a cementação.

Pelo processo de nitretação em banho de sal, praticamente qualquer tipo de aço pode ser tratado, desde os aços-carbono de baixo carbono até os aços-liga de alto teor em liga, como inoxidáveis, para moldes e matrizes etc.

5.8 **Aços para fins especiais** Serão considerados neste item alguns tipos de aços não incluídos nos itens anteriores, os quais possuem propriedades especiais e aplicações importantes na indústria em geral.

5.8.1 **Aços resistentes ao desgaste** A resistência ao desgaste dos metais depende do *acabamento da superfície metálica*, a qual deve apresentar-se sem rugosidade acentuada, de modo a eliminar depressões ou projeções que, no movimento típico ao desgaste metálico, produzem o arrancamento inicial de partículas; da *dureza*, a qual deve ser a mais elevada possível, para que uma parte da peça metálica resista à penetração inicial da projeção da outra parte, ambas ou uma só em movimento; da *resistência mecânica* e da *tenacidade* que, quanto mais elevadas, tanto mais dificultado ficará o arrancamento de partículas metálicas.

A rigor, a dureza é o fator mais importante, pois dela depende o início do desgaste. Além disso, é o fator metalúrgico que mais interessa na discussão dos aços resistentes ao desgaste.

Outro fator metalúrgico, entretanto, que deve ser igualmente considerado é a *estrutura* do aço, pois deve-se procurar produzir uma matriz relativamente mole com partículas duras uniformemente dispersas, geralmente de carbonetos.

Os mais famosos aços resistentes ao desgaste são os denominados "Hadfield", do tipo "manganês austenítico". Contêm alto teor de carbono – entre 1,00 e 1,40% – e alto teor de manganês – entre 10 e 14%.

Outros elementos de liga, tais como cromo, níquel e cobre, podem ser adicionados para melhorar a resistência ao desgaste abrasivo, ou seja, desgaste de metal contra uma substância não metálica: cromo entre 1,5 e 2,0%, cobre até 5% ou níquel em torno de 3,0%.

Os aços-manganês austeníticos, no estado fundido ou laminado, contêm carbonetos que conferem grande fragilidade ao material: alongamento e estrição às vezes inferiores a 1%. Sua resistência à tração, nesses estados, varia de 42 a 49 kgf/mm^2.

As propriedades mecânicas necessárias às condições de serviço são obtidas por um tratamento térmico que consiste em austenitização, à temperatura que assegure completa solução de carbonetos (em torno de 1.000°C), seguido de resfriamento muito rápido (em água). Consegue-se, assim, a retenção da estrutura austenítica e o aço fica estruturalmente caracterizado por apresentar uma matriz austenítica mole com carbonetos duros dispersos.

Nessa condição, o aço representa uma resistência à tração que varia de 57 a 100 kgf/mm^2, limite de escoamento entre 30 e 42 kgf/mm^2, dureza Brinell entre 180 e 220 e alta ductilidade, correspondente a um alongamento entre 30 e 60%.

A dureza, como se verifica pelos dados acima, é baixa; ela, entretanto, pouco significado tem, pois no momento em que o aço é colocado em serviço, ocorre um notável encruamento, com formação simultânea de alguma martensita, levando a dureza Brinell a valores entre 500 e 600.

Aplicações típicas de aços-manganês austeníticos em peças que exigem alta resistência ao desgaste: mandíbulas de britadores, moinhos de bolas, caçambas de dragas e de escavadeiras, bombas para trabalho em pedras e rochas, certos tipos de engrenagens, sapatas, pinhões, correntes transportadoras etc.

5.8.2 **Aços carbono-cromo** São aços empregados em esferas e roletes para mancais, pertencentes às classes SAE 50100, com 0,40 a 0,60% de cromo, SAE 51100, com 0,90 a 1,15% de cromo e SAE 52100 com cromo entre 1,30 a 1,60%. São temperados em óleo, podendo atingir durezas de 65 a 67 Rockwell C.

Os tipos 50100 são empregados para esferas até 12,7 mm (meia polegada) de diâmetro; os tipos 51100, em esferas até 25,4 mm (uma polegada) e os tipos 52100 em esferas de diâmetro superior a uma polegada.

5.8.3 **Aços ultra-resistentes** São aços que, quando inicialmente desenvolvidos, destinavam-se ao emprego em componentes de aviões, mísseis e aplicações semelhantes, onde se exigem limites de resistência à tração acima de 200 kgf/mm^2.

Sob o ponto de vista metalúrgico, o aumento de resistência mecânica é, como se sabe, conseguido pelo aumento do teor de carbono, de modo a ter-se maior proporção de perlita na estrutura e pela introdução de elementos de liga que formem uma solução sólida com a ferrita, endurecendo-a. Esses elementos de liga são, entre outros, o manganês, o níquel, o cromo, o molibdênio, o vanádio, o cobre e o boro.

O refino do grão da ferrita também contribui para melhorar a resistência mecânica. Adições de alumínio, nitrogênio e nióbio produzem esse efeito.

Nos aços ultra-resistentes, o carbono é, entretanto, mantido em teores relativamente baixos. A presença simultânea de vários elementos de liga, mesmo em pequenas quantidades, aumenta o número de carbonetos presentes e aumenta a temperabilidade do aço. Desse modo, se este for convenientemente temperado e revenido, seu limite de resistência à tração pode atingir valores da ordem de 140 kgf/mm^2, com dureza Brinell entre 320 e 400.

Elevando o teor de carbono para 0,30 a 0,40% e diminuindo a temperatura de revenido – para 200 a 230°C –, consegue-se atingir valores de limite de resistência à tração próximos de 200 kgf/mm^2.

Os aços ultra-resistentes podem ser agrupados nas três categorias seguintes:[45]

a) grupo de carbono relativamente baixo, semelhante ao tipo AISI ou SAE 4330, contendo cromo e molibdênio e com adições crescentes de vanádio e molibdênio; o limite de resistência à tração no estado temperado e revenido varia de 154 a 168 kgf/mm^2;

b) grupo com silício relativamente elevado – de 1,0 a 2,0% –, com teores crescentes de carbono e cromo. Esses aços podem apresentar valores de limite de resistência à tração entre 168 e 182 kgf/mm^2;

c) grupo com médio carbono, semelhante ao tipo AISI 4340, com 0,40% de carbono, contendo cromo, níquel e molibdênio; com adição de silício e vanádio e revenido conveniente, pode-se obter limites de resistência à tração entre 182 e 210 kgf/mm^2.

Entre as aplicações desses aços, pode-se citar componentes de aviões, como, por exemplo, parafusos, pinos e acessórios diversos.

Para empregos em que as temperaturas de serviço são mais elevadas, o cromo é aumentado para cerca de 5,0%, o molibdênio para cerca de 1,50% e o vanádio entre 0,40 e 1,00%.

As aplicações, nesse caso, incluem componentes gerais de aviões, como engrenagens de trens de aterrisagem, além de eixos, parafusos, pinos, molas e outros componentes.

Finalmente, um outro tipo de aço ultra-resistente é o denominado "maraging", cujo limite de resistência à tração pode aproximar-se de 280 kgf/mm^2.

Os aços "maraging" caracterizam-se por possuir baixo carbono (0,03% máx.), baixos manganês, silício, fósforo e enxofre (0,10% para Mn e Si e 0,01% para P e S) e alto teor de níquel (entre 17 e 26%), titânio entre 0,5 e 1,6%), alumínio (entre 0,15 e 1,00%), podendo ainda conter cobalto (entre 7 e 1,25%) e nióbio (entre 0,30 e 0,50%).

Esses aços são submetidos a um tratamento térmico chamado "maraging", o qual consiste num "endurecimento por precipitação". Os aços são aquecidos entre 590° e 700°C e, em seguida, resfriados: o resultado é uma estrutura do tipo da martensítica, apesar do carbono muito baixo, com uma matriz constituída de uma solução sólida de níquel no ferro alfa. Ao serem reaquecidos entre 425° e 510°C, ocorre o endurecimento por precipitação e apreciável aumento da resistência mecânica. Admite-se que o endurecimento seja devido à precipitação de fases intermetálicas contendo níquel, molibdênio, titânio e, eventualmente, ferro.

5.8.4 **Aços grafíticos** Devido a sua usinabilidade, esses aços são utilizados em matrizes para conformação a frio, em buchas, cames, calibres, entre outras aplicações. Caracterizam-se por alto teor de carbono (1,30 a 1,50%), alto silício (até 1,20%) e, eventualmente, níquel, tungstênio e molibdênio. São temperados em água, ar ou óleo.

Os altos teores de carbono e silício promovem a formação de carbono livre, em forma de grafita, cujas partículas correspondem a descontinuidades, que tornam excelente a usinabilidade do material.

5.8.5 **Aços criogênicos** São aços utilizados a temperaturas abaixo da ambiente.

Entre −40° a −50°C, os aços-carbono de baixo carbono são satisfatórios, porém às temperaturas que ocorrem em equipamentos para transporte e conservação de gases liquefeitos e que podem chegar a −250°C (para o hidrogênio líquido), é necessário levar em conta o fenômeno de "temperatura de transição".

A Figura 51[46] representa a temperatura de transição ou seja a transição de fratura dúctil para fratura frágil de alguns aços-liga, em função da temperatura e da resistência ao choque Charpy em kgf.m/cm^2. Nota-se que os aços tipo SAE 4300, com 1,82% de níquel; 0,50 a 0,80% de cromo e 0,25% de molibdênio são os mais satisfatórios.

Na prática, procura-se manter o carbono baixo e aumentar o teor de níquel. Por exemplo, um aço com 0,17% de carbono, 0,15 a 0,30% de

silício, 0,30 a 0,60% de manganês, P e S máximos de 0,035% e níquel entre 4,5 e 5,0%, no estado normalizado e posteriormente revenido, apresenta a −80°C uma resistência ao choque que é ainda de 10 kgf.m/cm² e a −100°C de 8 kgf.m/cm².

À medida que aumenta o teor de níquel, pode-se empregar o aço a temperaturas paulatinamente mais baixas: com 9% de níquel, a temperatura de emprego pode ser em torno de −190°C.

6 — Conclusões A Tabela 14[37] dá uma indicação dos empregos usuais de alguns tipos de aços-ligas de baixo teor em liga, em função de alguns de seus característicos.

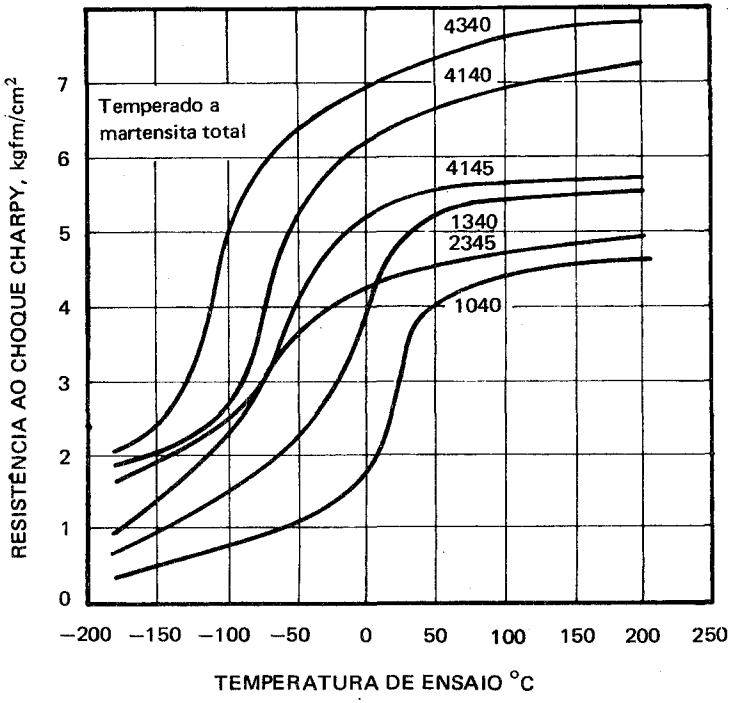


Figura 51 *Transição fratura dúctil — fratura frágil para alguns aços-liga.*

TABELA 14

CARACTERÍSTICOS E EMPREGOS TÍPICOS DE ALGUNS AÇOS-LIGA DE BAIXO TEOR EM LIGA

Tipo de aço	Característicos	Empregos típicos
Médio Mn (1,75% Mn)	Resistência e trabalhabilidade	Equipamento para exploração de madeira, agricultura e construção de estradas
Ao cromo (0,95% Cr)	Resistência e trabalhabilidade	Molas, lâminas de corte, ferramenta p/usinagem de madeira
Ao níquel (3,5% Ni e 0,30%C)	Tenacidade	Brocas de mineração, peças de marteletes a ar comprimido, virabrequins
Ao C-V (0,50 C-0,18V)	Resistência ao choque	Peças de locomotivas
Ao C-Mo (0,68 Mo e 0,20 C)	Resistência ao calor	Corpos de caldeiras, equipamento de alta pressão de vapor
Alto Si (4,0 Si)	Eficiência elétrica	Transformadores, motores, geradores
Ao Si-Mn (2,0 Si e 0,75 Mn)	Elasticidade	Molas de automóveis e vagões
Ao Cr-Ni (0,60 Cr e 1,25 Ni)	Superfície prontamente endurecível	Engrenagens de automóveis, pinhões, pinos de pistão, transmissões
Ao Cr-V (0,95 Cr e 0,18 V)	Resistência e dureza	Engrenagens de automóveis, eixos de hélices, bielas
Ao Cr-Mo (0,95 Cr e 0,20 Mo)	Resistência à fadiga, choque e calor	Forjados para aviões, fuselagens de aviões
Ao Ni-Mo (1,75 Ni e 0,35 Mo)	Resistência à fadiga	Mancais de rolamento para vagões, engrenagens de transmissão de automóveis
Ao Mn-Mo (1,30 Mn e 0,30 Mo)	Resistência ao choque e à fadiga	Caçambas de dragas, britadores de pedra, peças de turbina
Ao Ni-Cr-Mo (1,75 Ni, 0,65 Cr e 0,35 Mo)	Resistência à torção	Virabrequins de motores Diesel

CAPÍTULO XI

FERRO FUNDIDO, FERRO MALEÁVEL, FERRO NODULAR

1 – Introdução As ligas ferro-carbono com teor de carbono superior a 2% correspondem, como se sabe, aos ferros fundidos. Pelos seus característicos peculiares, esses materiais são muito importantes para o engenheiro mecânico. Mesmo os tipos mais comuns e tradicionais encontram um grande campo de aplicação. Por outro lado, o aperfeiçoamento dos métodos de fabricação e de controle de qualidade, a introdução de elementos de liga, a aplicação de tratamentos térmicos e, finalmente, o desenvolvimento do ferro fundido nodular, ampliaram as possibilidades de emprego desses materiais, de modo a tornar o seu conhecimento fundamental para o engenheiro mecânico e o engenheiro industrial.

O diagrama de equilíbrio Fe-C, ou seja, o de natureza binária, já foi estudado e já foram discutidos os microconstituintes estruturais que se formam por resfriamento lento, na faixa de composições correspondentes aos ferros fundidos.

O elevado teor de carbono dessas ligas e a presença sempre obrigatória do elemento silício tornam, entretanto, necessário considerá-las como ligas, ternárias Fe-C-Si, de modo que os fenômenos de transformação da austenita, no resfriamento lento, são mais complexos, originando estruturas em que um novo constituinte se apresenta – carbono livre ou grafita – cuja forma, disposição e quantidade alteram profundamente as propriedades desses materiais.

Um dos efeitos do silício é modificar a composição do eutético, que no diagrama de equilíbrio binário corresponde a 4,30% de carbono. Por exemplo, com 2,30% de silício, o ponto eutético situa-se cerca de 3,60%

de carbono; com 3,50% de silício, o teor do eutético é deslocado para cerca de 3,20% de carbono.

Para estudar o efeito do silício nas transformações estruturais, utiliza-se o conceito "carbono equivalente", representado pela fórmula

$$C.E. = \%C + 1/3\,(\%Si + \%P)$$

a qual também considera o efeito do fósforo.

Desprezando-se inicialmente o efeito deste último elemento, ter-se-á:

$$C.E. = \%C + 1/3(\%Si),$$

ou seja, o efeito do silício corresponde a um terço do efeito do carbono. Exemplificando: para uma liga com 2,30% de silício, o eutético corresponde, como já se mencionou, a 3,6% de carbono; aplicando-se a fórmula, temos:

$C.E. = 3{,}6 + 2{,}30/3 = 4{,}30\%$ aproximadamente, o que significa que a liga com 3,60% de carbono e 2,30% de silício comporta-se como a liga eutética.

Pelo exposto, a *composição química* é um dos fatores mais importantes para determinar a estrutura dos ferros fundidos.

Analisando um pouco mais profundamente o efeito dos vários elementos, têm-se:

– *carbono* – como nos aços, é o elemento de liga básico; determina, obviamente, a quantidade de grafita que pode se formar;

– *silício* – é o elemento grafitizante por excelência, ou seja, favorece a decomposição do carboneto de ferro; sua presença, independentemente do teor de carbono, pode fazer um ferro fundido tender para o tipo "cinzento" ou para o tipo "branco";

– *manganês* – tem efeito oposto ao do silício, isto é, tende a estabilizar a cementita e contrabalança, de certo modo, o efeito do silício; além disso, o manganês atua, como se sabe, como elemento dessulfurante;

– *fósforo* – também estabiliza a cementita; sua principal ação é formar um composto de natureza eutética – carboneto de ferro e fosfeto de ferro – de aparência branca e perfurada, chamado "steadita";

– *enxofre* – nos teores normais, não tem ação significativa.

Sob o ponto de vista de *velocidade de resfriamento*, a sua influência é relacionada com a espessura das peças que solidificam no interior dos

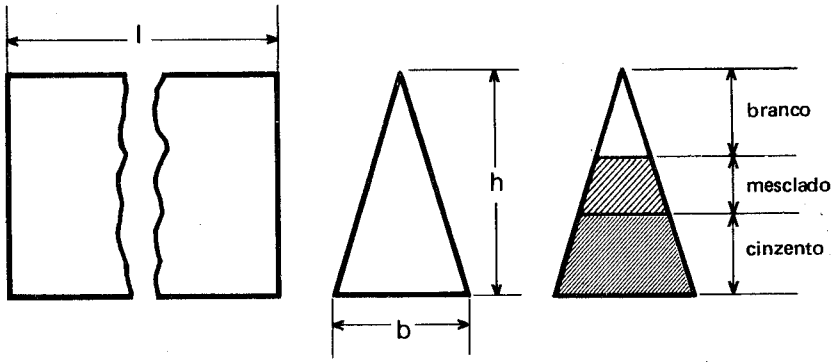
moldes. Em outras palavras, pequenas seções significam velocidades de resfriamento mais elevadas que seções espessas.

Com alta velocidade de resfriamento – correspondentes às seções mais finas e ao contato com as paredes dos moldes, sobretudo no caso de moldes metálicos – originam-se as chamadas "seções coquilhadas", em que houve pouca ou nenhuma decomposição da cementita. Esse fato leva ao aparecimento, nessas seções, de ferro fundido branco.

Ao contrário, nas seções espessas, dá-se tempo suficiente para a decomposição da cementita, ocorrendo então a grafitização: um ferro fundido, nessas condições, apresentará uma fratura escura, devido à presença de carbono livre e corresponderá ao ferro fundido cinzento, ao contrário do anterior, cuja fratura será branca pela quase total ausência de grafita.

Os dois fatores mais importantes, sob o ponto de vista de estrutura do ferro fundido, são, pois, o teor de silício e a velocidade de resfriamento.

A influência desses dois fatores pode ser facilmente verificada na prática, por intermédio de um ensaio que o próprio fundidor executa e que consiste na verificação da tendência de grafitização do material, empregando um corpo de prova de forma e dimensões padronizadas, chamado "cunha de coquilhamento", indicada esquematicamente na Figura 52.[47]



Base b = 6 a 76,2 mm; altura h = 11,1 a 215,9 mm
comprimento l = 57,1 a 203 mm

Figura 52 *Cunha de coquilhamento, em que as dimensões variam conforme está indicado. O tempo necessário para realizar o ensaio varia de 35 segundos para a menor cunha, até 10 minutos para a maior.*

Esse corpo de prova é moldado em molde metálico e vazado durante a fundição do material ou pouco antes do vazamento deste nos moldes. Após alguns segundos ou minutos, dependendo das dimensões da cunha, ele estará inteiramente solidificado e em condições de ser quebrado para verificação da fratura.

Desse modo, o fundidor tem um método prático e eficiente de controlar a grafitização do ferro fundido e corrigir em tempo as cargas do forno de fundição, pela adição de elementos grafitizantes ou estabilizadores.

A estrutura dos ferros fundidos, em resumo, apresentará os constituintes que estão normalmente presentes nos aços – ferrita, perlita e cementita – com maior ou menor quantidade de grafita livre, na forma de veios, dependendo da composição química e das condições de resfriamento.

Na realidade, outros fatores podem influir nos característicos de grafitização dos ferros fundidos: são eles a "inoculação" e o "superaquecimento".

A "inoculação" consiste na adição de um material no metal quando ainda está no estado líquido, no próprio forno ou na panela de fundição, pouco antes do vazamento nos moldes ou no jorro de metal líquido, quando este passa do forno para a panela de fundição. Os "inoculantes" adicionados são grafita, silício metálico, ferro-silício, silicieto de cálcio, Ca-Si, Ca-Si-Ti, Si-Ba, Si-Césio, Si-terras raras, Cr-Si, silicieto de cromo etc.

A sua ação, dependendo do tipo, faz-se no sentido de aumentar a tendência à grafitização, melhorar a tendência à formação de estruturas mais finas e uniformes e possibilitar a obtenção de ferros fundidos cinzentos de melhores propriedades mecânicas.

O "superaquecimento" consiste em elevar a temperatura do metal líquido a valores mais altos, o que provoca, no resfriamento subseqüente, o início da grafitização a temperaturas mais baixas, favorecendo a formação de veios menores e mais finos de grafita.

Na presente obra, serão considerados os seguintes tipos de ferros fundidos:

- ferro fundido branco
- ferro fundido cinzento
- ferro maleável
- ferro nodular.

2 – **Ferro fundido branco** Este ferro fundido é assim chamado porque, devido a apresentar o carbono quase inteiramente combinado na forma de Fe_3C, mostra uma fratura branca.

Suas propriedades básicas são: elevadas dureza e resistência ao desgaste, o que, em conseqüência, os torna difíceis de usinar, mesmo com os melhores materiais de corte.

Para a produção do ferro fundido branco, deve-se combinar os dois fatores fundamentais que determinam a maior ou menor decomposição da cementita: composição química (teores de carbono e silício, este último principalmente) e velocidade de resfriamento.

A velocidade de resfriamento é controlada pelo emprego do sistema de coquilhamento em que os moldes são metálicos, chamados "coquilhas".

Na produção de ferros fundidos brancos, tem sido utilizada a técnica de adição de alguns elementos de liga, entre os quais os seguintes:

– níquel, cromo e molibdênio – isolados ou em combinação, para aumentar a resistência ao desgaste.[48] Eles regulam a profundidade de coquilhamento, ou seja, a profundidade da camada branca, visto que, no centro das peças, onde a velocidade de resfriamento é menor, a tendência é ocorrer uma certa grafitização. O cromo é, normalmente, adicionado em teores até 4%. Acima disso, por exemplo, entre 12 e 35%, além de aumentar a resistência ao desgaste, o cromo torna os ferros fundidos brancos resistentes à corrosão e à oxidação a altas temperaturas.

O níquel, quando adicionado, pode ir até teores de 4 ou 5%, o que produz uma estrutura martensítica, aumentando a dureza Brinell para cerca de 730.

O molibdênio tem um efeito correspondente a um terço do cromo e o objetivo inicial, na sua adição em pequenas quantidades (0,25 a 0,75%), é melhorar a resistência da superfície coquilhada ao lascamento e trincamento pelo calor e à corrosão localizada.

O vanádio pode também ser adicionado, usualmente em teores não superiores a 0,50%, para estabilizar o carboneto, aumentando a profundidade de coquilhamento, além de refinar a estrutura.

As peças coquilhadas são geralmente submetidas a um tratamento térmico para alívio das tensões que se originam nas diversas velocidades de resfriamento e, portanto, de solidificação, nas várias seções das peças. Além disso, uniformiza-se a estrutura dendrítica, típica de peças fundidas.

O aquecimento é levado a efeito a temperaturas relativamente elevadas – entre 815° e 870°C – durante tempos relativamente longos, de várias horas, dependendo da temperatura, seguido de resfriamento muito lento, pelo menos até cerca de 650°C.

Devido a suas características mecânicas, o ferro fundido branco é empregado, entre outras, nas seguintes aplicações:

– revestimento de moinhos – algumas composições típicas são as seguintes:

C_t – 2,90%, Si – 0,50% e Mn – 0,50%

C_t – 3,20%, Si – 0,50%, Mn – 0,60%, Cr – 2,00% e Ni – 4,50%

C_t – 3,25%, Si – 0,60%, Mn – 0,70%, Cr – 15,00% e Mo – 3,00%

com dureza e resistência ao desgaste crescentes;

– bolas para moinhos de bola – algumas composições típicas são as seguintes:

C_t – 2,80%, Si – 0,30%, Mn – 0,40%

C_t – 3,20%, Si – 0,60%, Mn – 0,50% e Cr – 2,00%

C_t – 3,20%, Si – 0,50%, Mn – 0,30%, Cr – 1,40% e Ni – 3,50%.

Outras aplicações incluem cilindros de laminação para borracha, vidro, linóleo, plásticos e metais, rodas de vagões, peças empregadas em equipamento para britamento de minérios, moagem de cimento etc.

3 – Ferro fundido cinzento Esta liga Fe-C-Si, pela sua fácil fusão e moldagem, excelente usinabilidade, resistência mecânica satisfatória, boa resistência ao desgaste e boa capacidade de amortecimento, é, dentre os ferros fundidos, a mais usada.

A faixa de composição dos ferros fundidos cinzentos está compreendida entre os seguintes teores:

C_t – 2,50 a 4,00%
Si – 1,20 a 3,00%
Mn – 0,30 a 1,00%
P – 0,10 a 1,00%
S – 0,05 a 0,25%.

A ASTM agrupa os ferros fundidos nos tipos apresentados na Tabela 15. Os números das classes correspondem aos limites de resistência à tração, em lb/pol^2 ou seja classe 20 = 20.000 lb/pol^2 ou 14,0 kgf/mm^2, classe 25 = 25.000 lb/pol^2 ou 17,5 kgf/mm^2 e assim em seguida.

TABELA 15

CLASSES DE FERRO FUNDIDO CINZENTO SEGUNDO A ASTM

Classe ASTM	Composição química, %				
	C	Si	Mn	P	S
20	3,10/3,80	2,20/2,60	0,50/0,80	0,20/0,80	0,80/0,13
25	3,00/3,50	1,90/2,40	0,50/0,80	0,15/0,50	0,08/0,13
30	2,90/3,40	1,70/2,30	0,45/0,80	0,15/0,30	0,08/0,12
35	2,80/3,30	1,60/2,20	0,45/0,70	0,10/0,30	0,06/0,12
40	2,75/3,20	1,50/2,20	0,45/0,70	0,07/0,25	0,05/0,12
50	2,55/3,10	1,40/2,10	0,50/,080	0,07/0,20	0,06/0,12
60	2,50/3,00	1,20/2,20	0,50/1,00	0,05/0,20	0,05/0,12

A Tabela 16[47] representa as sete classes de ferros fundidos cinzentos segundo a norma alemã DIN. Na Tabela estão especificadas as propriedades mecânicas correspondentes, assim como é indicada a variação esperada da estrutura resultante.

No sistema ABNT, por sua vez, os ferros fundidos cinzentos são designados por FC (ferro fundido cinzento) e por algarismos indicativos dos limites mínimos de resistência à tração. A Tabela 17 representa as classes ABNT.

As classes FC-10 e FC-15, pelas excelentes fusibilidade e usinabilidade, são indicadas, principalmente a FC-15, para bases de máquinas, carcaças metálicas etc.

As classes FC-20 e FC-25 aplicam-se em elementos estruturais de máquinas operatrizes, tais como barramentos, cabeçotes, mesas etc.

As classes FC-30 e FC-35, devido a sua maior resistência mecânica e maior dureza, aplicam-se em engrenagens, pequenos virabrequins, bases pesadas e colunas de máquinas, buchas grandes, blocos de motor etc.

Finalmente a classe FC-40, de maior resistência entre todas as classes, possui elementos de liga, como níquel, cromo e molibdênio. Face à sua maior tendência à formação de camada coquilhada, seu emprego é feito em peças de espessura média a grande.

Um fator a considerar quando se especifica ferro fundido cinzento é o que relaciona as propriedades mecânicas com a seção das peças. Isso porque, para quantidades fixas de carbono total e silício, a resistência diminui à medida que aumenta a espessura ou seção das peças.

TABELA 16

PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS FERROS FUNDIDOS CINZENTOS, SEGUNDO A NORMA DIN

	GG-10	GG-15	GG-20	GG-25	GG-30	GG-35	GG-40
Limite de resistência à tração, kgf/mm²	10	15	20	25	30	35	40
Limite de resistência à flexão, kgf/mm²	20/31	23/37	29/43	35/44	41/55	47/61	53/67
Resistência à compressão, kgf/mm²	50/60	57/70	60/83	70/100	82/120	95/140	110/140
Dureza Brinell	140/190	170/210	186/240	200/260	210/280	210/281	230/300
Módulo de elasticidade, 10^3 kgf/mm²	7,5/10	8/10,5	9/11,5	10,5/12	11/14	12,5/14,5	12,5/15,5
Limite de fadiga, kgf/mm²	0,35 a 0,50 do limite de resistência à tração						
Estrutura	ferrítica ← → perlítica						

TABELA 17

CLASSES DE FERROS FUNDIDOS CINZENTOS SEGUNDO A ABNT

Classe	Diâmetro da barra de ensaio		Limite de resistência à tração (mín.) kgf/mm²	Dureza Brinell (valores máximos)	Resistência à flexão estática (valores médios) kgf/mm²
	D, mm (no estado bruto de fusão)	d, mm (usinada)			
FC10	30	20	10	201	–
FC15	13	8	23	241	34
	20	12,5	18	223	32
	30	20	15	212	30
	45	32	11	201	27
FC20	13	8	28	255	41
	20	12,5	23	235	39
	30	20	20	223	36
	45	32	16	217	33
FC25	13	8	33	269	–
	20	12,5	28	248	46
	30	20	25	241	42
	45	32	21	229	39
FC30	20	12,5	33	269	–
	30	20	30	262	48
	45	32	26	248	45
FC35	20	12,5	38	–	–
	30	20	35	277	54
	45	32	31	269	51
FC40	30	20	40	–	60
	45	32	36	–	57

Assim sendo, para peças finas, o carbono e o silício podem apresentar maiores teores e para peças mais espessas, a quantidade desses elementos deve ser reduzida, sob pena de queda da dureza e do limite de resistência à tração.

Tomando-se como exemplo a classe ASTM-25, para manter-se um limite de resistência à tração entre 18 e 21,5 kgf/mm² e dureza entre 160 e 220, os teores de carbono e silício devem situar-se, conforme a espessura das peças, dentro dos seguintes limites:

– peças finas, até 13 mm de espessura

C_t – 3,30 a 3,50%
Si – 2,20 a 2,40%

– peças médias, de 13 a 25 mm de espessura

C_t – 3,20 a 3,40%
Si – 2,20 a 2,40%

– peças grossas, com espessura acima de 25 mm

C_t – 3,00 a 3,20%
Si – 1,90 a 2,20%

Outras aplicações dos ferros fundidos cinzentos, além das mencionadas, incluem: anéis de pistão, produtos sanitários, tampas de poços de inspeção, tubos, conexões, carcaças de compressores, rotores, pistões hidráulicos, engrenagens, eixos de comando de válvulas, virabrequins e inúmeros outros tipos de peças utilizadas praticamente em todos os setores industriais.

A prática de adicionar-se elementos de liga no ferro fundido cinzento está se tornando comum, com o objetivo precípuo de melhorar a resistência mecânica.

Nesse sentido, os elementos mais eficientes são o cromo, o molibdênio e o vanádio, devido a sua tendência a estabilizar os carbonetos.

O níquel, ao contrário, é elemento grafitizante; por essa razão, é raras vezes empregado isoladamente.

Outro elemento de tendência grafitizante é o cobre; mesmo assim, em teores até 2% contribui para melhorar o limite de resistência à tração.

Dadas as importantes aplicações do ferro fundido cinzento na indústria automobilística, a SAE agrupou esse material em cinco classes, conforme mostra a Tabela 18.[49]

TABELA 18

COMPOSIÇÕES BÁSICAS E PROPRIEDADES MECÂNICAS DE FERROS FUNDIDOS PARA VEÍCULOS AUTOMOTORES

Classe SAE	Ct	Mn	Si	P	S	Dureza Brinell	Carga transv. mín. kgf	Deflexão mín. mm	Resist. à tração kgf/mm²
G-1800(a)	3,4/3,7	0,5/0,8	2,8/2,3	0,15	0,15	187 máx.	780	3,6	12,6
G-2500(a)	3,2/3,5	0,6/0,9	2,4/2,0	0,12	0,15	170/229	910	4,3	17,5
G-3000(b)	3,1/3,4	0,6/0,9	2,3/1,9	0,10	0,15	187/241	1000	5,1	21,0
G-3500(b)	3,0/3,3	0,6/0,9	2,2/1,8	0,08	0,15	207/255	1100	6,1	24,5
G-4000(b)	3,0/3,3	0,7/1,0	2,1/1,8	0,07	0,15	217/269	1180	6,9	28,0

Nota: (a) microestrutura ferrítica-perlítica
(b) microestrutura martensítica

Se o carbono ou o silício estão do lado mais elevado da faixa de composições, o outro elemento deverá situar-se no lado mais baixo.

As aplicações correspondentes são as seguintes:

– classe G 1800 – peças fundidas miscelâneas (no estado fundido ou recozido), onde a resistência mecânica não é o requisito principal;

– classe G 2500 – pequenos blocos de cilindro, cabeçotes de cilindro, cilindros resfriados a ar, pistões, discos de embreagem, carcaças de bombas de óleo, caixas de transmissão, caixas de engrenagem, tambores de freio para serviço leve; também para tambores de freio e discos de embreagem para serviço moderado, onde o alto teor de carbono minimiza o efeito desfavorável do calor;

– classe G 3000 – blocos de cilindro de automóveis e motores Diesel, cabeçotes de cilindro, volantes, pistões, tambores de freio e caixas de transmissão de tratores para serviço médio;

– classe G 3500 – blocos de motores Diesel, blocos e cabeças de cilindro de caminhões e tratores, volantes pesados, caixas de transmissão de tratores, caixas de engrenagens pesadas; também para tambores de freio e discos de embreagem para serviço pesado, onde se exige alta resistência mecânica e à fadiga térmica;

– classe G 4000 – peças fundidas para motores Diesel, cilindros, camisas de cilindro, pistões e eixos de comando de válvulas.

Um ferro fundido contendo em média 3,00% de carbono total, 2,20% de silício, 1,05% de manganês, 2,60% de níquel, 0,30% de cromo, 0,90% de molibdênio – do tipo considerado de baixo teor em liga – pode apresentar um limite de resistência à tração de 25 kgf/mm² e uma dureza Brinell correspondente a 350.

A introdução de elementos de liga em teores elevados produz característicos especiais como resistência à corrosão e ao calor.

Ferros fundidos resistentes à corrosão são tipicamente de alto silício, de alto cromo ou de alto níquel. Os mais conhecidos são os ferros fundidos *austeníticos Ni-Resist.* (50)

Um dos tipos empregados apresenta a seguinte composição:

C_t – 3,00% máx.
Si – 1,00 a 2,50%
Mn – 0,80 a 1,50%
Ni – 18,00 a 22,00%
Cu – 0,50% máx.
Mo – 1,75 a 2,50% máx.

Ferros fundidos resistentes ao calor são de médio silício, alto cromo, alto níquel, ao Ni-Cr-Si e ao alumínio[51]. O tipo ao Ni-Cr-Si, por exemplo, apresenta a seguinte faixa de composição e propriedades:

C_t – 1,80 a 2,60%
Si – 5,00 a 6,00%
Mn – 0,40 a 1,00%
Ni – 13,00 a 43,00%
Cr – 1,80 a 5,50%
Cu – 10,00% máx.
Mo – 1,00% máx.
limite de resistência à tração – 14,0 a 31,5 kgf/mm²
dureza Brinell – 110 a 210
resistência à ruptura transversal
carga – 820 a 1130 kgf
deflexão – 7,5 a 35,5 mm
resistência ao choque – 11,0 a 20,7 kgf.m

Esses ferros fundidos podem ser empregados até temperaturas da ordem de 950°C.

Os ferros fundidos cinzentos são submetidos usualmente ao tratamento térmico de "alívio de tensões" ou "envelhecimento artificial", para eliminar as tensões internas devidas às diferenças nas velocidades de resfriamento nas diversas seções, durante a solidificação, ocasionando contrações não uniformes.

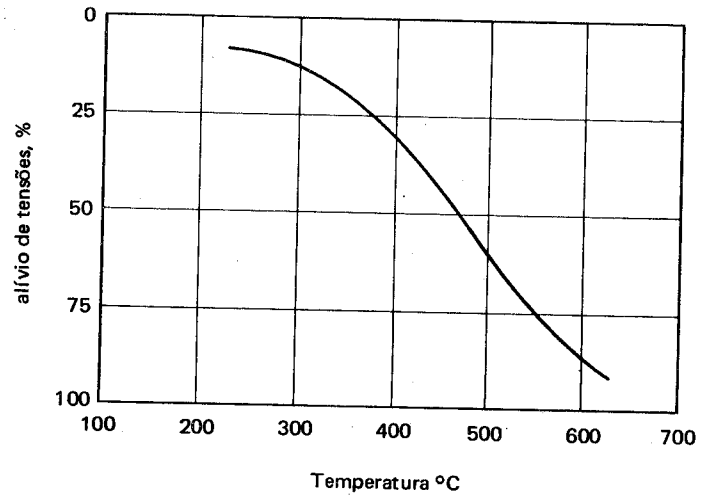


Figura 53 *Efeito da temperatura sobre a quantidade de tensões aliviadas.*

As Figuras 53 e 54[52] mostram, respectivamente, o efeito da temperatura e do tempo à temperatura sobre a quantidade de tensões internas aliviadas.

De um modo geral, as temperaturas recomendadas para alívio de tensões são as seguintes:

– ferro fundido cinzento comum – 500° a 565°C
– ferro fundido de baixo teor em liga – 565° a 600°C
– ferro fundido de alto teor em liga – 600° a 650°C

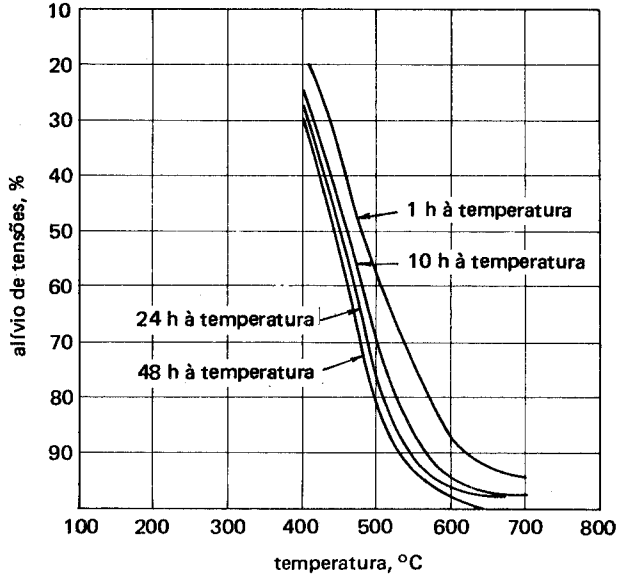


Figura 54 *Efeito do tempo à temperatura no tratamento de alívio de tensões.*

O "recozimento" dos ferros fundidos cinzentos tem por objetivo melhorar a usinabilidade do material, devendo, para isso, o aquecimento ser levado a temperaturas entre 700° e 900°C, com o que se aliviam igualmente as tensões internas. O resfriamento subseqüente é, em geral, lento até cerca de 550°C.

As temperaturas maiores são empregadas em ferros fundidos ligados.

A "normalização" é empregada para melhorar as propriedades mecânicas de resistência e dureza, do mesmo modo que a "têmpera e o revenido", embora estas duas últimas operações não sejam ainda muito comuns.

Finalmente, pode-se provocar o "endurecimento superficial" do ferro fundido cinzento, comum ou ligado, por chama ou indução, de modo a aumentar-se a resistência ao desgaste. O limite de fadiga também é melhorado por esse tratamento.

4 – **Ferro maleável** Esse tipo de ferro fundido resulta de um ferro fundido branco, de composição adequada, o qual é sujeito a um tratamento térmico especial, de longa duração, chamado "maleabilização".

Após o tratamento, o material que, no estado original é muito frágil, adquire ductilidade ou maleabilidade – donde o seu nome – e torna-se mais tenaz.

As melhores ductilidade e tenacidade, aliadas às boas propriedades de resistência à tração, resistência à fadiga, resistência ao desgaste e usinabilidade, tornam o material recomendável para muitas e importantes aplicações industriais.

Existem dois processos generalizados de "maleabilização": o processo europeu ou maleabilização por descarbonetação e o processo americano ou maleabilização por grafitização.

O *processo europeu ou por descarbonetação* origina um maleável chamado *tipo europeu* ou de *núcleo branco*, devido ao aspecto característico da sua fratura, cuja estrutura é constituída essencialmente de ferrita.

De fato, sendo esse um processo de descarbonetação, levado a efeito em meio oxidante, o carbono de ferro fundido tende a ser eliminado. Convém ressaltar que o aspecto mencionado da fratura metálica só se revela em paredes finas (5 a 6 mm); em peças mais espessas, aparece um núcleo mais escuro; ou seja, somente a periferia sofre a ação mais intensa de oxidação do carbono ou descarbonetação.

O ferro fundido branco inicial tem a seguinte composição química:

C_t – 3,00 a 3,50%
Si – 0,45 a 0,75%
Mn – 0,10 a 0,40%
S – 0,20 a 0,45%
P – 0,15% máx.

As peças fundidas a partir desse material são colocadas em caixas fechadas, envoltas em um meio oxidante, constituído de minério de ferro e submetidas ao *ciclo de maleabilização*, em que, num determinado período, o material é aquecido entre 900° e 1.000°C, portanto bem acima da temperatura de transformação.

Nesse período, ocorre descarbonetação intensa, ao mesmo tempo que no núcleo de peças espessas pode ocorrer grafitização, pela decomposição da cementita livre do ferro fundido branco.

A seguir, o material começa a ser resfriado muito lentamente, de modo que no período de tempo de manutenção do material na faixa entre 900°C (ou 1.000°C) e 700°C, ocorrem ainda algumas reações, como grafitização, diretamente da austenita.

Num último período, de resfriamento ainda lento, a partir de 700°C, forma-se perlita, caso exista ainda carbono combinado.

As estruturas que o maleável europeu ou branco apresentam usualmente são as seguintes:(53)

– peças até cerca de 5 mm de espessura – ferrita somente;

– peças de maior espessura – ferrita nas camadas superficiais e grafita, em nódulos arredondados, sobre uma matriz de ferrita (às vezes com certa quantidade de perlita), na parte central.

A presença somente de ferrita ou ferrita mais perlita mais grafita em nódulos é que confere o característico de maleabilidade a esses materiais.

O *processo americano* ou *maleabilização por grafitização* origina o *maleável tipo americano* ou de *núcleo preto*, cuja fratura tem aspecto escuro, donde a denominação; é, esse material, constituído essencialmente de grafita em nódulos sobre uma matriz ferrítica.

O ferro fundido branco original apresenta a seguinte faixa de composições:(51)

carbono combinado – 2,20 a 2,80%
silício – 0,90 a 1,60%
manganês – 0,50% máx.
enxofre – 0,10% máx.
fósforo – 0,20% máx.

O processo consiste essencialmente em aquecer-se peças fundidas a partir desse ferro fundido, a temperaturas acima da zona crítica – em torno de 950°C – numa atmosfera neutra, para o que as peças são colocadas em caixas de ferro fundido, envoltas em areia, cinzas ou outro material inerte.

O ciclo de maleabilização é mais curto que no maleável europeu.

Num primeiro estágio, aquecimento em torno de 950°C, ocorre a grafitização da cementita, da austenita; o segundo estágio é levado a efeito a temperaturas em torno de 735°C, durante um tempo mais longo que o do primeiro estágio, ocorrendo a grafitização da cementita e da perlita.

Existe um ciclo de *maleabilização rápida*, em que as temperaturas dos dois estágios são mais elevadas.

O boro, em teores de 0,003%, favorece ciclos mais curtos de maleabilização.

O maleável é, por vezes, considerado um material intermediário entre o aço e o ferro fundido cinzento, pois, além de apresentar os característicos fundamentais desta última liga, com excelente usinabilidade, suas propriedades mecânicas aproximam-se das de aço de baixo e médio carbono, com ductilidade razoável, que pode ultrapassar 10% em alongamento.

A ABNT, pela sua especificação PEB-128, classifica os maleáveis em 14 tipos (entre maleáveis brancos e pretos), cujas propriedades mecânicas variam dentro dos seguintes limites:

- limite de escoamento – 19 a 50 kgf/mm^2 (valores mínimos)
- limite de resistência à tração – 30 a 70 kgf/mm^2 (valores mínimos)
- alongamento mín, em 3 d – 2 a 12%
- dureza Brinell típica – menos de 150 a 285

Os maleáveis de núcleo preto são os que apresentam melhores propriedades.

Existe um tipo de maleável – chamado *maleável perlítico* – cujas propriedades mecânicas apresentam valores mais elevados. Tais maleáveis são agrupados em sete classes pela ASTM. O tipo de menor resistência possui um limite de escoamento mínimo de 31,5 kgf/mm^2, um limite de resistência à tração mínimo de 45,5 kgf/mm^2, um alongamento mínimo de 10% e dureza Brinell entre 163 e 207.

O tipo de maior resistência apresenta os seguintes valores: limite de escoamento mínimo de 31,5 kgf/mm^2, limite de resistência à tração mínimo de 70,0 kgf/mm^2, alongamento mínimo de 2% e dureza Brinell entre 241 e 269.

Os de resistência mecânica média são temperados ao ar e revenidos, ao passo que os de maior resistência são temperados em óleo e revenidos.

Um ciclo de maleabilização modificado, seguido do tratamento térmico de têmpera e revenido, produz uma estrutura que varia desde uma cementita grosseiramente esferoidizada numa matriz ferrítica até a mesma cementita esferoidizada numa matriz de martensita revenida.(53)

A *usinabilidade* do maleável é considerada a melhor dentre as ligas ferrosas, como a Tabela 19 mostra.(53)

A *resistência à corrosão* é muito boa, atribuindo-se esse fato à camada superficial que se origina na maleabilização, a qual é constituída de ferrita ligada com silício.

TABELA 19

USINABILIDADE COMPARATIVA DE DIVERSAS LIGAS FERROSAS

Material	Usinabilidade	Dureza Brinell
Maleável comum	120	110–145
Maleável perlítico	95	163–207
Maleável perlítico	80	197–241
Ferro fundido cinzento	80	160–193
Aço fundido	70	170–212
SAE 1022	70	159–192
SAE 1112	100	179–229
SAE 1035	65	174–217
SAE 1045	60	179–229
SAE 5040	65	179–229

Por todas as propriedades mencionadas, o ferro maleável encontra vasto campo de aplicação nas indústrias mecânica, elétrica, de veículos, de materiais de construção, de tratores, em peças tais como: conexões para tubulações hidráulicas, conexões em linhas de transmissão elétrica, correntes, suportes de molas, caixas de direção e de diferencial, cubos de rodas, sapatas de freios, pedais de freio e de embreagem, colares de tratores, caixas de engrenagens etc.

Várias dessas peças são galvanizadas.

A ABNT classifica os dois tipos de maleáveis, pelas suas propriedades mecânicas, conforme está indicado na Tabela 20.(54)

5 – **Ferro nodular** Esta liga é também chamada *ferro fundido dúctil* e caracteriza-se por excelente resistência mecânica, tenacidade e ductilidade. O seu limite de escoamento é mais elevado do que nos ferros fundidos cinzento e maleável e mesmo do que nos aços-carbono sem elementos de liga.

A grafita, nesses materiais, tem a forma esferoidal, que é mais favorável do que a nodular propriamente dita do ferro maleável e por isso afeta menos a continuidade da matriz.

O ferro fundido de origem, para produzir o ferro nodular, possui uma composição química semelhante à do ferro fundido cinzento comum ou com baixo teor de liga, compreendendo vários tipos, dentro dos seguintes limites de composição:

TABELA 20

PROPRIEDADES DE FERROS FUNDIDOS MALEÁVEIS DE NÚCLEO BRANCO E PRETO, SEGUNDO AS NORMAS ABNT

Tipo ABNT	Diám. corpo prova mm	Resist. à tração mínima kgf/mm²	Limite escoamento (0,2) kgf/mm²	Alongamento em 3d (mín) %	Dureza Brinell típica
Maleável de núcleo branco					
FMBF-3204	15	35	–	3	220
FMBF-3504	15	36	–	3	220
FMBF-4006	15	42	23	4	220
FMBF-4507	15	48	28	5	200
FMBP-5505	15	57	37	4	240
FMBP-6503	15	67	44	2	270
FMBS-3812	15	40	21	8	200
Maleável de núcleo preto					
FMPF-3006	15	30	–	6	–
FMPF-3512	15	35	19	12	até 150
FMPF-4507	15	45	26	7	150/200
FMPF-5005	15	50	30	5	170/230
FMPF-5504	15	55	33	4	190/240
FMPF-6503	15	65	39	3	210/250
FMPP-7002	15	70	50	2	240/285

C_t – 4,0% máx.
Si – 1,7 a 2,8% máx.
Mn – 0,10 a 0,50%
P – 0,03% máx. a 0,10% máx.
S – 0,01% máx.
Ni – 0 a 3,0%
Cu – 0 a 1,50%
Cr – 0 a 0,30%
Mo – 0 a 0,30%
Sn – 0 a 0,10%

Os processos de *nodulização* desses materiais consiste na adição, no metal fundido, de determinadas ligas contendo magnésio, cério, cálcio, lítio, sódio ou bário. A liga mais comum é Mg-Si-Fe, visto que o magnésio é, dentre todos os elementos, o de mais baixo custo. O cério é igualmente muito empregado.

Ao introduzir-se a liga na panela contendo o ferro fundido líquido, ocorre uma violenta reação que causa fervura. O magnésio age como uma espécie de inibidor da grafitização, de curta duração, de modo que o ferro fundido solidifica inicialmente com formação de cementita. Quando cessa a ação do magnésio, a cementita começa a decompor-se, originando uma grafita que se desenvolve em todas as direções, adquirindo uma forma próxima da esférica.

A estrutura final apresenta-se, pois, como grafita esferoidal numa matriz perlítica, podendo apresentar igualmente ferrita e cementita livre.

Um tratamento térmico de *recozimento* ou *normalização* decompõe a cementita em ferrita e produz mais grafita esferoidal. O recozimento, além dessa ação, alivia as tensões.

A normalização produz melhores propriedades mecânicas.

Tratamentos de têmpera e revenido são igualmente empregados, com o objetivo de melhorar a dureza, a resistência ao desgaste e a resistência mecânica.

A ABNT, pela sua especificação PEB-585, agrupou o ferro fundido dúctil em sete classes, indicadas com as respectivas propriedades (no estado bruto de fusão) e estruturas predominantes, como está representado na Tabela 21.

O tipo mais utilizado em construção mecânica é o FE-5007. As aplicações gerais compreendem peças sujeitas a pressão, como compressores, lingoteiras, bielas e outros tipos de peças que exijam maior resistência ao choque, como virabrequins, matrizes, mancais, polias, rodas dentadas, engates, sapatas, tambores de freio etc.

TABELA 21

CLASSIFICAÇÃO DO FERRO NODULAR, SEGUNDO A ABNT

Classe	Limite de resistência à tração kgf/mm²	Limite de escoamento (0,2) mín. kgf/mm²	Alongamento (5d) mín. %	A título informativo	
				Faixa de dureza aproximada Brinell	Estruturas predominantes
FE 3817	38,0	24,0	17	140-180	ferrítica
FE 4212	42,0	28,0	12	150-200	ferrítica-perlítica
FE 5007	50,0	35,0	7	170-240	ferrítica-perlítica
FE 6002	60,0	40,0	2	210-280	perlítica
FE 7002	70,0	45,0	2	230-300	perlítica
FE 3817 RI*	38,0	24,0	17	140-180	ferrítica

* RI = Classe com requisito de resistência ao choque.

A norma alemã DIN classifica os ferros nodulares, pelas suas propriedades, conforme está indicado na Tabela 22.(54)

Por sua vez, a ASTM classifica os ferros nodulares de acordo com as propriedades mecânicas, da seguinte maneira:

– classe 60-40-18 – empregada em válvulas e dispositivos para equipamento de vapor e da indústria química;

– classe 65-45-12 – componentes de máquinas sujeitos a cargas de choque e fadiga;

– classe 80-60-03 – cilindros de secagem de fábricas de papel;

– classe 80-55-06 – virabrequins, engrenagens e rolamentos;

– classe 100-70-03 – engrenagens e componentes de máquinas para suportar elevadas cargas;

– classe 120-90-02 – pinhões, engrenagens, rolamentos etc.

Nas classes citadas, o primeiro algarismo corresponde ao limite de resistência à tração em libras por polegada quadrada; o segundo ao limite de escoamento, igualmente em libras por polegada quadrada e o terceiro, ao alongamento, em porcentagens.

Como se vê, a ductilidade do ferro nodular é, em alguns casos, bastante elevada, considerando o tipo de estrutura que caracteriza o material.

Essa elevada ductilidade confere igualmente ao referido material razoável resistência ao choque.

Está se generalizando, igualmente, o emprego do ferro fundido dúctil ligado, com o objetivo de melhorar a temperabilidade, para o que é suficiente uma adição de níquel e molibdênio em teores até 1 a 2%.

Com maiores teores de níquel e molibdênio, o ferro nodular, após tratamento térmico adequado, apresenta excelente combinação de resistência, tenacidade e ductilidade, devido à formação de estrutura bainítica após o revenido.

Do mesmo modo, estão sendo produzidos vários tipos de ferros nodulares austeníticos, caracterizados por apresentarem carbono entre 2,4 e 3,0%, silício entre 1,5 e 6,0%, manganês entre 0,5 e 1,5%, níquel entre 18 e 36% e cromo entre 0 e 5,5%.

São empregados principalmente quando se exige temperaturas elevadas.

TABELA 22

CLASSIFICAÇÃO DOS FERROS FUNDIDOS NODULARES, SEGUNDO A NORMA DIN

Classe	Limite resist. tração kgf/mm²	Limite escoamento kgf/mm²	Alongamento %	Dureza Brinell	Módulo elasticidade kgf/mm²	Resistência choque kgf/mm²	Resistência flexão kgf/mm²
GGG-45	45	35	5	160/240	17.000	2	80/95
GGG-38	38	25	17	140/180	↑	10	75/90
GGG-42	42	28	12	150/200	16.500	8	80/90
GGG-50	50	35	7	170/240	a	6	85/100
GGG-60	60	42	2	210/300	18.500	4	90/100
GGG-70	70	50	2	230/320	–	2	100/120

CAPÍTULO XII

COBRE E SUAS LIGAS

1 – Introdução Os metais não-ferrosos ocupam uma posição de destaque na indústria e representam um campo muito importante na engenharia, principalmente nos setores mecânicos, de transporte e elétricos.

Na sua maioria podem ser utilizados no estado puro; contudo, sua importância crescente deve-se ao constante desenvolvimento de suas ligas, com característicos físico-químicos e mecânicos de tal ordem que os tornam insubstituíveis em determinadas aplicações.

A posição brasileira, no setor de não-ferrosos, está demonstrada na Tabela 23[1] que mostra as variações verificadas no período 1980/1984, em relação à produção nacional de metais primários e secundários.

Alguns desses metais, como o alumínio, deixaram praticamente de serem importados a partir de 1984. Uma boa parcela do alumínio primário, produzido no Brasil é atualmente exportada.

Outros, como o cobre, ainda exigem importação, pois a produção brasileira não é suficiente para o consumo interno.

2 – Metal cobre O cobre é um metal vermelho-marrom, que apresenta ponto de fusão correspondente a 1.083°C e densidade correspondente a 8,96 g/cm³ (a 20°C), sendo, após a prata, o *melhor condutor do calor e da eletricidade*. Sua resistividade elétrica é de $1{,}7 \times 10^{-6}$ ohm-cm (a 20°C). Por este último característico, uma de suas utilizações principais é na indústria elétrica.

O cobre apresenta ainda excelente deformabilidade.

TABELA 23

PRODUÇÃO BRASILEIRA DE METAIS PRIMÁRIOS E SECUNDÁRIOS ENTRE 1980 e 1984 (EM TONELADAS)

Metal	1980	1981	1982	1983	1984
Alumínio	310.711	292.458	345.334	443.760	503.945
Chumbo	90.418	70.764	53.398	63.066	71.621
Estanho	8.796	7.789	9.298	12.950	18.887
Níquel	2.504	2.334	4.813	10.740	12.716
Zinco	96.025	110.830	110.434	110.958	114.449
Cobre	63.000	45.000	56.812	103.003	97.334

Além disso, o cobre possui boa resistência à corrosão: exposto à ação do ar, ele fica, com o tempo, recoberto de um depósito esverdeado.

A oxidação, sob a ação do ar, começa em torno de 500°C. Não é atacado pela água pura. Por outro lado, ácidos, mesmo fracos, atacam o cobre na presença do ar.

Apresenta, finalmente, resistência mecânica e característicos de fadiga satisfatórios, além de boa usinabilidade, cor decorativa e pode ser facilmente recoberto por eletrodeposição ou por aplicação de verniz.

O cobre, como se verá, forma uma série de ligas muito importantes.

Segundo classificação da ABNT,[55] os principais tipos de cobre são os seguintes:

– *cobre eletrolítico tenaz* (Cu ETP), fundido a partir de cobre eletrolítico, contendo no mínimo 99,90% de cobre (e prata até 0,1%);

– *cobre refinado a fogo de alta condutibilidade* (Cu FRHC), contendo um mínimo de 99,90% de cobre (incluída a prata);

– *cobre refinado a fogo tenaz* (Cu FRTP), fundido a partir do tipo anterior, contendo de 99,80% a 99,85% no mínimo de cobre (incluída a prata);

– *cobre desoxidado com fósforo, de baixo teor de fósforo* (Cu DLP), obtido por vazamento em molde, isento de óxido cuproso por desoxidação com fósforo, com um teor mínimo de 99,90% de cobre (e prata) e teores residuais de fósforo (entre 0,004 e 0,012%);

cobre desoxidado com fósforo, de alto teor de fósforo (Cu DHP), obtido como o anterior, com teor mínimo de cobre (e prata) de 99,80% ou 99,90% e teores residuais de fósforo (entre 0,015 e 0,040%);

– *cobre isento de oxigênio* (Cu OF), do tipo eletrolítico, de 99,95% a 99,99% de cobre (e prata); processado de modo a não conter nem óxido cuproso e nem resíduos desoxidantes;

– *cobre refundido* (Cu CAST), obtido a partir de cobre secundário e utilizado na fabricação de ligas de cobre; o teor mínimo de cobre (e prata) varia de 99,75% (grau A) a 99,50% (grau B).

Esses tipos de cobre são fornecidos em forma de placas, chapas, tiras, barras, arames e fios, tubos, perfis ou conformados por forjamento.

Suas propriedades mecânicas variam dentro dos seguintes limites:

– limite de escoamento	– 5 a 35 kgf/mm^2
– limite de resistência à tração	– 22 a 45 kgf/mm^2
– alongamento	– 48 a 6%
– dureza Brinell	– 45 a 105
– módulo de elasticidade	– 12.000 a 13.500 kgf/mm^2

Alguns tipos apresentam boa resistência ao choque e bom limite de fadiga.

Os valores dependem do estado em que se encontra o metal, se recozido ou encruado.

O grau de encruamento ou recozimento é designado pela expressão "têmpera", a qual não tem nada a ver com o tratamento térmico de têmpera, aplicado nas ligas ferro-carbono.

Tomando-se como exemplo o cobre eletrolítico tenaz (Cu ETP), segundo a forma (placas, chapas e tiras, arames e fios, tubos, perfis ou forjados), as propriedades mecânicas são as seguintes:

– *no estado recozido ou trabalhado a quente*

– limite de escoamento	– 5 a 8 kgf/mm^2
– limite de resistência à tração	– 22 a 26 kgf/mm^2
– alongamento	– 48 a 35%
– dureza Brinell	– 45 a 50

– *no estado encruado*

– limite de escoamento	– 18 a 35 kgf/mm^2
– limite de resistência à tração	– 27 a 45 kgf/mm^2
– alongamento	– 30 a 6%
– dureza Brinell	– 75 a 105.

As aplicações industriais dos vários tipos de cobre acima mencionados são as seguintes:(55)

– *cobre eletrolítico tenaz* (Cu ETP) *e cobre refinado a fogo de alta condutibilidade* (Cu FRHC) – de qualidade mais ou menos idêntica – aplicações onde se exige alta condutibilidade elétrica e boa resistência à corrosão, tais como: na *indústria elétrica*, na forma de cabos condutores aéreos, linhas telefônicas, motores geradores, transformadores, fios esmaltados, barras coletoras, contatos, fiação para instalações domésticas e industriais, interruptores, terminais, em aparelhos de rádio e em televisores etc.; na *indústria mecânica*, na forma de peças para permutadores de calor, radiadores de automóveis, arruelas, rebites e outros componentes na forma de tiras e fios; na *indústria de equipamento químico*, em caldeiras, destiladores, alambiques, tanques e recipientes diversos, em equipamento para processamento de alimentos; na *construção civil e arquitetura*, em telhados e fachadas, calhas e condutores de águas pluviais, cumieiras, pára-raios, revestimentos artísticos etc.;

– *cobre refinado a fogo tenaz* (Cu FRTP) – embora contendo maior teor de impurezas, as aplicações são mais ou menos semelhantes às anteriores no campo mecânico, químico e construção civil; na indústria elétrica, esse tipo de cobre pode ser aplicado somente quando a condutibilidade elétrica exigida não for muito elevada;

– *cobre isento de oxigênio* (Cu OF) – devido a sua maior conformabilidade, é particularmente indicado para operações de extrusão por impacto; aplicações importantes têm-se em equipamento eletro-eletrônico, em peças para radar, anodos e fios de tubos a vácuo, vedações vidro-metal, válvulas de controle termostático, rotores e condutores para geradores e motores de grande porte, antenas e cabos flexíveis e em peças para serviços a altas temperaturas, na presença de atmosferas redutoras;

– *cobre desoxidado com fósforo, de baixo teor em fósforo* (Cu DLP) – é utilizado principalmente na forma de tubos e chapas, em equipamento que conduz fluidos, tais como evaporadores e permutadores de calor, tubulações de vapor, ar, água fria ou quente e óleo; em tanques e radiadores de automóveis; em destiladores, caldeiras, autoclaves, onde se requer soldagem, em aparelhos de ar condicionado etc.;

– *cobre desoxidado com fósforo, de alto teor em fósforo* (Cu DHP) aplicações praticamente semelhantes às do tipo anterior.

As ligas de cobre são inúmeras.

No sentido de sistematizar os dados existentes sobre o cobre – o metal de conhecimento mais antigo por parte do homem – e suas ligas, de modo a colocá-los à disposição das indústrias de transformação, dos projetistas e dos consumidores, o Conselho Internacional para o Desenvolvimento das Aplicações do Cobre confiou ao "Copper Data Sheets Committee" (Comitê de Tabelas Informativas sobre o Cobre) a tarefa de selecionar as ligas mais importantes e classificá-las, resultando os seguintes grupos principais:

A – cobre puro (dos diversos tipos)
B – ligas de cobre de baixo teor de liga
C – ligas de cobre de teor elevado de liga
D – ligas cobre-zinco (latões)
E – ligas cobre-zinco-chumbo (latões ao chumbo)
F – ligas especiais cobre-zinco (latões ao estanho e ao alumínio)
G – ligas cobre-estanho (bronze fosforoso)
H – ligas cobre-alumínio
K – ligas cobre-níquel (cupro-níquel)
L – ligas cobre-níquel-zinco (alpacas)
M – ligas cobre-níquel-zinco-chumbo (pacas ao chumbo).

Além dessas, outras ligas importantes são cobre-berílio e cobre-silício.

A seguir serão abordados os grupos de maior interesse para as aplicações industriais.

3 – Ligas de cobre de baixo teor em liga Entre elas podem ser citadas as seguintes:(55)

– *Liga cobre-arsênio desoxidado com fósforo* – o arsênio é introduzido em teores entre 0,013 e 0,050% com o objetivo de melhorar as propriedades mecânicas a temperaturas acima da ambiente e aumentar a resistência à corrosão em determinados meios.

Na construção mecânica, essa liga é empregada em permutadores de calor, incluindo tubos de condensadores, tubulações para instalações de distribuição de vapor, em sistemas de lubrificação, em caldeiras, autoclaves e em caldeiraria de cobre em geral, onde se requer soldagem mole ou brasagem.

Sua condutibilidade elétrica é baixa.

No estado recozido, seu limite de resistência à tração situa-se em torno de 26 kgf/mm^2 a 20°C e seu alongamento (em 50 mm) em torno de 49%; a 204°C, seu limite de resistência à tração cai para cerca de 20 kgf/mm^2 e seu alongamento para 45%.

No estado encruado duro, os valores acima passam para:

- limite de resistência à tração – 35 kgf/mm^2 a 20°C
  29 kgf/mm^2 a 204°C
- alongamento (em 50 mm) – 15% a 20°C
  9% a 204°C

– *Liga cobre-prata tenaz* – contendo 0,02 a 0,12% de prata, que confere maior resistência mecânica e maior resistência à fluência. Como a prata não reduz a condutibilidade elétrica, esse tipo de material tem importante aplicação na indústria elétrica, onde se exija alta resistência ao amolecimento pelo calor, como em bobinas, lâminas de coletores, contatos e interruptores, bobinas de indução etc. Na indústria mecânica, devido a sua alta condutibilidade térmica e maior resistência ao amolecimento pelo calor, é empregada na fabricação de aletas de radiadores, de outros tipos de permutadores de calor etc.

– *Liga cobre-cádmio* (CuCd), em que o teor de cádmio varia de 0,6 a 1,0%; apresenta maior resistência à fadiga e ao desgaste e elevada resistência ao amolecimento pelo calor. Empregada principalmente na indústria elétrica, em cabos condutores aéreos de linhas de tróleibus, molas e contato, linhas de transmissão de alta resistência mecânica etc.

– *Liga cobre-cromo* (CuCr), com cerca de 0,8% de cromo; presta-se a tratamento de endurecimento por precipitação (aquecimento a cerca de 1.000°C durante 15 minutos, resfriamento em água e reaquecimento entre 400°C e 500°C, durante tempos mais ou menos longos), o qual provoca elevação da resistência mecânica.

– *Liga cobre-zircônio* (CuZr), contendo 0,10 a 0,25% de zircônio, também endurecível por precipitação; utilizada sobretudo na indústria elétrica.

– *Liga cobre-telúrio* (CuTe), contendo 0,30 a 0,80% de telúrio, o qual é adicionado ao cobre tenaz ou desoxidado com fósforo; essa liga alia alta condutibilidade elétrica à boa usinabilidade; na construção elétrica é empregada em terminais de transformadores e interruptores, contatos, conexões e outros componentes de circuitos que exigem aqueles dois característicos; na indústria mecânica, sua utilização é feita na confecção de parafusos, porcas, pinos e peças similares a serem produzidas em máquinas automáticas.

– *Liga cobre-enxofre* (CuS), com 0,20 a 0,50% de enxofre, de propriedades e aplicações análogas às do cobre-telúrio.

– *Liga cobre-chumbo* (CuPb), com 0,8 a 1,2% de chumbo, adicionado com o objetivo de melhorar a usinabilidade do cobre; empregada em componentes elétricos que, além de alta condutibilidade elétrica, exigem elevada usinabilidade: conectores, componentes de chaves e motores, parafusos etc.

– *Liga cobre-cádmio-estanho* (CuCdSn) – os elementos cádmio e estanho são introduzidos em teores de aproximadamente 0,8% para o primeiro e 0,6% para o segundo; empregada em molas e contatos elétricos; cabos condutores de ônibus elétricos, eletrodos para soldagem elétrica etc.

4 – Ligas de cobre de alto teor em liga As mais importantes são os latões comuns e especiais, os bronzes, as ligas cobre-alumínio, as cupro-níquel, as alpacas, as cobre-berílio e as cobre-silício.

4.1 **Latões** Os latões comuns são ligas de cobre-zinco, podendo conter zinco em teores que variam de 5 a 50%, o que significa que existem inúmeros tipos de latões.

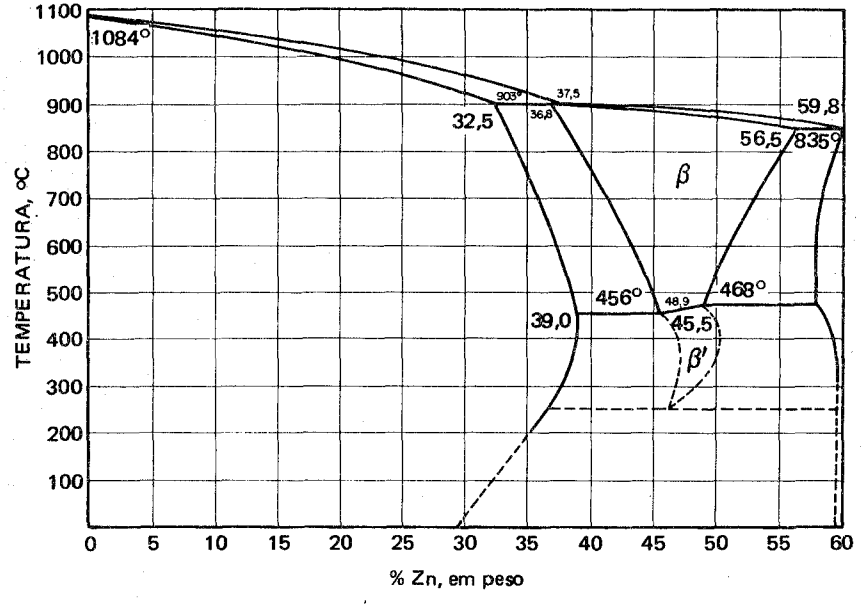


Figura 55 *Diagrama de equilíbrio da liga cobre-zinco.*

A Figura 55[56] mostra o diagrama de equilíbrio das ligas binárias Cu-Zn até 60% de zinco.

Os latões contendo até cerca de 37% de zinco caracterizam-se pelo fato do zinco ser mantido em solução sólida no cobre. Tais latões têm a denominação genérica *latões alfa.*

Entre 37 e 45% surge uma outra fase e os latões são denominados *alfa-beta*; e entre 45 e 50% são chamados *beta.*

Os latões alfa apresentam uma estrutura cúbica de face centrada e os beta, estrutura cúbica de corpo centrado.

A presença do zinco, obviamente, altera as propriedades do cobre.

À medida que o teor de zinco aumenta, ocorre também uma diminuição da resistência à corrosão em certos meios agressivos, levando à "dezinficação", ou seja, corrosão preferencial do zinco.

No estado recozido, a presença de zinco até cerca de 30% provoca um ligeiro aumento da resistência à tração, porém a ductilidade aumenta consideravelmente.

Nessa faixa de composição, pode-se distinguir vários tipos representados na Tabela 24, com as respectivas propriedades mecânicas.

Os valores das propriedades estão representadas numa larga faixa, devido à condição da liga – se recozida ou mais ou menos encruada.

Os latões indicados na Tabela 24 apresentam as seguintes aplicações:

– *cobre-zinco 95-5* – devido a sua elevada conformabilidade a frio, é utilizado para pequenos cartuchos de armas; devido a sua cor dourada atraente, emprega-se na confecção de medalhas e outros objetos decorativos cunhados, tais como emblemas, placas etc.;

– *cobre-zinco 90-10* – também chamado *bronze comercial*; de característicos semelhantes ao tipo anterior, suas principais aplicações são feitas na confecção de ferragens, condutos, peças e objetos ornamentais e decorativos tais como emblemas, estojos, medalhas etc.;

– *cobre-zinco 85-15* – também chamado *latão vermelho*; característicos e aplicações semelhantes às ligas anteriores;

– *cobre-zinco 80-20* – ou *latão comum* – idem;

– *cobre-zinco 70-30* – também chamado *latão para cartuchos* – combina boa resistência mecânica e excelente ductilidade, de modo que é uma liga adequada para processos de estampagem; na construção mecânica, as aplicações típicas são cartuchos para armas, tubos e suportes de tubo de radiadores de automóveis, carcaças de extintores de incêndio e outros

TABELA 24

LATÕES ESPECIAIS

N. ASTM	Designação	Sigla	Composição %	Propriedades mecânicas			
				Limite de resistência à tração kgf/mm²	Limite de escoamento kgf/mm²	Alongamento %	Dureza Brinell
210	Cobre-zinco 95-5	CuZn5	Cu-94,0-96,0 Zn-restante	27–55	10–38	45–3	65–120
220	Cobre-zinco 90-10	CuZn10	Cu-89,0/91,0 Zn-restante	27–57	9–42	50–4	55–125
230	Cobre-zinco 85-15	CuZn15	Cu-84,0/86,0 Zn-restante	31–60	10–42	50–4	60–135
240	Cobre-zinco 80-20	CuZn20	Cu-78,5/81,5 Zn-restante	31–64	12–48	52–3	65–155
260	Cobre-zinco 70-30	CuZn30	Cu-68,5/71,5 Zn-restante	33–85	12–54	62–3	65–160
268 e 270	Cobre-zinco 67-33	CuZn33	Cu-65,5/68,5 Zn-restante	34–86	13–55	60–3	65–165
272 e 274	Cobre-zinco 63-37	CuZn37	Cu-62,0/65,5 Zn-restante	34–86	13–55	56–5	65–165
280	Cobre-zinco 60-40	CuZn40	Cu-59,0/62,0 Zn-restante	38–60	16–45	40–4	85–145

produtos estampados, além de pinos, parafusos e rebites. Outras aplicações incluem tubos para permutadores de calor, evaporadores, aquecedores e cápsulas e roscas para lâmpadas;

– *cobre zinco 67-33* – embora, apresentando propriedades de ductilidade ligeiramente inferiores ao tipo 70-30, as aplicações são idênticas.

A partir de 37% de zinco, nota-se uma queda mais acentuada na ductilidade, devido à presença simultânea da fase beta, que é menos dúctil.

Os latões desse tipo, indicados na Tabela 24, com as respectivas propriedades, têm as seguintes aplicações:

– *cobre-zinco 67-37* – na fabricação de peças por estampagem leve, como componentes de lâmpadas e chaves elétricas, recipientes diversos para instrumentos, rebites, pinos, parafusos, componentes de radiadores etc.;

– *cobre-zinco 60-40* – também chamado *metal Muntz* – esta liga de duas fases presta-se muito bem a deformações mecânicas a quente. É geralmente utilizada na forma de placas, barras e perfis diversos ou componentes forjados para a indústria mecânica; na indústria química e naval, emprega-se na fabricação de tubos de condensadores e permutadores de calor.

4.1.1 **Latões especiais** Alguns tipos de latões especiais estão representados na Tabela 25.

As ligas contendo chumbo possuem alta usinabilidade, devido à presença de partículas dispersas de chumbo. Por isso, aplicam-se em componentes elétricos e mecânicos, como parafusos, componentes rosqueados, rebites, porcas, terminais de baterias elétricas e velas de ignição, buchas, mancais etc., que exigem usinagem fácil e econômica.

As ligas com alumínio – como CuZn28Al2, com pequenos teores de arsênio – possuem melhor resistência à corrosão devido à presença do alumínio e do arsênio, este último adicionado para diminuir a dezinficação. São utilizadas na forma de tubos para condensadores e permutadores de calor e aplicações semelhantes, nas indústrias química e mecânica.

As ligas contendo estanho apresentam boa resistência à corrosão em água doce ou salgada pouco poluída. Empregam-se na forma de placas e tubos para permutadores de calor, condensadores, peças forjadas e usinadas em equipamentos de refino de petróleo, construção naval, entre várias aplicações.

4.1.2 **Latões para fundição** A Tabela 26 apresenta alguns tipos, conforme especificações da ABNT.

TABELA 25

LATÕES ESPECIAIS

N. ASTM	Designação	Sigla	Composição %	Propriedades mecânicas			
				Limite de resistência à tração kgf/mm²	Limite de escoamento kgf/mm²	Alongamento %	Dureza Brinell
314	Cobre-zinco 89-9 chumbo 2	CuZn9Pb2	Cu-87,5/90,5 Pb-1,3/2,5 Zn - restante	22–40	7–35	45–12	55–105
353	Cobre-zinco 62-36 chumbo 2	CuZn36Pb2	Cu-61,0/64,0 Pb-1,0/2,0 Zn - restante	34–70	15–46	45– 2	70–125
360	Cobre-zinco 61-36 chumbo 3	CuZn36Pb3	Cu-60,0/63,0 Pb-2,5/3,7 Zn - restante	36–52	15–45	40–12	75–135
	Cobre-zinco 57-40 chumbo 3	CuZn40Pb3	Cu-56,0/59,0 Pb-2,0/3,5 Zn - restante	42–65	20–50	32– 8	95–145
687	Cobre-zinco 78-28 alumínio 2	CuZn28A12	Cu-76,0/79,0 Al-1,8/2,5 As-0,02/0,06 Zn - restante	36–43	14–22	60–45	70– 95
442 a 445	Cobre-zinco 71-28 estanho 1	CuZn28Sn1	Cu-70,0/73,0 Sn-0,9/1,3 As-0,02/0,06 Zn - restante	34–40	13–18	65–50	65– 85

TABELA 26

LATÕES PARA FUNDIÇÃO

N. ABNT	Designação	Sigla	Composição química %	Propriedades mecânicas: Limite de resistência à tração kgf/mm²	Propriedades mecânicas: Alongamento %	Propriedades mecânicas: Dureza Brinell
11	Cobre-zinco 81-9 estanho 3-chumbo 7	CuZn9Sn3Pb7	Cu-78,0/82,0 Sn-2,0/4,0 Zn-7,0/11,0 Pb-6,0/8,0	18	12	56
13	Cobre-zinco 71-25 estanho 1-chumbo 3	CuZn25Sn1Pb3	Cu-79,0/74,0 Sn-0,5/2,0 Zn - restante Pb-4,0 máx.	20	16	47
15	Cobre-zinco60-38 estanho 1-chumbo 1	CuZn38Sn1Pb1	Cu-59,0/64,0 Sn-0,5/2,0 Zn - restante Pb-2,0 máx.	23	9	60
16	Cobre-zinco 62-26 ferro 5,5 alumínio 3,5 manganês	CuZn26Fe55Al35Mn	Cu-60/68, Sn-0,5 máx. Zn - restante Pb-0,2 máx. Fe-2,0/4,0 Al-3,0/7,5, Mn-2,5/5,0	65	9	200
17	Cobre-zinco 59/37 estanho 1 ferro 1 alumínio 1 manganês, chumbo	CuZn37Sn1Fe1Al1MnPb	Cu-56/62, Sn-1,5 máx. Zn-rest., Pb-1,5 máx. Fe-2,0 máx. Al-1,5 máx. Mn-1,5 máx.	35	12	90

Os tipos contendo chumbo – exemplificados pelos números ABNT 11, 13 e 15 – apresentam maior resistência à corrosão, devido ao estanho e maior usinabilidade, devido ao chumbo. Aplicações típicas: acessórios em geral, válvulas de baixa pressão, registros diversos, componentes de radiadores, flanges, conexões, caixas de bombas de água etc.

As outras ligas, mais complexas, exemplificadas pelos números ABNT 16 e 17, são de alta resistência mecânica e são aplicadas onde esse característico é exigido, tais como em hastes de válvulas, engrenagens, hélices e peças que estão em contato com água do mar.

4.2 **Bronzes** A Tabela 27 apresenta os principais tipos e a Figura 56 o diagrama de equilíbrio parcial da liga Cu-Sn.

Como se vê, nos bronzes comerciais o teor de estanho varia de 2 a 10%, podendo chegar a 11% nas ligas para fundição.

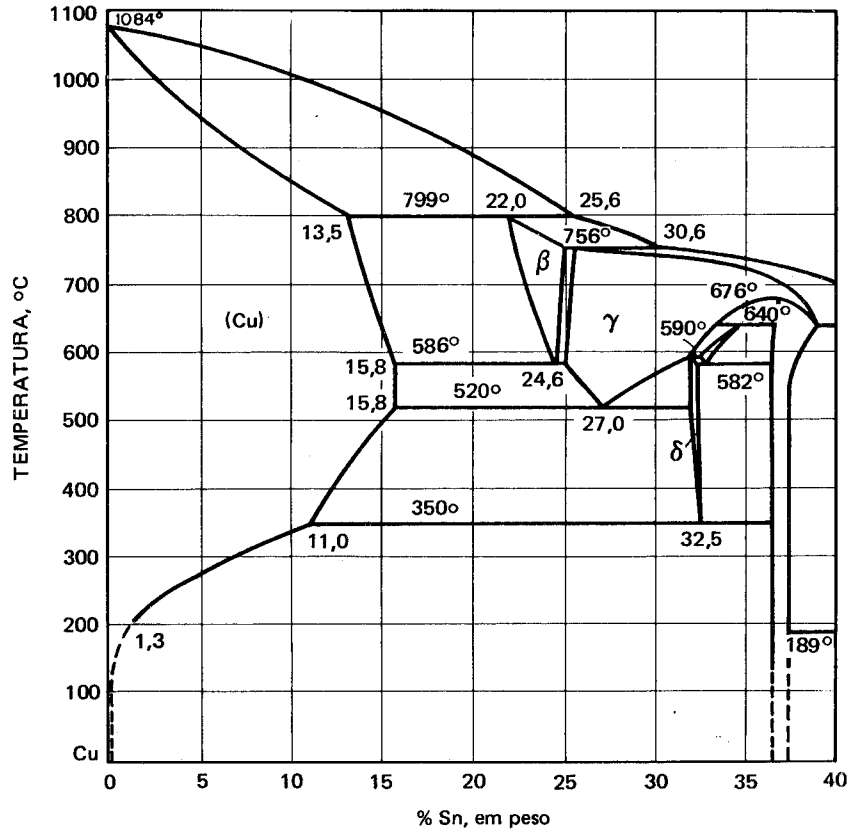


Figura 56 *Diagrama de equilíbrio parcial da liga cobre-estanho.*

TABELA 27

PRINCIPAIS TIPOS DE BRONZE

N. ASTM	Designação	Sigla	Composição %	Propriedades mecânicas			
				Limite de resistência à tração kgf/mm²	Limite de escoamento kgf/mm²	Alongamento %	Dureza Brinell
505	Cobre-estanho 98-2	CuSn2	Sn-1,0/2,5 P-0,02/0,30 Cu-restante	28–65	11–50	45–2	60–150
511	Cobre-estanho 96-4	CuSn4	Sn-3,0/4,5 P-0,02/0,40 Cu-restante	33–90	13–58	50–2	70–195
510	Cobre-estanho 95-5	CuSn5	Sn-4,4/5,5 P-0,02/0,40 Cu-restante	35–95	13–62	55–2	75–205
519	Cobre-estanho 94-6	CuSn6	Sn-5,5/7,5 P-0,02/0,40 Cu-restante	37–100	15–76	60–2	80–225
521	Cobre-estanho 92-8	CuSn8	Sn-7,5/9,0 P-0,02/0,40 Cu-restante	42–105	17–82	65–2	85–240
524	Cobre-estanho 90-10	CuSn10	Sn-9,0/11,0 P-0,02/0,04 Cu-restante	44–100	19–85	65–3	95–245

À medida que aumenta o teor de estanho, aumentam a dureza e as propriedades relacionadas com a resistência mecânica, sem queda da ductilidade. Essas ligas podem, geralmente, ser trabalhadas a frio, o que melhora a dureza e os limites de resistência à tração e escoamento, como está indicado na Tabela, pelas faixas representativas dos valores dessas propriedades.

As propriedades são ainda melhoradas pela adição de até 0,40% de fósforo, que atua como desoxidante; nessas condições, os *bronzes* são chamados *fosforosos*.

Nos teores de utilização usuais, dependendo das condições de resfriamento, a estrutura apresenta uma única fase (alfa), que corresponde a uma solução sólida de estanho em cobre.

Os bronzes possuem elevada resistência à corrosão, o que amplia o campo de seu emprego.

Freqüentemente adiciona-se chumbo para melhorar as propriedades lubrificantes ou de antifricção das ligas, além da usinabilidade. O zinco é da mesma forma eventualmente adicionado, atuando como desoxidante em peças fundidas e para melhorar a resistência mecânica.

As principais aplicações dos vários tipos de bronze são as seguintes:

– *tipo 98-2* – devido a sua boa condutibilidade elétrica e melhor resistência mecânica que o cobre, é empregado em contatos, componentes de aparelhos de telecomunicação, molas condutoras etc.; em construção mecânica, como parafusos com cabeça recalcada a frio, tubos flexíveis, rebites, varetas de soldagem etc.;

– *tipo 96-4* – em arquitetura; em construção elétrica, como molas e componentes de interruptores, chaves, contatos e tomadas; na construção mecânica, como molas, diafragmas, parafusos com cabeça recalcada a frio, rebites, porcas etc.;

– *tipo 95-5* – em tubos para águas ácidas de mineração, componentes para as indústrias têxteis, químicas e de papel; molas, diafragmas, parafusos, porcas, rebites, varetas e eletrodos de soldagem etc.;

– *tipo 94-6* – mesmas aplicações anteriores em condições mais críticas, devido a sua maior resistência à fadiga e ao desgaste. É produzido também nas formas de chapas, barras, fios e tubos;

– *tipo 92-8* – melhor resistência à fadiga e ao desgaste; na forma de chapas, barras, fios e tubos. Além das aplicações da liga anterior, emprega-se em discos antifricção, devido a suas características antifricção;

– *tipo 90-10* – é a liga, entre os bronzes, que apresenta as melhores propriedades mecânicas, sendo por isso a mais empregada. Entre algumas aplicações típicas, incluem-se molas para serviços pesados.

Os bronzes para fundição incluem, entre outros, o seguintes tipos:

– *liga cobre-estanho 89-11 fósforo* – contendo 0,10 a 0,30% de fósforo; entre as aplicações, pode-se citar engrenagens para diversos fins;

– *liga cobre-estanho 88-10 zinco 2* – contendo 1,0 a 3,0% de zinco e 1,0% máx. de chumbo – conexões de tubos grandes, engrenagens, parafusos, válvulas e flanges;

– *liga cobre-estanho 86-6 zinco 4,5 chumbo 1,5* – contendo 3,0 a 5,0% de zinco e 1,0 a 2,0% de chumbo – válvulas para temperaturas até 290°C, bombas de óleo e engrenagens;

– *liga cobre-estanho 87-11 chumbo 1 níquel 1* – contendo 1,0 a 1,5% de chumbo e 0,5 a 1,5% de níquel – buchas e engrenagens para diversos fins.

4.2.1 **Bronzes para mancais** Aplicações importantes dos bronzes em peças fundidas são representadas pelos materiais para mancais.

Nessas aplicações, os tipos empregados são os seguintes:

– *liga cobre-estanho 85-5 chumbo 9 zinco 1* – contendo 83,0 a 86,0% de cobre, 4,0 a 6,0% de estanho, 2,0% máx. de zinco e 8,0 a 10,0% de chumbo – empregada em buchas pequenas e mancais;

– *liga cobre-estanho 80-10 chumbo 10* – contendo 78,0 a 82,0% de chumbo, 9,0 a 11,0% de estanho, 1,0% de zinco máx. e 8,0 a 11,0% de chumbo – empregada em mancais para altas velocidades e grandes pressões e em mancais para laminadores;

– *liga cobre-estanho 78-7 chumbo 15* – contendo 75,0 a 80,0% de cobre, 2,0 a 8,0% de estanho, 1,0% máx. de zinco e 13,0 a 16,0% de chumbo – empregada para pressões médias, em mancais para automóveis;

– *liga cobre-estanho 70-5 chumbo 25* – contendo 68,0 a 73,0% de cobre, 4,0 a 6,0% de estanho, 1,0% máx. de zinco e 22,0 a 25,0% de chumbo – empregada em mancais para altas velocidades e baixas pressões.

O limite de resistência à tração dessas ligas para mancais varia de 10,0 kgf/mm^2, para as que contêm maior teor de chumbo, a 18,0 kgf/mm^2.

4.3 **Ligas cupro-níquel** A Figura 57[57] representativa do diagrama de equilíbrio cobre-níquel, indica que essas ligas formam uma série de soluções sólidas.

A introdução de níquel tende a tornar a cor da liga resultante mais clara, a cor branca começando a aparecer a partir de cerca de 20% de níquel.

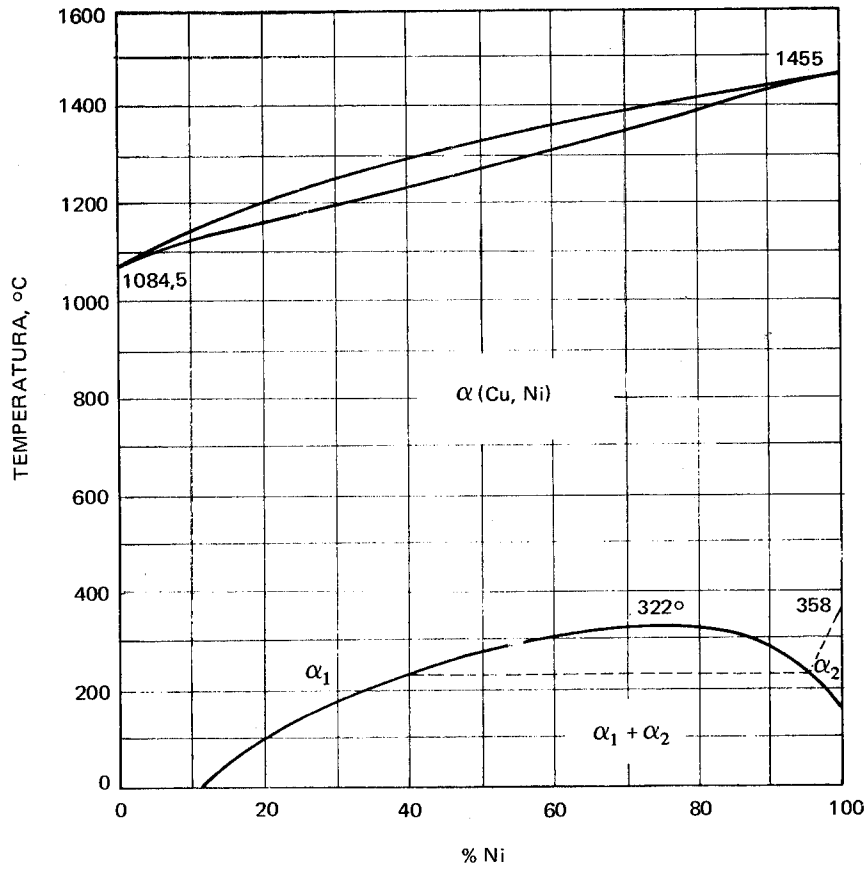


Figura 57 *Diagrama de equilíbrio da liga cobre-níquel.*

As ligas cupro-níquel são muito dúcteis e apresentam excelente resistência à corrosão, principalmente pela ação da água do mar.

Algumas delas apresentam um outro característico importante, qual seja, a sua resistividade praticamente independente da temperatura, donde suas aplicações em resistências elétricas.

O teor de níquel varia, em média, de 5 a 45%; o manganês pode estar presente até cerca de 2,0%, assim como o ferro até 2,0%.

À medida que aumenta o teor de níquel, elevam-se as propriedades relacionadas com a resistência mecânica, como limite de escoamento e limite de resistência à tração, assim como a dureza e o limite de fadiga.

A ductilidade é pouco afetada.

A liga com menor teor de níquel – o tipo ASTM 704, contendo em média 5,0% de níquel, 1,25% de ferro, 0,50% de manganês – apresenta uma resistência à tração entre 28 e 32 kgf/mm^2, um alongamento entre 45 e 10% e uma dureza Brinell entre 60 e 100, além de um limite de fadiga entre 9,5 a 19 kgf/mm^2.

A liga com maior teor de níquel, contendo, em média, 44% de níquel, 1,0% de manganês, 0,25% de ferro, apresenta um limite de resistência à tração de 48 a 70 kgf/mm^2, um alongamento de 45 a 5%, uma dureza Brinell entre 95 e 165 e um limite de fadiga em torno de 29 kgf/mm^2.

Essas ligas são conformadas geralmente na forma de chapas, barras, tiras, fios e tubos.

A liga contendo 5% de níquel encontra suas aplicações mais típicas na construção naval, em tubos condutores de água do mar, circuitos de refrigeração a água e serviços sanitários de navios.

A liga contendo 10% de níquel aplica-se em tubos e placas de condensadores, aquecedores e evaporadores. Na indústria naval tem as mesmas aplicações da liga anterior; em construção mecânica, uma aplicação típica é para cabos e tubos usados em linhas hidráulicas e pneumáticas.

A liga com 20% de níquel aplica-se em construção elétrica (resistores, recipientes de transistores, guias de ondas de radar etc.) e na construção mecânica em recipientes conformados por estampagem profunda ou repuxamento resistentes à corrosão, aquecedores de água doméstica; na confecção de moedas e medalhas cunhadas.

Com 30% de níquel, as mais importantes aplicações ocorrem na construção naval e na indústria química, em placas e tubos para condensadores em serviços pesados, aquecedores e evaporadores de água etc.

A liga com 45% de níquel, conhecida com o nome de *constantan*, aplica-se em elementos de aquecimento, na indústria elétrica, devido a sua alta resistividade elétrica e independência desse característico da temperatura.

4.3.1 **Ligas cobre-níquel-zinco** Essas ligas são conhecidas também com o nome de *alpacas*. Sua composição varia de 10 a 30% de níquel, 45 a 70% de cobre, sendo o restante zinco.

São muito resistentes à corrosão e caracterizam-se pela cor esbranquiçada, tornando-se mais brilhantes e decorativas com os maiores teores de níquel, de modo que entre suas aplicações típicas, contam-se objetos de cutelaria e decorativos.

Outras aplicações incluem: molas de contato de equipamentos elétricos e telefônicos, componentes de aparelhos óticos e fotográficos.

A introdução de chumbo permite a fundição em areia de peças utilizadas na indústria de laticínios, válvulas e assentos de válvulas, chaves e acessórios para construção naval.

A liga mais típica, entre as alpacas, é a que contém 18% de níquel. Sua composição é a seguinte: Cu – 63,0 a 66,5%, Ni – 16,5 a 19,5%, Mn – 0,50% máx. e Zn – restante.

Seu limite de escoamento varia de 18 a 63 kgf/mm^2; seu limite de resistência à tração, de 41 a 73 kgf/mm^2; seu alongamento, de 40 a 3% e sua dureza, de 40 a 78 Rockwell B.

4.4 **Ligas cobre-alumínio** Contêm alumínio de 5 a 10% em média, podendo ainda apresentar níquel até 7%, manganês até 3,0%, ferro até 6% e, eventualmente, arsênio até 0,4%.

A de maior resistência mecânica é a que contém em média 10% de alumínio, com 5% de ferro e 5% de níquel. Seu limite de resistência à tração varia de 75 a 80 kgf/mm^2, seu limite de escoamento de 42 a 50 kgf/mm^2, seu alongamento de 15 a 12% e sua dureza Brinell de 180 a 215. Essa liga pode ser temperada e revenida.

Todas as ligas cobre-alumínio possuem geralmente boa resistência à corrosão.

Suas aplicações mais importantes são as seguintes: tubos de condensadores, evaporadores e trocadores de calor, componentes de equipamentos na indústria de papel, recipientes para a indústria química, autoclaves, instalações criogênicas, componentes de torres de resfriamento, revestimentos protetores, tubos para água do mar, equipamento de decapagem, engrenagens, ferramentas de conformação de plásticos, assentos de válvulas, hastes, hélices navais, mancais, buchas e peças resistentes à corrosão e outros componentes mecânicos.

4.5 **Ligas cobre-berílio** São ligas que podem ser tratadas termicamente por endurecimento por precipitação.

O teor de berílio varia de 1,6 a 2,7%, podendo conter pequenas quantidades de cobalto, níquel e ferro.

Depois de solubilizadas podem ser conformadas a frio.

Uma liga típica, nº ASTM 172, contém 1,7 a 1,9% de berílio, apresentando, depois de endurecida por precipitação, limite de resistência à tração entre 123 e 149 kgf/mm^2, limite de escoamento entre 109 e 137 kgf/mm^2, alongamento entre 6 e 1%, dureza Brinell entre 38 e 41 e limite de fadiga entre 25 e 31 kgf/mm^2.

Aplicações típicas incluem: molas de instrumentos, diafragmas e cabos flexíveis, componentes de chaves elétricas, de relés e, na construção mecânica, válvulas, componentes de bombas e de máquinas de soldagem por resistência elétrica.

4.6 **Ligas cobre-silício** O teor de silício é no máximo de 3,0% para as ligas a serem conformadas, podendo, contudo, chegar a 5% nas ligas fundidas. Essas ligas podem ainda conter pequenos teores de zinco, ferro e manganês.

Sua resistência mecânica é superior à do cobre: o limite de resistência à tração pode atingir valores ligeiramente superiores a 100 kgf/mm^2, no estado conformado a frio.

Aplicações típicas: componentes de equipamentos das indústrias químicas e de papel (tanques, tubulações, cestos de decapagem etc.) e na indústria mecânica em eletrodos de soldagem, parafusos, porcas, rebites, buchas e ganchos; na indústria naval, em eixos de hélices e na indústria aeronáutica, em linhas hidráulicas de pressão.

5 — Tratamentos térmicos do cobre e suas ligas Os tratamentos térmicos usualmente empregados no cobre e suas ligas são os seguintes:[58] homogeneização, recozimento, alívio de tensões, solubilização é endurecimento por precipitação.

5.1 **Homogeneização** O objetivo é eliminar ou diminuir a segregação de lingotes que devam ser trabalhados a frio ou a quente. Aplica-se principalmente nas ligas bronze ao estanho, bronze ao silício e cupro-níquel; consiste no aquecimento a uma temperatura de cerca 90°C acima da máxima temperatura de recozimento, durante tempo prolongado.

5.2 **Recozimento** Aplicado nas ligas trabalhadas a frio para promover a sua recristalização. Dependendo das ligas, as temperaturas variam de 260° a 650°C para o metal cobre e de 425° a 815°C para as ligas. Quanto maior o encruamento prévio, menor a temperatura de recristalização ou recozimento.

5.3 **Alívio de tensões** Algumas ligas de cobre estão sujeitas à ruptura por fissuração, devida à corrosão sob tensão; as ligas mais suscetíveis a esse fenômeno são os latões, contendo 20% ou mais de zinco.

O tratamento consiste em aquecer, durante uma hora, a temperaturas que, conforme a liga, variam de 190° a 260°C.

5.4 **Solubilização e endurecimento por precipitação** Entre as ligas que são comumente submetidas a esse tratamento térmico situam-se os bronzes ao alumínio e o cobre-berílio.

No caso desta última liga, o tratamento consiste inicialmente em solubilizar-se pelo aquecimento, durante 1 a 3 horas, entre 775° e 1.035°C, conforme o tipo da liga, seguindo-se a precipitação, entre 2 a 5 horas, a temperaturas variando de 300° a 510°C.

Pode-se obter limites de resistência à tração da ordem de 150 kgf/mm^2.

As ligas são primeiro solubilizadas e depois conformadas a frio. A seguir são endurecidas por precipitação.

Como se mencionou, um outro tratamento de endurecimento, representado por têmpera e revenido, pode ser feito nas ligas Cu-Al, contendo alumínio em torno ou pouco acima de 10%.

CAPÍTULO XIII

ALUMÍNIO E SUAS LIGAS

1 – Metal alumínio Seu peso específico é de 2,7 g/cm^3 a 20°C; seu ponto de fusão corresponde a 660°C e o módulo de elasticidade é de 6.336 kgf/mm^2. Pertence ao sistema cúbico de face centrada.

Apresenta boa condutibilidade térmica e relativamente alta condutibilidade elétrica (62% da do cobre).

É não-magnético e apresenta baixo coeficiente de emissão térmica.

Esses característicos, além da abundância do seu minério principal, vêm tornando o alumínio o metal mais importante, após o ferro.

O baixo peso específico do alumínio torna-o de grande utilidade em equipamento de transporte – ferroviário, rodoviário, aéreo e naval – e na indústria mecânica, numa grande variedade de aplicações, como se verá.

O baixo ponto de fusão, aliado a um elevado ponto de ebulição (cerca de 2.000°C) e a uma grande estabilidade a qualquer temperatura, torna a fusão e a moldagem do alumínio muito fáceis.

A condutibilidade térmica, inferior somente às da prata, cobre e ouro, o torna adequado para aplicações em equipamento destinado a permutar calor.

Sua alta condutibilidade elétrica e ausência de magnetismo o tornam recomendável em aplicações na indústria elétrica, principalmente em cabos condutores.

Finalmente, o baixo fator de emissão o torna aplicável como isolante térmico.

Entretanto, a resistência mecânica é baixa; no estado puro (99,99% Al), o seu valor gira em torno de 5 a 6 kgf/mm^2; no estado encruado (laminado a frio com redução de 75%) sobe para cerca de 11,5 kgf/mm^2. É muito dúctil: alongamento de 60 a 70%.

Apresenta boa resistência à corrosão, devido à estabilidade do seu principal óxido Al_2O_3 que se forma na superfície do metal. Essa resistência à corrosão é melhorada por anodização, que ainda melhora sua aparência, tornando-o adequado para aplicações decorativas.

As ligas de alumínio não apresentam a mesma resistência à corrosão que o alumínio puro, de modo que quando se deseja aliar a maior resistência mecânica das ligas com a boa resistência à corrosão do alumínio quimicamente puro, utiliza-se o processo de revestimento da liga por capas de alumínio puro ("cladding"), originando-se o material "Alclad".

Devido a sua alta ductilidade, é facilmente laminado, forjado e trefilado, de modo a ser utilizado na forma de chapas, folhas muito finas, fios, tubos etc.

De um modo geral, pode-se dizer que o alumínio de pureza equivalente a 99,9% anodizado, apresenta característicos óticos análogos aos da prata, aplicando-se, por exemplo, em refletores.

Com pureza equivalente a 99,5% utiliza-se em cabos elétricos armados com aço, além de equipamentos variados na indústria química.

Com pureza de 99%, sua principal aplicação é em artigos domésticos, principalmente para utilização em cozinhas.

2 – Ligas de alumínio Existe uma grande variedade de ligas de alumínio. Por esse motivo, tem sido relativamente difícil adotar uma nomenclatura e simbologia, de certo modo universal, para classificá-las. Além da classificação própria dos grandes fabricantes internacionais, as diversas associações de fabricantes e de normas e especificações possuem suas próprias classificações.

A ABNT possui, em estágio experimental, a norma ABNT-P-TB-57, sob o título "terminologia e classificação de alumínio e ligas de alumínio".

Na presente obra, a preocupação do autor será indicar os principais tipos, procurando identificá-los com algum dos sistemas de classificação existentes, mas sem tentar correlacioná-los com outros sistemas.

Em princípio, as ligas de alumínio podem ser classificadas em dois grandes grupos:[52]

I – ligas trabalhadas (conformadas mecanicamente)
II – ligas fundidas

As primeiras, por sua vez, podem ser subdivididas em duas classes:

a – ligas não tratáveis termicamente
b – ligas tratáveis termicamente.

Estas últimas são as que têm suas propriedades mecânicas melhoradas geralmente pelo tratamento de "endurecimento por precipitação".

As "não tratáveis termicamente" têm as suas propriedades alteradas apenas por trabalho a frio ou encruamento.

2.1 **Tratamento térmico das ligas de alumínio** O principal tratamento térmico consiste em "solubilização" seguida de "endurecimento por precipitação".

O princípio do tratamento consiste em promover-se a solução de fases duras e posteriormente precipitá-las.

O melhor exemplo é dado pela liga Al-Cu, cujo diagrama de equilíbrio está representado na Figura 58.[59] Se uma liga de alumínio contendo, por exemplo, 5,5% de cobre, é aquecida a 540°C, todo o cobre será dissolvido no alumínio, pois o campo do diagrama de equilíbrio corresponde ao de solução sólida total. Resfriando-se rapidamente a liga em água, ela fica super-

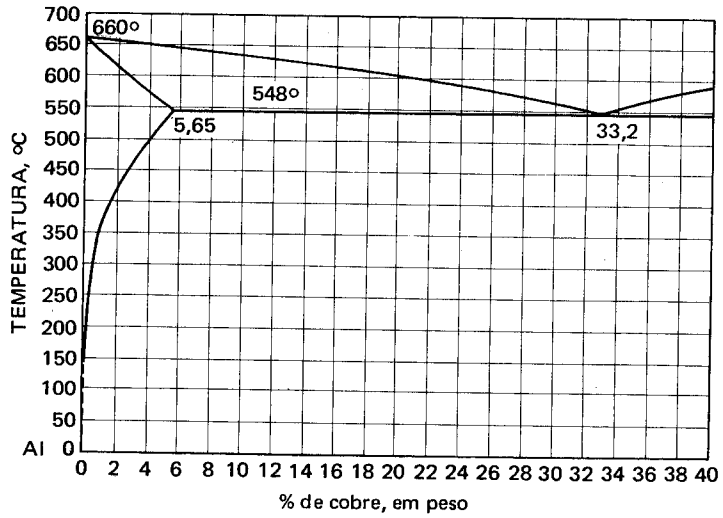


Figura 58 *Diagrama de equilíbrio parcial da liga alumínio-cobre.*

saturada, pois não se dá tempo para a precipitação do cobre: na realidade, fica retida em solução sólida supersaturada uma quantidade de cobre, correspondente à diferença entre o teor da liga considerada e aquele que pode realmente ser retido em solução sólida à temperatura ambiente (cerca de 0,10%).

A seguir, promove-se o "envelhecimento" ou "precipitação" de uma fase, constituída de partículas finas de $CuAl^2$, que fortalecem a liga, porque, admite-se, promovem a obstrução dos movimentos das discordâncias. Esse fortalecimento, ou seja, aumento da sua resistência mecânica, é feito sem que a ductilidade seja sensivelmente afetada.

O chamado "envelhecimento" pode ser natural, ou seja, à temperatura ambiente, num período de tempo de cerca de dois dias. Na prática, entretanto, várias ligas são "envelhecidas artificialmente", ou seja, a precipitação das partículas do composto intermetálico $Cu Al_2$ é promovida em tempo mais curto pelo reaquecimento da liga resfriada rapidamente, a temperaturas moderadas acima da ambiente.

Um característico importante do comportamento dessas ligas durante o tratamento térmico descrito consiste no fato de que, logo após o tratamento de solubilização e resfriamento rápido em água, as ligas se apresentam tão dúcteis como no estado recozido, podendo ser então facilmente conformadas.

Esse trabalho de conformação deve ser, contudo, levado a efeito logo após o resfriamento em água, tendo em vista a tendência que as ligas possuem de envelhecerem ou "endurecerem por precipitação" à temperatura ambiente.

As temperaturas de solubilização devem ser escolhidas de conformidade com o teor de cobre, para que não se corra o risco de superaquecer o material e aproximar-se da temperatura de início de fusão.

A precipitação, como já foi mencionado, faz-se a temperaturas baixas – entre 115° e 190°C geralmente – e tempos longos, variáveis entre 5 e 48 horas, de acordo com o tipo de liga.

O tratamento de "endurecimento por precipitação" permite obter valores de resistência elevados, superiores a 40 kgf/mm^2 para limite de resistência à tração e a 30 kgf/mm^2 para limite de escoamento.

Outro tratamento usual nas ligas de alumínio é o "recozimento", aplicado quando se deseja diminuir a dureza ou aliviar as tensões.

Neste último caso, o aquecimento é feito até cerca de 340 a 350°C, com resultados satisfatórios.

No caso do recozimento para amolecer o material, a temperatura de tratamento é mais elevada – entre 400° e 440°C – e o tempo é de cerca de duas horas, seguindo-se resfriamento lento, pelo menos até atingir-se a temperatura de 260°C.

2.2 **Ligas de alumínio trabalhadas** A Tabela 28(55) apresenta a composição química das ligas encruáveis, segundo a designação ABNT, incluindo o alumínio puro (99,45%), nº 15040 ABNT.

A liga 10050 ou alumínio comercialmente puro, contendo no mínimo 99,0% de Al, apresenta fácil conformação e alta ductilidade, boa condutibilidade elétrica, boa resistência à corrosão e boa soldabilidade.

Suas propriedades no estado recozido são as seguintes:

- limite de resistência à tração – 9,0 kgf/mm²
- limite de escoamento – 3,5 kgf/mm²
- alongamento em 2" – 35%
- dureza Brinell (carga 500 kgf, esfera 10 mm) – 23
- limite de fadiga – 3,5 kgf/mm²

Como se vê, a resistência mecânica é baixa.

Encruada, no estado "duro" (cujo símbolo é H18 adotado pela Aluminium Association), os valores acima passam para:

- limite de resistência à tração – 17,0 kgf/mm²
- limite de escoamento – 15,0 kgf/mm²
- alongamento – 5%
- dureza Brinell – 44
- limite de fadiga – 6,0 kgf/mm²

Aliás, o comportamento da resistência mecânica e da ductilidade desses dois materiais, em função da quantidade de encruamento, pode ser melhor acompanhado no gráfico da Figura 59.

Aplicações típicas do alumínio comercialmente puro: recipientes para armazenamento de alimentos, folhas, cabos elétricos (armados com aço), utensílios domésticos e culinários, telhas, em equipamentos químicos e para processamento de alimentos, em refletores etc.

A introdução dos elementos de liga – como Si, Fe, Cu, Mn, Mg, Zn e eventualmente Ti, aumentam os valores das propriedades mecânicas. Por exemplo, a liga ABNT 52820 apresenta os seguintes valores:

BIBLIOTECA

TABELA 28

LIGAS DE ALUMÍNIO TRABALHADAS

Designação ABNT	Elementos de liga, %								
	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti
15040	—	—	—	—	—	—	—	—
10050	1,0	c/ o Si	0,05/0,2	0,05	—	—	—	—
16020	0,25	0,35	0,05	0,03	0,03	0,03	—	0,03
31220	0,60	0,70	0,5/0,2	1/1,5	—	—	—	—
51020	0,40	0,70	0,20	0,20	0,5/1,1	0,10	—	—
51030	0,40	0,70	0,20	0,10	1,1/1,8	0,10	0,10	—
52820	0,45	c/ o Si	0,10	0,10	2,2/2,8	0,15/0,35	0,10	—
58840	0,45	c/ o Si	0,10	0,10	3,1/3,9	0,15/0,35	0,20	0,20
54330	0,40	0,40	0,10	0,3/1	4,0/4,9	0,05/0,25	0,25	0,15

	No estado recozido	Encruado duro
– limite de resistência à tração	20,5	29,0 kgf/mm²
– limite de escoamento	10,0	25,0 kgf/mm²
– alongamento	25,0	7,0 %
– dureza Brinell	45	85
– limite de fadiga	12,0	14,1 kgf/mm²

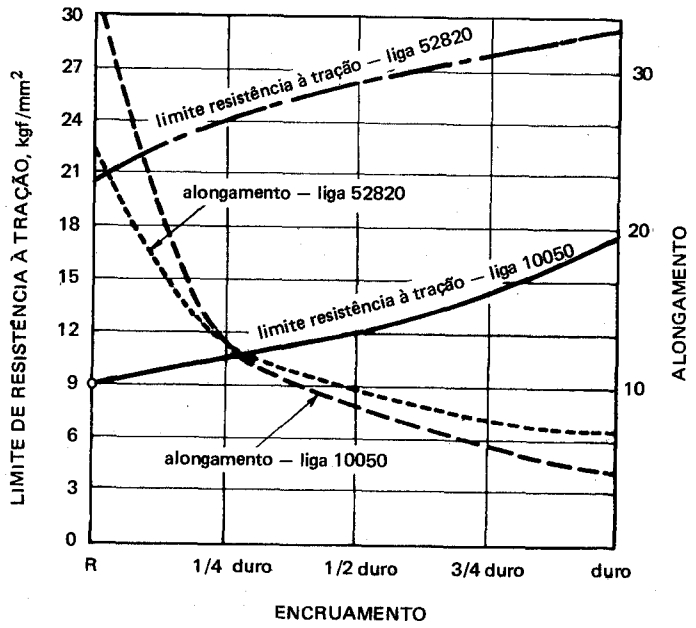


Figura 59 *Influência do encruamento sobre alumínio e suas ligas.*

Ligas desse tipo apresentam as mais favoráveis combinações de resistência mecânica, resistência à corrosão e ductilidade.

Suas aplicações são, pois, feitas onde se exigem tais característicos.

2.3 **Ligas de alumínio tratadas termicamente** As ligas mais importantes trabalhadas e endurecíveis por precipitação estão indicadas na Tabela 29[55] e a Tabela 30 apresenta as suas propriedades em várias condições.

Essas Tabelas mostram claramente os efeitos dos elementos de liga no alumínio e dos tratamentos térmicos nas ligas resultantes.

TABELA 29

LIGAS DE ALUMÍNIO TRABALHADAS ENDURECÍVEIS POR PRECIPITAÇÃO

Designação		Elemento de liga, %								
AA*	ABNT	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti
2011	26820	0,40	0,70	5,0/6,0	–	–	–	–	–
2017	24320	0,80	0,70	3,5/4,5	0,4/1,0	0,2/0,8	0,10	0,25	–
2024	24520	0,50	0,50	3,8/4,9	0,3/0,9	1,2/1,8	0,10	0,25	–
6053	69840	0,55/0,70	0,35	0,10	–	1,1/1,4	0,15/0,35	0,10	–
6061	69260	0,40/0,80	0,70	0,15/0,4	0,15	0,8/1,2	0,04/0,35	0,25	0,15
7075	76520	0,40	0,50	1,2/2,9	0,30	2,1/2,9	0,18/0,35	5,1/6,1	0,2

* Sistema ASTM – American Society for Testing Materials.

TABELA 30

PROPRIEDADES MECÂNICAS DAS LIGAS INDICADAS NA TABELA 29

Liga e estado* Designação AA	Limite de resistência à tração kgf/mm²	Limite de escoamento kgf/mm²	Alongamento em 2" %	Dureza Brinell (carga 500 kg esfera 10 mm)	Limite de fadiga kgf/mm²
2011–T3	38,5	30,0	15	95	12,5
2011–T8	41,5	31,5	12	100	12,5
2017–O	18,0	7,0	22	45	9,0
2017–T4	43,5	28,0	22	105	12,5
2024–O	19,0	8,0	20/22	47	9,0
2024–T3	49,0	35,0	18	120	14,0
6053–O	11,0	5,0	25	26	5,0
6053–T6	26,0	22,5	13	80	9,0
6061–O	12,5	5,5	25/30	30	6,5
6061–T6	31,5	28,0	12/17	95	10,0
7075–O	23,0	10,5	17	60	–
7075–T6	58,5	51,5	11	150	16,5

*O = recozida
T3 = solubilizada e encruada
T4 = solubilizada e envelhecida à temperatura ambiente
T6 = solubilizada e envelhecida artificialmente
T8 = solubilizada, encruada e endurecida por precipitação (envelhecida artificialmente)

A liga 2017, conhecida também com o nome de "duralumínio" é a mais antiga e a mais usada; contém, em média, 4,0% de cobre, 0,5% de magnésio e 0,7% de manganês. Como se vê, no estado tratado termicamente, a liga chega a adquirir um limite de resistência à tração semelhante ao do aço doce, com um terço do seu peso específico, donde a importância do seu emprego, principalmente na indústria aeronáutica e de transporte em geral.

Na indústria aeronáutica, na realidade, ela tem sido deslocada pela liga 2024, que possui maior resistência mecânica, embora menor capacidade de conformação.

Tais ligas apresentam, entretanto, um inconveniente: tendência à corrosão intergranular, sobretudo em água salgada ou atmosfera salina. Por essa razão, são freqüentemente utilizadas na forma de "Alclad"; as chapas de alumínio puro aplicadas em ambas as faces podem compreender aproximadamente 10% da seção transversal.

A indústria aeronáutica emprega ainda as ligas 6061 e 7075.

A liga designada por 6053, embora sendo de menor resistência mecânica, possui, dentre todas, a maior resistência à corrosão, comparável à do alumínio comercialmente puro, de modo que se aplica nos casos em que a resistência à corrosão é mais importante que a resistência mecânica.

2.4 **Ligas fundidas** Os característicos do alumínio e de suas ligas, mencionados no início deste Capítulo, tornam esses materiais de grande emprego em peças fundidas.

Na fundição de peças de alumínio, pode-se utilizar os métodos de fundição em areia, fundição sob pressão e de precisão.

As ligas de alumínio para fundição são classificadas em dois grandes grupos:(55)

- ligas binárias, com um único elemento de liga adicionado;
- ligas complexas, com dois ou mais elementos de liga adicionados.

Entre as primeiras, situam-se as ligas alumínio-cobre, alumínio-silício e alumínio-magnésio.

As do segundo grupo contêm cobre e silício, ou cobre, silício e magnésio ou silício, magnésio ou cobre-níquel e magnésio, além do alumínio como metal-base.

A Tabela 31 indica alguns dos tipos de ligas de alumínio para fundição.

As propriedades mecânicas dessas ligas, segundo o processo de fundição empregado e o tratamento térmico aplicado, variam dentro das seguintes faixas:

TABELA 31

PRINCIPAIS TIPOS DE LIGAS DE ALUMÍNIO PARA FUNDIÇÃO

Designação		Processo de fundição*	Elemento de liga, %									
AA	ABNT		Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Ni	Zn	Sn	Ti
1050	15070	A	0,15	0,2/0,4	—	—	—	—	—	—	—
295.2	24460	A – T	0,7/1,2	0,8	4,0/5,0	0,3	0,03	—	0,3	—	0,2
222.2	29560	T	2,0	1,2	9,2/10,7	0,5	0,2/0,35	0,5	0,5	—	0,2
242.2	24860	A – T	0,6	0,6	3,5/4,5	0,10	1,3/1,8	1,7/2,3	0,1	—	0,2
443.2	43020	A, M, P	4,5/6,0	0,6	0,10	0,10	0,05	—	0,1	—	0,2
355.2	42230	A, M – T	4,5/5,5	0,15/0,25	1,0/1,5	0,05	0,5/0,6	—	0,05	—	0,2
A413.2	46030	P	11,5/12,5	0,5	0,10	0,05	—	—	0,05	—	—
360.2	45520	P	9,0/10,0	0,7/1,1	0,10	0,10	0,45/0,60	0,1	0,1	—	0,2
384,2	46220	P	10,5/12,0	0,6/1,0	3,0/4,5	0,10	0,1	0,1	0,1	0,1	—
518.2	59.060	P	0,25	0,70	0,10	0,10	7,6/9,5	0,05	—	0,05	—
A850.2	82660	A, M – T	2,0/3,0	0,50	0,7/1,3	0,10	0,10	0,3/0,7	—	5,5/7,0	0,2

*A = fundição em areia
M = fundição em coquilha, por gravidade
P = fundição sob pressão
T = liga suscetível de tratamento térmico

- limite de resistência à tração — 8,0 a 33,0 kgf/mm^2
- limite de escoamento — 2,5 a 30,0 kgf/mm^2
- alongamento — 45 a 0,5%
- dureza Brinell (10 mm/500 kgf) — 20 a 140
- limite de fadiga (5 X 10^8 ciclos) — 2,0 a 14,0 kgf/mm^2

As *ligas alumínio-cobre* são as mais empregadas. Possuem boa resistência mecânica e excelente usinabilidade; suas resistências à corrosão e à oxidação são, contudo, baixas.

As *ligas alumínio-silício* possuem elevada resistência à corrosão, porém são muito frágeis devido à estrutura grosseira em função da presença do silício. Um tratamento chamado "modificação" melhora os característicos estruturais, conferindo ainda melhor resistência e boa ductilidade.

Esse tratamento baseia-se no tratamento do metal líquido por sódio na forma metálica ou na de sais, como fluoreto ou cloreto de sódio. A introdução do sódio ocasiona uma fina dispersão do silício, que altera, para melhor, os característicos estruturais da liga.

A quantidade de sódio varia de 0,04% para ligas com 5% de silício até 0,10% para 14% de silício.

As ligas alumínio-silício com adições de cobre ou magnésio podem ser submetidas a tratamentos térmicos.

As *ligas alumínio magnésio* são as que apresentam a melhor combinação de característicos mecânicos, resistência à corrosão, usinabilidade, além de poderem ser facilmente anodizadas. A maioria dessas ligas não é tratável termicamente.

As *ligas alumínio-estanho* são empregadas principalmente para a confecção de *mancais e buchas*, devido a seu alto limite de fadiga e boa resistência à corrosão pela ação de óleos lubrificantes dos motores de combustão interna.

Na fabricação de mancais para veículos automotores, utilizam-se lingotes da liga Al-Sn (20%), os quais são laminados a frio. Procede-se, a seguir, a um recozimento a 350°C ou 500°C. Em seguida, a lâmina da liga é unida a uma lâmina de aço, formando-se o casquilho do mancal. Para melhorar a aderência, emprega-se uma delgada capa de alumínio puro como material intermediário.

As lâminas de aço e alumínio são laminadas em conjunto a frio, obtendo-se contato físico estreito. A seguir, lamina-se a 400°C, ficando estabelecida a união metalúrgica permanente. Uma nova laminação a frio incorpora a liga Al–Sn e obtém-se, assim, a peça completa do mancal. O encruamento verificado nesta última operação é eliminado por um recozimento a 350°C durante uma hora.

2.4.1 **Ligas de alumínio para veículos** Muitas peças de veículos automotores são fundidas em ligas de alumínio.

Na confecção de pistões, empregam-se ligas contendo de 17 a 24% de silício, 1 a 1,75% de cobre e, eventualmente, manganês, magnésio, níquel, zinco, cromo e titânio.

Para outras partes de motores e peças diversas, as ligas podem conter silício entre 5,0 e 12,5%, cobre de 0,10 a 5,0%, manganês de 0,5 a 0,6%, magnésio de 0,1 a 0,5%, níquel de 0,2 a 0,5%, zinco de 0,1 a 3,0%, ferro de 0,4 a 2,0% e, eventualmente, estanho, chumbo e titânio.

2.4.2 **Ligas de alumínio super-resistentes** Recentemente foi desenvolvida nos Estados Unidos uma nova classe de ligas de alumínio super-resistentes para peças fundidas.(60) Essas ligas apresentam a composição da Tabela 32. Como se vê, são ligas relativamente complexas, cujos níveis de resistência ultrapassam 35 kgf/mm^2 (limite de resistência à tração).

TABELA 32

LIGAS DE ALUMÍNIO PARA FUNDIÇÃO SUPER-RESISTENTES

Composição %	Tipo	
	Liga 201	Liga 204
Silício	0,05 máx.	0,06 máx.
Ferro	0,10 máx.	0,10 máx.
Cobre	4,00 a 5,00	4,50 a 5,50
Titânio	0,15 a 0,35	0,35 máx.
Manganês	0,20 a 0,30	0,20 a 0,60
Magnésio	0,18 a 0,35	–
Prata	0,40 a 1,00	–
Vanádio	–	0,05 a 0,15
Zircônio	–	0,10 a 0,25
Alumínio	restante	restante

São ligas tratáveis termicamente, cujo desenvolvimento foi inicialmente feito para preencher exigências da indústria aeronáutica, mas cuja aplicação pode ser estendida a outros tipos de veículos, inclusive militares, onde se procura menor peso e maiores níveis de resistência mecânica.

3 – **Aplicações do alumínio e suas ligas** Os característicos do alumínio e suas ligas, amplamente comentados durante esta exposição, tornam esse metal de grande utilidade onde se deve combinar boa resistência mecânica e razoável ductilidade, com baixo peso específico e boa resistência à corrosão. Assim sendo, praticamente todos os setores industriais podem ser beneficiados pelo emprego desses materiais, como se indica a seguir:

– *indústria aeronáutica* – na fabricação de fuselagens, motores, hélices, tanques para combustíveis líquidos e muitos outros acessórios, como pistões, cabeçotes dos cilindros, bombas de óleo, linhas de óleo, polias, caixas de instrumentos etc.;

– *indústria automobilística* – tambores de freio, corpos de carburadores e compressores, pistões, capas de distribuidor, linhas de combustível, bombas de combustível, buzinas, guarnições internas e externas, corpos de válvulas de transmissão, corpos e tampas de bombas de água, estatores e inúmeros outros componentes;

– *indústria ferroviária* – vagões de carga e passageiros, mobiliário e outros acessórios;

– *indústria naval* – cascos de barcos, estruturas de convés, janelas, vigias, escadas, equipamento de ventilação, botes salva-vidas, mobiliários, peças para fins decorativos e outros acessórios;

– *indústria elétrica* – além do seu emprego em cabos condutores armados de aço, outros empregos são feitos em partes estruturais, enrolamento de motores, em transformadores a seco, inclusive para certos tipos de enrolamentos etc.; na indústria eletrônica, em guias de ondas de radar e sonar, antenas de radar e televisão, chassis para equipamento eletrônico, parafusos, porcas, eletrodos de capacitores e outros componentes;

– *indústria de aparelhos eletro-domésticos* – componentes de aspiradores, de ferros elétricos, de máquinas de lavar pratos, de batedeiras etc.;

– *indústria de construção civil* – estruturas de edifícios, pontes, esquadrias etc.;

– *indústria química* – para processamento de petróleo, borracha etc.;

– *aplicações variadas* – móveis, equipamento de manuseio de material, de armazenamento e empacotamento de alimentos, em maquinária para mineração de carvão, equipamento têxtil, tubos de irrigação, utensílios de cozinha, instrumentos diversos como relógios, refletores, ferramentas portáteis, artigos decorativos no estado anodizado natural ou colorido, na forma de pós e pastas etc.

CAPÍTULO XIV

CHUMBO, ESTANHO, ZINCO E SUAS LIGAS

1 – Chumbo O chumbo, um dos metais mais antigos conhecidos pelo homem, possui uma densidade de 11,34 g/cm^2 a 20°C, um ponto de fusão equivalente a 327°C e reticulado cúbico de face centrada.

Apresenta baixa resistência mecânica, é muito mole, muito maleável e deformável e resistente à corrosão. Sua cor é cinza-azulada, devido a uma repentina formação de uma película superficial de óxido e carbonato.

A norma brasileira P-CB-9 da ABNT considera vários tipos de chumbo com teores de chumbo metálico variando de 99,5 a 99,99%, sendo as principais impurezas a prata, o arsênio, o bismuto, o cobre, o ferro, o antimônio, o estanho e o zinco.

Sua resistência à corrosão é elevada, inclusive sob a ação de certos ácidos como o sulfúrico.

Devido a essas propriedades, o chumbo e suas ligas são utilizados em aplicações tais como: revestimentos de cabos elétricos, de modo a evitar que a umidade do meio ambiente atinja o núcleo isolante do cabo; como solda; em tubos de água; em placas de acumuladores ou baterias; em ligas para mancais; em placas protetoras contra a ação de raios X e raios gama; como revestimento protetor e impermeabilizante em relação às intempéries; em aplicações químicas como aditivo de petróleo, pigmentos de tintas, em vidraria, aplicações de inseticidas etc.

Além disso, o chumbo é eventualmente aplicado em coberturas de telhados na forma de chapas, sobretudo para impermeabilização.

1.1 Tipos de chumbo e suas ligas Para o *revestimento de cabos elétricos*, emprega-se chumbo refinado (99,73% Pb) ou as seguintes ligas: chumbo-arsênio, contendo 0,12 a 0,20% As, 0,08 a 0,12% estanho e 0,05 a 0,15% bismuto; liga chumbo-cálcio, contendo 0,023 a 0,035% de cálcio, 0,02 a 0,10% de cobre, 0,002 a 0,02% de prata; e liga chumbo-antimônio, com 1% de antimônio.

Para *soldagem fraca*, em que o material de enchimento deve caracterizar-se por baixo ponto de fusão, geralmente inferior a 300°C, as ligas mais utilizadas são de chumbo-estanho, contendo de 18 até 50% de estanho. As de menor teor de estanho são empregadas na soldagem de lâmpadas elétricas; à medida que aumenta o teor de estanho, a aplicação é feita na soldagem de canos de chumbo, na soldagem sobre folhas de flandres etc. Ultrapassando-se o teor de 50% de estanho, entra-se nas ligas estanho-chumbo, aplicadas na soldagem de componentes que exigem soldas muito fluidas, como em aparelhos eletro-eletrônicos.

Para *tubos e chapas*, emprega-se o chumbo puro, que resiste à corrosão por parte de agentes químicos tais como acetileno, acetona, ácido crômico, ácido fluorídrico, ácido fosfórico, ácido sulfúrico, ácido sulfuroso, água clorada, água do mar, ar, álcool, amônia, benzol, bióxido de carbono, bióxido de enxofre, cloro, cloreto de sódio, combustível de motores, fenóis, hidróxidos de amônio e de sódio, tetracloreto de carbono, sulfato de sódio e muitos outros agentes químicos. O chumbo puro é, entretanto, severamente atacado por ácido nítrico e cloreto de magnésio. Quanto às ligas de chumbo empregadas em tubos e chapas, as mais importantes são as ligas chumbo-prata-cobre e chumbo-telúrio.

A liga chumbo-prata-cobre contém 0,003 a 0,005% de prata e 0,003 a 0,005% de cobre, o que melhora ligeiramente as resistências à tração e à fadiga e sensivelmente a resistência à fluência, permitindo maior pressão interna de água.

A liga chumbo-telúrio contém 0,05 a 0,10% de telúrio e 0,06% de cobre e caracteriza-se por ser a única liga de chumbo encruável, o que lhe confere maior resistência mecânica, à tração e à fadiga.

Na fabricação de tubos especiais para produtos químicos, emprega-se uma liga de chumbo contendo até 12,5% de antimônio; do mesmo modo, chapas de chumbo contendo de 6 a 8% de antimônio são utilizadas na fabricação de recipientes para produtos químicos e em revestimento de cubas de galvanização.

Em *grades de acumuladores*, emprega-se chumbo contendo 9% de antimônio.

No *revestimento para telhados* e em *chapas protetoras contra intempéries*, emprega-se principalmente o chumbo metálico ou, eventualmente, chapas compostas.

Do mesmo modo, o chumbo é utilizado para *isolamento acústico*, como *coxim para suporte de estruturas* e, como também foi mencionado, na *proteção contra irradiação*.

Outra aplicação do chumbo é feita nas chamadas *chapas chumbadas*, que são chapas de aço revestidas com uma liga chumbo-estanho, com 1 a 25% de estanho; este metal facilita o revestimento, pois confere o característico de tornar úmido ou molhado o metal de revestimento. O motivo da utilização desse tipo de material é combinar a resistência mecânica do aço comum com a resistência à corrosão do chumbo, de modo que essas chapas chumbadas são empregadas em tanques de gasolina, tampas de válvulas para motores de combustão interna, extintores, calhas e condutores de águas pluviais etc.

Finalmente, outra aplicação importante do chumbo é como metal-base para *mancais*.

As *ligas de chumbo para mancais* são conhecidas comercialmente com o nome de "metais babbitt";[61] compreendem, basicamente, dois tipos:

- ligas de chumbo, estanho, antimônio e, em muitos casos, arsênio;
- ligas de chumbo, cálcio, estanho e metais alcalino-terrosos.

A Tabela 33 indica os vários tipos. O arsênio é utilizado para melhorar as propriedades mecânicas, principalmente a temperaturas elevadas.

A liga mais usada é o tipo SAE 15 (ASTM 15) com 1% de arsênio. Os mancais para automóveis desse tipo de liga são confeccionados por fundição contínua de uma tira bimetálica aço-babbitt.

2 — **Estanho** O ponto de fusão do estanho é 232°C; seu peso específico 7,3 g/cm^3 e sua forma cristalina é tetragonal. Apresenta coloração branca prateada com tintura levemente amarelada.

É mole, dúctil e maléavel; possui baixa resistência mecânica e elevada resistência à corrosão.

É empregado na forma de folhas, chapas e fios estanhados e como elemento básico de certas ligas, como algumas para mancais e soldas, ou como elemento secundário de ligas importantes, como os bronzes.

O metal estanho, conforme especificação brasileira EB-173, admite pureza de 99,00 a 99,95% (estanho eletrolítico), podendo conter as seguintes

TABELA 33

TIPOS DE LIGAS DE CHUMBO PARA MANCAIS

Designação	Pb %	Sb %	Sn %	Cu %	As máx. %	Outros
	Tipos SAE–ASTM					
SAE 13,	rest.	10	6	0,50 máx.	0,25	—
SAE 14, ASTM 7	rest.	15	10	0,50 máx.	0,60	—
SAE 15, ASTM 15	rest.	15	1	0,50 máx.	1	—
	Tipos particulares					
A	95,65	—	3,35	0,08	—	0,67 Ca
B	83,30	12,54	0,84	0,10	3,05	—
C	82,16	15,12	0,96	0,50	1,08	—
D	73,74	9,87	11,63	1,91	1,14	1,48 Cd
E	71,78	14,82	10,32	1,58	0,73	0,52 Cd

impurezas: antimônio, arsênio, bismuto, cobre, ferro, chumbo, níquel mais cobalto, zinco e, eventualmente, prata, cádmio, alumínio e enxofre.

A principal aplicação do estanho faz-se na estanhação, por imersão a quente ou eletrodeposição, de chapas ou folhas de aço, originando-se as conhecidas *folhas de flandres*, que se caracterizam por elevada resistência à corrosão, de modo que seu uso em latas ou recipientes para embalagem de produtos alimentícios é generalizado.

O estanho possui ainda grande ductilidade e boa soldabilidade.

Outra aplicação do estanho é feita, devido a seu baixo ponto de fusão, em dispositivos de segurança contra o fogo, em alarmes, metais de soldagem e de vedação.

As *ligas de soldagem fraca* à base de estanho contêm 60 a 65% de estanho e são empregadas, como já se mencionou, quando da discussão das ligas de chumbo, para os mesmos fins, ou seja, em componentes que exigem soldas muito fluidas, como em aparelhos elétricos e eletrônicos.

Finalmente, outra aplicação importante do estanho dá-se em *ligas para mancais*, também chamadas "metais babbitt".

A Tabela 34[60] indica os principais tipos.

Como se vê, são essencialmente ligas de estanho contendo antimônio, cobre e chumbo.

Comparadas com outros materiais para mancais, essas ligas apresentam resistência à fadiga relativamente baixa, de modo que são mais recomendadas para condições de baixa carga. Entretanto, sua resistência à corrosão é bem maior que a das ligas à base de chumbo.

A mais usada na indústria automobilística é a nº 12 SAE (ASTM 2).

TABELA 34

TIPOS DE LIGAS DE ESTANHO PARA MANCAIS

Designação pela ASTM B23	Cu %	Sn %	Sb %	Pb máx. %
1	4,50	91,00	4,50	0,35
2	3,50	89,00	7,50	0,35
3	8,00	84,00	8,00	0,35
4	3,00	75,00	12,00	10,00
5	2,00	65,00	15,00	18,00
Designação SAE				
11	5,0/6,5	86,00	6,0/7,5	0,50
12	3,0/4,5	88,25	7,0/8,0	0,50

3 – Zinco O zinco apresenta uma densidade de 7,13 g/cm^3, um ponto de fusão de 419,4°C e forma cristalina hexagonal compacta.

Possui alta resistência à corrosão, porque ao ar úmido produz espontaneamente uma película protetora de hidrocarbonato; é muito maleável entre 100 e 150°C e pode ser laminado em chapas e estirado em fios. Possui boa usinabilidade e coloração branca azulada.

É atacado pelos ácidos usuais e por soda.

Emprega-se, principalmente, para recobrimento de chapas de aço (galvanizadas), como elemento de liga nos latões, em chapas para telhados e em calhas, em ligas para fundição sob pressão e como substância química na forma de pigmentos.

A ABNT, pela sua especificação P-EB-302, estabelece que o zinco metálico deve possuir de 98 a 99,95% de pureza; as impurezas normais são o chumbo, o cádmio, o chumbo mais cádmio e o ferro.

Como elemento de proteção contra a corrosão por parte da atmosfera, a principal aplicação do zinco reside na *galvanização do aço*, ou na proteção desta liga ou por outros métodos de deposição, como metalização, sherardização e pintura.

O material zincado é empregado em reservatórios, calhas, equipamento para laticínios, esquadrias de aço, tubos, torres de transmissão, ferragens de construção, arames e cabos etc.

Uma aplicação muito importante corresponde às *ligas para fundição sob pressão*, conhecidas com o nome de "zamac". Os elementos de liga usuais são alumínio, cobre e magnésio.

TABELA 35

PRINCIPAIS TIPOS DE LIGAS DE ZINCO PARA FUNDIÇÃO

Designação	Composição, %				Identificação comercial usual
	Al	Cu	Mg	Zn	
ZnA14	3,5 a 4,5	–	0,03 a 0,06	rest.	Zamac 3
ZnA14Cu	3,5 a 4,3	0,75 a 1,25	0,03 a 0,06	rest.	Zamac 5
ZnA14Cu3	3,5 a 4,3	2,5 a 3,0	0,03 a 0,06	rest.	Zamac 2
ZnA16Cu	5,6 a 6,0	1,2 a 1,6	–	–	Zamac 610

Essas ligas zamac apresentam baixo ponto de fusão (cerca de 385°C), boa fluidez, boas propriedades mecânicas, boa usinabilidade, além de poderem ser facilmente revestidas por eletrodeposição (cobreação, niquelação e cromação) ou por tintas e vernizes.

A Tabela 35[55] indica os principais tipos especificados pela ABNT (norma P-CB-10) de ligas de zinco para fundição.

As impurezas permitidas são ferro, chumbo, estanho, cádmio e, às vezes, magnésio.

A Tabela 36[55] representa as propriedades físicas e mecânicas dos tipos zamac 3 e zamac 5.

TABELA 36

CARACTERÍSTICOS FÍSICOS E MECÂNICOS DE DOIS TIPOS DE ZAMAC

Características	Zamac 3	Zamac 5
Densidade, g/cm^3	6,6	6,7
Intervalo de solidificação, °C	380–386	380–386
Retração, %	4–5	4–5
Coeficiente de dilatação, cm/cm/°C	27 X 10^{-6}	27 X 10^{-6}
Limite de resistência à tração, khf/mm^2	26–30	30–34
Limite de escoamento, kgf/mm^2	25–29	29–33
Módulo de elasticidade, kgf/mm^2	8.500	9.600
Alongamento, %	5–8	3–6
Resistência ao choque Charpy, kgf.m/cm^2	10–12	10,5–12,5
Limite de fadiga (10^8 ciclos), kgf/mm^2	4–8	5–7
Dureza Brinell (10 mm/500 kgf)	(80–90)	(85–95)

Essas ligas são utilizadas para fundir sob pressão, entre outras, as seguintes peças:

– componentes de automóveis, como grades de radiadores, armações de lanternas, maçanetas, fechaduras, corpos de instrumentos, corpos de bombas, tampas de tanques, botões de instrumentos, engrenagens de instrumentos etc.;

– componentes de aparelhos eletrodomésticos, como corpos de liquidificadores, batedeiras, aspiradores e ventiladores, maçanetas e dobradiças de refrigeradores, componentes de relógios, grades de rádios e televisores etc.;

– componentes de equipamentos elétricos, como coberturas de motores, roldanas, engrenagens, caixas terminais, botões de controle etc.;

– componentes de máquinas de calcular e de escritório;

– componentes de ferragens para construção civil;

– brinquedos e muitas outras aplicações.

Recentemente, foram desenvolvidas novas ligas para fundição sob pressão[55]. Entre elas incluem-se ILZRO* 14 e ILZRO 12, caracterizadas por conterem 0,5 a 1,5% de cobre, 0 a 13% de alumínio, 0 a 0,03% de magnésio, 0 a 0,30% de titânio e o restante, zinco.

Essas ligas possuem intervalo de solidificação mais elevado – 380°C a 432°C – e propriedades mecânicas melhores:

– limite de resistência à tração – 23 a 37 kgf/mm^2
– limite de escoamento – 14 a 22 kgf/mm^2
– alongamento em 50 mm – 5 a 7%
– dureza Vickers – 79 a 126 kgf/mm^2

Finalmente, outra aplicação do zinco é em material de *soldagem fraca*. Essas ligas apresentam boa penetração intergranular, o que confere uma junta de alta resistência.

As mais importantes são as seguintes:

– 60% Zn – 40% Cd – com faixa de fusão entre 265 e 335°C
– 70% Zn – 30% Sn – com faixa de fusão entre 199 e 375°C
– 90% Zn – 10% Cd – com faixa de fusão entre 265 e 399°C
– 95% Zn – 5% Al – com ponto de fusão de 382°C
– 100% Zn – – com ponto de fusão de 479°C.

* ILZRO = International Lead Zinc Research Organization.

CAPÍTULO XV

OUTROS METAIS E LIGAS NÃO-FERROSOS

1 – Níquel Seu ponto de fusão é 1.455°C e o peso específico de 8,88 g/cm^3. Apresenta coloração branca com tintura acizentada. Possui excelente resistência à corrosão, é maleável, podendo ser facilmente trabalhado, inclusive por deformação a frio, o que melhora a sua resistência. Muito tenaz; não é tratável termicamente. Possui razoável usinabilidade. Sob muitos aspectos, assemelha-se ao aço meio duro.

Suas principais aplicações são feitas como revestimento protetor do aço (niquelação), como elemento de liga nos produtos siderúrgicos, onde o seu emprego é muito importante, sendo os principais exemplos os aços inoxidáveis, os aços refratários e o Ni-Resist; igualmente é para o cobre um importante elemento de liga, sendo os principais exemplos as ligas cupro-níquel e as alpacas.

Os vários tipos de níquel são especificados pela ASTM ou por marcas registradas por fabricantes. Entre elas incluem-se:(62)

– *Níquel "A"* (99,4 Ni + Co) – cujas aplicações mais importantes são feitas na indústria química, na produção de soda cáustica, revestimento de níquel, peças resistentes ao calor etc.;

– *Níquel "D"* (99 Ni – 4,5 Mn) – que possui maior resistência à corrosão pela ação de compostos de enxofre a temperaturas elevadas, tanto em atmosferas oxidantes como redutoras; uma aplicação típica consiste em fios de velas de ignição;

– *"Duranickel"* (94 Ni – 4,5 Al) – utilizada em aplicações industriais que exigem alta resistência mecânica e elevada resistência à corrosão. Exemplos: varetas de bombas, molas, eixos etc.;

– *"Cast Nickel"* (97 Ni – 1,5 Si) – para equipamento de manuseio de substâncias corrosivas, tais como materiais cáusticos, e quando se deseja evitar contaminação de um produto pela ação de metais como o cobre e o ferro.

Entre as ligas à base de níquel, deve ser destacada a denominada *metal Monel*, contendo 60 a 70% de níquel, 29% de cobre e traços de ferro, silício, enxofre, carbono e manganês.

O "metal Monel" é tenaz, possui resistência mecânica superior à do aço de médio carbono e excelente resistência à corrosão. Por esses motivos, é empregado em equipamento hospitalar, equipamento para indústria química, farmacêutica, têxtil, elétrica, marítima, papel, para manuseio de alimentos, válvulas para vapor e aplicações semelhantes.

Existe um tipo de "metal Monel" indicado pela letra "K", contendo 66% de níquel, 29% de cobre e 3% de alumínio, utilizado em aplicações industriais onde se deseja alta resistência mecânica e à corrosão, sobretudo em grandes seções e em componentes não magnéticos para aviões, em varetas de bombas, molas, eixos etc.

As outras ligas importantes de níquel, como Inconel, Hastelloy, Ni-Cr etc., empregadas na confecção de partes sujeitas a temperaturas elevadas, serão estudadas no Capítulo correspondente.

2 – Magnésio Pertence ao grupo dos chamados metais leves, pois seu peso específico é 1,74 g/cm^3. Seu ponto de fusão é de 650°C e sua cor é branco prateado. É um metal relativamente mole e maleável, porém sua ductilidade é baixa, assim como sua resistência mecânica e sua tenacidade. Resiste à ação dos álcalis. Pode ser forjado, extrudado, laminado, fundido em areia, em molde permanente e sob pressão. Apresenta boa usinabilidade.

Devido a seu reticulado cristalino hexagonal, o magnésio é conformado mais facilmente a quente (entre 160° e 400°C) do que a frio.

Para fundição em areia e em molde permanente, as ligas principais são:(63)

– magnésio-alumínio-manganês, contendo 10% de alumínio e 0,10% mín. de manganês;

– magnésio-alumínio-zinco, contendo de 6,0 a 9,0% de alumínio, 0,10% mín. de manganês e de 0,7 a 3,0% de zinco;

– magnésio-terras raras-zircônio, contendo zinco de 0 a 4,2%, zircônio de 0,3 a 0,7% e terras raras de 1,2 a 4,0%;

– magnésio-zinco-zircônio, contendo de 4,6 a 6,0% de zinco e 0,7% de zircônio;

– magnésio-tório-zircônio, contendo de 0 a 5,7% de zinco, 1,8 a 3,3% de tório e 0,7% de zircônio.

As de maior resistência mecânica são as que contêm zinco e zircônio ou zinco, tório e zircônio. Elas podem atingir um limite de escoamento variável de 16,5 a 19,5 kgf/mm^2. O limite de resistência à tração varia de 17,5 a 22,5 kgf/mm^2.

Para fundição sob pressão, as ligas contêm cerca de 9,0% de alumínio, mín. de manganês e de 0,7 a 3,0% de zinco. Seu limite de escoamento pode atingir 15,5 kgf/mm^2.

Para barras e perfis extrudados, as ligas podem conter de 0 a 8,5% de alumínio, de 0 a 5,5% de zinco, de 0 a 3,0% de tório e eventualmente manganês (1,2%) e zircônio (0,45%). As de maior limite de escoamento – da ordem de 30,5 kgf/mm^2 – são as que possuem 5,5% de zinco e 0,45% mín. de zircônio.

Finalmente, as ligas para chapas e folhas contêm de 0 a 3,3% de alumínio, 0 a 1,3% de zinco, 0 a 3,0% de tório e, eventualmente, manganês (0,60% mín.) e zircônio (0,6%).

As aplicações do magnésio, principalmente na forma de ligas, são feitas na indústria aeronáutica (componentes de motores, fuselagem, trem de aterrissagem), na indústria automobilística (caixas de engrenagens etc.) e em componentes de máquinas operatrizes, máquinas de escrever, máquinas de calcular, máquinas fotográficas, aparelhos elétricos, aparelhos óticos etc.

3 – Titânio Este metal, já chamado metal do futuro, possui densidade de 4,5 g/cm^3 e ponto de fusão de 1.668°C. Caracteriza-se por excelente resistência à corrosão, sendo o único metal realmente imune à ação corrosiva da água do mar,(64) o que o torna indicado em aplicações da indústria naval e em condições de resistência à ação de soluções cloradas e de cloretos químicos, donde suas possibilidades de emprego na indústria petroquímica.

Do mesmo modo resiste bem à ação dos ácidos nítrico, crômico e sulfúrico, a frio e a quente, mesmo em altas concentrações.

Devido a seu alto ponto de fusão, embora menos que o dos metais chamados "refratários", a serem estudados mais adiante, o titânio apresenta boa estabilidade a temperaturas relativamente elevadas, não se modificando praticamente a estabilidade da estrutura cristalina, a essas temperaturas, sobretudo se certos elementos de liga forem introduzidos.

Assim, certas ligas de titânio mantêm satisfatória resistência mecânica e boa resistência à oxidação a 530°C, por períodos longos e a 760°C, por períodos curtos, como pode ocorrer no caso de mísseis.

Também a baixas temperaturas, o titânio é muito estável, o que o torna recomendável na fabricação de recipientes para produtos químicos a temperaturas abaixo de zero.

Os principais tipos de titânio e ligas são os seguintes:(65)

– *99,2% Ti* – com limite de resistência à tração de 40,6 kgf/mm^2, limite convencional n de 28 kgf/mm^2, alongamento em 2" de 20%. Empregado onde se deseja ductilidade para conformação mecânica e resistência mecânica razoável;

– *99,0% Ti* – com resistência mecânica intermediária e boa ductilidade; empregado onde esses característicos são exigidos;

– *Ti – 6Al – 4V* – esta liga foi dentre as primeiras a serem comercializadas e é a mais importante. Sua resistência à tração pode atingir valores próximos a 108 kgf/mm^2; tratada termicamente por solubilização entre 850° e 950°C, entre 15 a 30 minutos, resfriada em água e envelhecida entre 480° e 540°C durante 4 a 8 horas e resfriada ao ar, pode atingir valores de resistência à tração da ordem de 125 kgf/mm^2, limite de escoamento de 110 kgf/mm^2 e alongamento de 7%. Suas aplicações principais são feitas em discos e lâminas de compressor de turbinas a gás para aviões, partes extrudadas e chapas para fuselagens e aplicações análogas na indústria aeronáutica, onde as principais aplicações das ligas de titânio são feitas devido à elevada relação resistência mecânica/peso;

– *Ti – 8Mn* – também dentre as primeiras a serem comercializadas; apresenta boa conformabilidade e destina-se a aplicações estruturais de aviões;

– *Ti – 5Al – 2,5Sn* – esta liga não é endurecível por precipitação. Porém, mesmo no estado recozido, apresenta elevada resistência à tração, que pode atingir valores da ordem de 90 kgf/mm^2. Uma das aplicações típicas tem sido na forma de chapas para caixas de compressores de turbinas a gás e caixas de palhetas diretrizes de turbinas;

– *Ti – 4Al – 4Mn* – utilizada em peças forjadas para aviões a jato.

Outras ligas de titânio, cuja principal aplicação se faz sempre na indústria aeronáutica, podem incluir ferro, cromo e molibdênio ou simultaneamente alumínio, ferro, cromo e molibdênio.

Um exemplo do primeiro tipo é a liga Ti – 2Fe –2Cr – 2Mo e da segunda liga é Ti – 5Al – 1,5Fe – 1,4Cr – 1,2Mo.

O titânio, metal relativamente abundante na crosta terrestre, embora ainda de custo elevado devido às técnicas empregadas na sua produção, possui de fato, sobretudo quando ligado, qualidades excepcionais de resistência mecânica, resistência à corrosão e peso específico (relativamente baixo) que o indicam como um material cuja aplicação crescerá continuamente, sobretudo na indústria aeronáutica e de mísseis, onde aqueles requisitos são fundamentais.

CAPÍTULO XVI

MATERIAIS PARA FERRAMENTAS E MATRIZES

1 – Introdução Neste capítulo serão estudados os materiais destinados a matrizes e moldes para conformação mecânica e às ferramentas de corte, aqui incluídas ferramentas de usinagem com arranque de cavaco, ferramentas de percussão etc.

As propriedades fundamentais que esses materiais devem apresentar são dureza e resistência ao desgaste. Entretanto, para certas aplicações, a tenacidade torna-se igualmente uma qualidade necessária.

Em princípio, as qualidades exigidas nos materiais para ferramentas e matrizes, dependendo do tipo de serviço, estão representadas aproximadamente na Tabela 37.

Assim, a seleção dos materiais empregados em ferramentas e matrizes deve obedecer a uma série de requisitos, em função das operações a serem realizadas, os quais, uma vez atendidos, permitirão sua utilização em tempo mais longo e a um custo mais baixo.

Esses requisitos são os seguintes:

– *dureza à temperatura ambiente*, devido às funções de usinagem, corte, conformação ou penetração que esses materiais devem exercer;

– *resistência ao desgaste*, pelas mesmas razões e para que o material apresente a durabilidade necessária para tornar-se econômico, face ao fato dos materiais para ferramentas e matrizes serem de composição complexa e fabricação delicada e, portanto, de custo mais elevado;

BIBLIOTECA

TABELA 37

QUALIDADES GERAIS EXIGIDAS DE MATERIAIS PARA FERRAMENTAS E MATRIZES

Tipo de serviço	Qualidades principais	Qualidades secundárias
Usinagem	Dureza, resistência ao desgaste e resistência ao amolecimento pelo calor	Tenacidade
Corte	Resistência ao desgaste e tenacidade	–
Conformação	Resistência ao desgaste	Tenacidade
Estiramento	Resistência ao desgaste	–
Extrusão	Tenacidade, resistência ao desgaste e resistência ao amolecimento pelo calor	–
Laminação	Resistência ao desgaste	–
Percussão	Tenacidade	Resistência ao desgaste

– *tenacidade*, característico desejável geralmente em qualquer ferramenta ou matriz, mais dificilmente conciliável com a elevada dureza. Por essa razão, deve-se procurar um compromisso entre esses dois característicos, devendo ser considerado fundamental um ou outro, conforme as condições de serviço;

– *resistência mecânica*, que deve ser a mais alta possível como pode se prever;

– *dureza a quente*, talvez o mais importante entre todos os requisitos desejáveis; a dureza a quente é traduzida pela capacidade do material reter a dureza a temperaturas elevadas ou por sua resistência ao amolecimento pelo calor. Como se verá, os diversos materiais de ferramentas comportam-se de modo diferente nesse sentido, de modo que as condições de serviço constituem, por assim dizer, o fator básico na sua seleção;

– *usinabilidade*, característico também dificilmente conciliável com elevada dureza, sobretudo no caso de matrizes de forma complexa. A relativamente pequena usinabilidade dos materiais para ferramentas e matrizes exige processos mais sofisticados de fabricação e usinagem.

Basicamente, a maioria dos materiais para ferramentas e matrizes pode ser agrupada nas seguintes classes:

1 – Aços
2 – Metal duro ou carbonetos duros sinterizados
3 – Ligas fundidas
4 – Materiais cerâmicos.

2 – **Aços** Nessas ligas, além dos requisitos acima mencionados, exige-se ainda:

– *elevada temperabilidade*, porque uma profundidade adequada de dureza garante perfeita uniformidade de característicos mecânicos em seções apreciáveis;

– *tamanho de grão*, o qual deve ser geralmente pequeno, ou seja, o aço deve apresentar granulação fina, que equivale a característicos mecânicos superiores.

Para alcançar os requisitos exigidos, dois são os fatores básicos:

– composição química
– tratamento térmico

– *composição química*, os aços para ferramentas e matrizes ou são simplesmente ao carbono ou, na maioria dos casos, aços-liga altamente ligados, com a presença de elementos tais como tungstênio, cromo, vanádio, molibdênio, cobalto etc., que tornam a sua estrutura cristalina muito complexa e tornam mais delicadas e difíceis as operações de fabricação e de tratamento térmico.

O *carbono* é o elemento essencial, pois, ao formar carbonetos complexos, confere a dureza à temperatura ambiente, a dureza a quente e a resistência ao desgaste, necessárias para as aplicações mais críticas. Conforme as condições de serviço, o teor de carbono varia desde valores médios, quando a tenacidade é altamente desejável, até valores próximos de 1,50%.

O *silício* e o *manganês* estão presentes como elementos desoxidantes; o manganês, em teor mais elevado que os normais, como elemento desoxidante (0,5 a 0,6%) melhora a temperabilidade.

O *cromo* é adicionado principalmente quando se deseja melhorar a temperabilidade. Além disso, aumenta a resistência mecânica, a dureza e a resistência ao desgaste.

O *vanádio*, quando presente, atua como desoxidante, como controlador do tamanho de grão e aumenta a temperabilidade. Além disso, forma carbonetos muito duros e estáveis, mesmo a temperaturas elevadas, contribuindo para o característico de dureza a quente.

O *tungstênio* é um dos mais importantes elementos de liga nos aços para ferramenta e matrizes mais complexa. Forma carbonetos, aumenta a dureza a quente e à temperatura ambiente e, com teor relativamente elevado, melhora muito a resistência ao desgaste. Nos teores mais elevados – 12 a 20% – é o principal elemento responsável pela *dureza a quente*, isto é, capacidade do aço reter a dureza até temperaturas da ordem de 600°C. A ação mais efetiva do tungstênio no sentido de conferir dureza a quente aos aços tem-se quando estão presentes, junto com o tungstênio, os elementos cromo e vanádio, pela formação de um carboneto complexo muito estável de fórmula $(Fe\,W\,Cr,V)_6C$.

O *cobalto* está presente em alguns tipos de aço, com o objetivo de contribuir para a dureza a quente.

Finalmente, o *molibdênio* é usado como substituto parcial do tungstênio, tendo, pois, os mesmos efeitos que este último. A prática mostra que apenas a metade da quantidade de molibdênio, em relação ao tungstênio, produz efeitos comparáveis; por exemplo: 6% Mo + 5% W equivalem a cerca de 18% de W.

– *tratamento térmico*, todos os aços para ferramentas e matrizes são utilizados no estado temperado e revenido.

Nos tipos mais comuns, simplesmente ao carbono ou com alguns elementos de liga em baixos teores, essas operações são levadas a efeito às temperaturas normais de têmperas e revenido, dependendo as mesmas apenas do teor de carbono e da dureza final desejada. Como a temperabilidade desses aços mais simples é baixa, a têmpera é realizada em água.

Nos aços mais complexos, com vários elementos de liga, alguns dos quais em teores elevados, a têmpera deve ser realizada a temperaturas muito elevadas, às vezes acima de 1.300°C, para garantir completa solução dos carbonetos complexos presentes nesses materiais. Por essa razão, pode ocorrer excessivo crescimento de grão. Esse fenômeno é atenuado pelo emprego de operações de pré-aquecimento, antes de aquecer-se à temperatura final; por exemplo, faz-se um pré-aquecimento entre 700° e 870°C, antes de aquecer-se em torno de 1.300°C.

Nesses aços mais complexos, a temperabilidade é muito alta, de modo que a têmpera pode ser feita em óleo, ao ar e até mesmo em banho de sal.

Em alguns tipos de aço para ferramentas e matrizes, desenvolve-se, como se verá, durante o revenido, o fenômeno de "endurecimento secundá-

rio". Consegue-se, em conseqüência, além do alívio de tensões, uma dureza da mesma ordem de grandeza que a obtida logo após a têmpera.

Os aços para ferramentas e matrizes podem ser classificados da seguinte maneira:

- aços temperáveis em água
- aços indeformáveis ou para trabalho a frio
- aços resistentes ao choque
- aços para trabalho a quente
- aços rápidos

2.1 **Aços temperáveis em água** São os aços mais simples e utilizados em aplicações de relativamente menor responsabilidade. A faixa de composição química é a seguinte:

C – 0,60 a 1,40%
Mn – 0,25%
Si – 0,25%

Alguns tipos, os melhores, contêm igualmente:

Cr – 0,25 a 0,50%
V – 0,25 a 0,50%

Nas classificações AISI e SAE são designados por W (de "water"), devido a serem temperados em água.

A têmpera é realizada entre 760° e 840°C e inferior à linha A_{cm} para os aços hipereutetóides, por razões conhecidas.

O revenido, que se segue imediatamente à têmpera, é feito entre 150° e 300°C.

Esses aços antes de serem conformados devem ser normalizados e recozidos e, depois de usinados, antes da têmpera, sofrem ainda um tratamento de alívio de tensões.

Os de menor carbono – entre 0,50 e 0,60% – são os mais tenazes, como é óbvio, e os de carbono mais elevado – 1,40% – são os que apresentam os melhores requisitos de dureza, sendo a tenacidade considerada secundária.

Assim, as suas aplicações são as seguintes:

– *aços com carbono até 0,75%* – onde se exige grande tenacidade, elevada resistência ao choque e adequada dureza; martelos, ferramentas de ferreiro, matrizes para forjamento em matriz etc.;

– *aços com carbono de 0,75 a 0,90%* – onde se exige ainda boa tenacidade com superfície dura, boas resistências ao desgaste e ao choque: formões, punções, ferramentas pneumáticas, lâminas de tesoura, matrizes para estampagem profunda, matrizes para forjamento rotativo etc.;

– *aços com carbono de 0,90 a 1,10%* – onde se exige gume cortante de alta dureza e boa resistência ao desgate: fresas, mandris, matrizes para corte, embutimento, estiramento, lâminas de faca, limas etc.;

– *aços com carbono de 1,10 a 1,40%* – onde se exige gume cortante de máxima dureza e resistência ao desgaste: ferramentas de torno, de plaina, brocas, alargadores, matrizes para estiramento, ferramentas para trabalho em madeira, navalhas etc.

2.2 **Aços indeformáveis ou para trabalho a frio** São, dentre os tipos de aço para ferramentas e matrizes, os menos suscetíveis a alterações de forma e dimensões durante o tratamento térmico, motivo pelo qual são chamados "indeformáveis".

Nas classificações AISI e SAE, tais aços são designados pelas letras:

"O" – quando de baixa liga e temperáveis em óleo
"A" – quando de média liga e temperáveis ao ar
"D" – quando de alta liga e temperáveis em óleo ou ao ar.

Os aços designados por "O", conforme o tipo, possuem carbono de 0,90% a 1,20%, Mn de 0,25 a 1,60%, Si igual a 0,25%, Cr de 0 a 0,75%, W de 0 a 1,75% e, opcionalmente, 0,25% de Mo. Apresentam temperabilidade média, regular tenacidade, boa resistência ao desgaste, boa usinabilidade e pequena resistência ao amolecimento pelo calor. Sob o ponto de vista de indeformabilidade, este característico é muito bom.

São temperados entre 760°C – para os tipos sem elementos de liga – e 885°C, para os tipos mais ligados.

Entre as aplicações mais significativas citam-se matrizes de conformação a frio para pequenas séries, matrizes de corte, calibres e algumas ferramentas de usinagem que não geram, durante o serviço, altas temperaturas.

Os designados por "A" contêm carbono de 0,70 a 1,00%, manganês de 0,50 a 3,00%, cromo de 1,00 a 5,00% e 1,00% de molibdênio. A presença desses elementos confere grande profundidade de endurecimento e resistência ao desgaste muito boa. A usinabilidade é apenas regular, assim como a tenacidade, porém a propriedade de indeformabilidade é excelente.

São temperados ao ar, entre 790° e 980°C, as temperaturas mais elevadas indicadas para os que contêm 5,00% de cromo.

Entre as aplicações mais importantes citam-se matrizes de formas complexas, matrizes para laminação de roscas e ferramentas de produzir fendas.

Os aços designados por "D" são os de mais altos carbono e cromo: 1,00 a 2,25% para o carbono e 12,00% para o cromo, além de 1,0% de molibdênio e, eventualmente, 3,0% de cobalto e 1,0% de tungstênio.

São temperados entre 955° e 1.040°C, conforme o tipo, em óleo ou ao ar.

Apresentam pequena tenacidade, excelente resistência ao desgaste, pequena usinabilidade e regular resistência ao amolecimento pelo calor. Apresentam ainda grande profundidade de endurecimento e excelente propriedade de indeformabilidade.

Por tudo isso, suas aplicações são, entre outras: matrizes de conformação e corte para grandes séries, matrizes para laminação de roscas, moldes para tijolos, revestimentos resistentes à abrasão, calibres etc.

2.3 **Aços resistentes ao choque** São designados pela SAE e AISI pelas letras L e S. Possuem carbono médio – 0,50% – pela tenacidade que se exige; – manganês de 0,25 a 0,80%, silício de 0,25 a 2,00%, eventualmente cromo de 1,00 a 1,50%, vanádio 0,20%, tungstênio 2,50% e molibdênio 0,40 a 0,50%.

São geralmente temperados em óleo, entre 850° e 980°C. A faixa mais elevada de temperatura é para aços com 1,50% de cromo e 2,50% de tungstênio.

Sua tenacidade varia de muito boa a excelente, porém suas resistências ao desgaste e ao amolecimento pelo calor são apenas regulares, do mesmo modo que a usinabilidade. A profundidade de endurecimento é média.

Suas principais aplicações são: cinzéis, martelos, talhadeiras, quer manuais quer pneumáticas, brocas para concreto e para rochas, punções, ferramentas de ferreiro, lâminas de tesoura para corte a frio e a quente etc.

2.4 **Aços para trabalho a quente** Esses aços são designados pela AISI e SAE com letras H e dividem-se em quatro grupos:

- *ao Cr-Mo* – tipos H11, H12, H13 e H15
- *ao Cr-W* – tipos H14 e H16
- *ao W* – tipos H20, H21, H22, H24 e H26
- *ao Mo* – tipos H41, H42 e H43.

Os primeiros caracterizam-se por apresentarem baixo carbono, entre 0,35 e 0,40%, baixo manganês, entre 0,25 e 0,30%, silício entre 0,50 e 1,00%, cromo em torno de 5,00%, molibdênio entre 1,50 e 5,00%, eventualmente vanádio de 0,40 a 1,00%, tungstênio em torno de 1,50%.

São temperados ao ar, entre 980° e 1.232°C, as temperaturas mais elevadas aplicando-se aos que contêm 5,00% de molibdênio.

Apresentam boa tenacidade, regular resistência ao desgaste, regular usinabilidade, boa resistência ao amolecimento pelo calor, boa propriedade de indeformabilidade e grande profundidade de endurecimento.

São os mais utilizados. Entre as aplicações mais significativas contam-se: matrizes para fundição sob pressão, matrizes de forjamento, mandris para trabalho a quente, ferramental para extrusão a quente, lâminas de tesoura para corte a quente, punções etc.

Os tipos ao Cr-W caracterizam-se por possuírem médio carbono, entre 0,40 e 0,55%, manganês entre 0,30 e 0,60%, silício entre 1,00 e 1,50%, cromo de 5,00 a 7,00% e tungstênio de 5,00 a 7,00%.

São temperados entre 980° e 1.180°C, ao ar ou óleo.

Apresentam boa tenacidade e regular resistência ao desgaste e usinabilidade; boa propriedade de indeformabilidade, grande profundidade de endurecimento e boa resistência ao amolecimento pelo calor.

Aplicam-se em matrizes de extrusão de aço, cobre ou latão, moldes permanentes para fundição de latão, punções para trabalho a quente etc.

Os tipos ao W caracterizam-se por teor de carbono entre 0,35 e 0,50%, silício em torno de 0,25%, manganês em torno de 0,25%, cromo entre 2,00 e 4,00%, tungstênio entre 9,00 e 18,00% e, eventualmente, 1,00% de vanádio.

Devido à presença de elementos de liga em teores mais elevados, a faixa de temperaturas para a têmpera é mais alta: de 1.090° a 1.230°C.

A tenacidade varia de regular a boa, do mesmo modo que a resistência ao desgaste; a usinabilidade é regular, a profundidade de endurecimento é grande, a propriedade de indeformabilidade é boa e a resistência ao amolecimento pelo calor varia de boa a muito boa, sendo que os tipos de maior teor de tungstênio apresentam maior dureza a quente.

Nesses aços, devido às elevadas temperaturas de aquecimento para a têmpera, recomenda-se pré-aquecimento entre 815° e 900°C.

Suas aplicações são, entre outras, matrizes para extrusão de latão, bronze e aço, matrizes para prensagem e forjamento, punções para trabalho a quente.

Finalmente, os tipos ao Mo apresentam carbono entre 0,55 e 0,65%, silício 0,25% a 0,50%, manganês 0,25%, cromo 4,0%, vanádio de 1,00 a 2,00%, molibdênio de 5,00 a 8,00% e, eventualmente, 1,50 a 6,00% de tungstênio.

Sua tenacidade é boa e sua resistência ao desgaste e usinabilidade são regulares. A endurecibilidade é elevada, assim como são boas as propriedades de indeformabilidade e a resistência ao amolecimento pelo calor.

São temperados ao ar ou em óleo, entre 1.065° e 1.230°C.

São os aços menos empregados entre os tipos considerados.

2.5 **Aços rápidos** Constituem estes aços o grupo mais importante de aços para ferramentas e matrizes, porque são eles que apresentam o melhor comportamento sob o ponto de vista de amolecimento pelo calor.

Esses materiais são classificados pela AISI e SAE em quatro grandes grupos:

– *ao W*, designados pela letra T, compreendendo os tipos T1, T2, T3, T7 e T9;

– *ao W-Co*, ainda designados pela letra T, compreendendo os tipos T4, T5, T6 e T8;

– *ao Mo*, designados pela letra M, compreendendo os tipos M1, M2, M3, M4 e M10;

– *ao Mo-Co*, designados também pela letra M, compreendendo os tipos M6, M30, M34, M35 e M36.

Na realidade, há dois grandes grupos: T, ao tungstênio e M, ao molibdênio, dos quais se originam os grupos com cobalto.

Em todos eles, o carbono é elevado, variando de 0,70 a 1,30%; o manganês e o silício mantêm-se, respectivamente, em teores de 0,30 e 0,25%. Em todos, o cromo corresponde a 4,00 e, eventualmente 4,50%.

No grupo "ao tungstênio", este metal varia de 14 a 20% e o vanádio de 1 a 4%.

O tipo mais conhecido é o "18-4-1", caracterizado por apresentar, em média, 18% de tungstênio, 4% de cromo e 1% de vanádio.

No grupo "ao tungstênio-cobalto", este último metal varia de 5 a 12%.

No grupo "ao molibdênio", o tungstênio varia de 0 a 6,0% e o molibdênio de 4,5 a 8,0%; o vanádio de 1,0 a 4,0%.

Finalmente, no grupo "ao molibdênio-cobalto", o tungstênio varia de 2,0 a 6,0%, o molibdênio de 5,0 a 8,0% e o cobalto de 5 a 12%.

Como já se mencionou, o molibdênio é introduzido como substituto parcial do tungstênio, produzindo os mesmos efeitos que este elemento.

O vanádio forma os carbonetos mais duros; desse modo, os aços rápidos com alto teor de carbono e alto teor de vanádio são os que possuem melhor

resistência ao desgaste, melhor eficiência de corte e são chamados aços "super-rápidos".

O cobalto é introduzido para aumentar a dureza a quente, melhorando assim a eficiência de corte.

A Figura 60 mostra, comparativamente, a dureza a quente de três tipos de aços rápidos, comprovando a afirmativa acima, pois a curva mais alta (tracejada) corresponde a um aço rápido contendo 4,5% de cobalto.

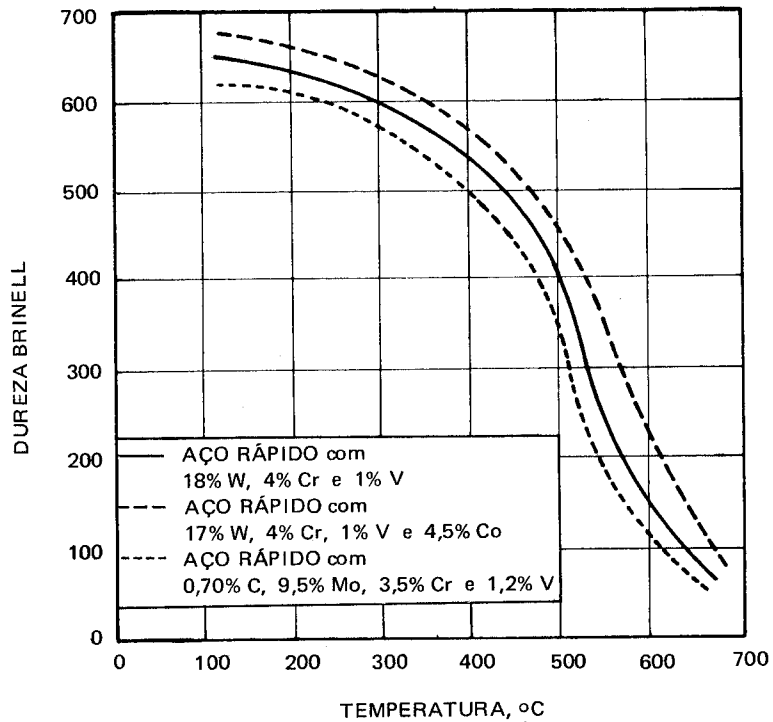


Figura 60 *Dureza a quente de três tipos de aços rápidos.*

Essa qualidade do cobalto levou ao desenvolvimento dos "aços rápidos ao cobalto de elevada dureza" (69 a 70 Rockwell C), denominados de "aços rápidos ultraduros".

Designados ainda pela letra M, compreendem os tipos M41, M42, M43, M44, M45, M46 AISI, com teores de carbono entre 1,10 e 1,25%, tungstênio entre 1,50 e 8,25%, molibdênio entre 3,75 e 9,50%, cromo entre 3,75 e 4,25%, vanádio entre 1,15 e 3,20% e cobalto entre 5,00 e 12,00%.

Os aços rápidos apresentam, de um modo geral, conforme os tipos, resistência ao amolecimento pelo calor de muito boa a excelente, grande profundidade de endurecimento, resistência ao desgaste muito boa, regular usinabilidade, baixa tenacidade e boa propriedade de indeformabilidade.

A têmpera desses aços exige temperaturas muito elevadas, face à necessidade de dissolver-se na austenita grande quantidade de carbonetos complexos.

A faixa de temperaturas, considerando todos os tipos de aços rápidos, vai de 1.180° a 1.315°C, o que aconselha operações de pré-aquecimento para eliminar o choque térmico que ocorreria pela colocação de peças frias nos fornos aquecidos a temperaturas corretas de austenitização, para eliminar-se o perigo de empenamento ou fissuração e prevenir-se, de certo modo, uma possível descarbonetação e evitar-se excessivo crescimento de grão.

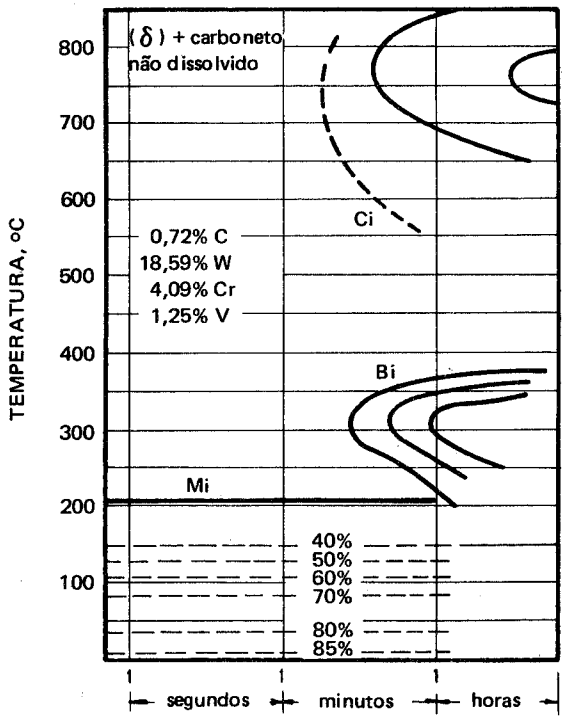


Figura 61 *Curva TTT do aço rápido tipo 18-4-1.*

A Figura 61, representa a curva em C para um aço rápido 18-4-1 austenitizado a 1.290°C. Percebe-se o notável deslocamento do joelho ou cotovelo das curvas, na faixa de formação da perlita, para cima e para a direita, fato esse indicativo da alta temperabilidade desses aços, o que permite resfriamento, na têmpera, a baixas velocidades, como pelo emprego de óleo, ar ou banho de sal mantido entre 540° e 650°C, que é a faixa de temperaturas em que não há indício de qualquer transformação da austenita. O aço, depois de mantido nessa faixa de temperatura o tempo suficiente para que a temperatura uniformize, é esfriado no meio de resfriamento escolhido.

Outro fato importante a observar, em relação ao diagrama de transformação da Figura 61, é a posição das linhas correspondentes à formação da martensita: a martensita começa a formar-se a cerca de 220°C, mas sua formação só é completada à temperatura pouco abaixo de −70°C.

Assim sendo, a estrutura do aço rápido temperado consiste de martensita e austenita retida, cuja quantidade pode variar de 5 a 30%.

Por essa razão, o revenido subseqüente é muito importante.

A estrutura temperada é constituída de martensita tetragonal altamente ligada, austenita retida altamente ligada e carbonetos residuais não dissolvidos (em quantidade de 5 a 12%).

O revenido é realizado pelo aquecimento do aço temperado a temperaturas entre 540° e 595°C.

Nessa operação ocorre o fenômeno, típico dos aços rápidos, de "endurecimento secundário". Pode-se dizer que o revenido dos aços rápidos compreende duas fases, conforme a Figura 62 mostra.

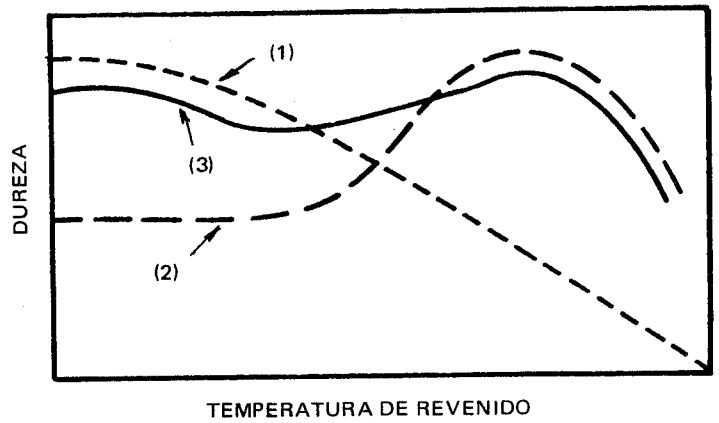


Figura 62 *Representação esquemática das duas fases em que se divide o revenido do aço rápido.*

A curva (1) representa a primeira fase, a qual corresponde à decomposição da martensita, resultando contínuo decréscimo da dureza; a curva (2) representa a segunda fase, em que ocorre a precipitação dos carbonetos de liga retidos na austenita, resultando no endurecimento que se nota. A soma aritmética das duas fases produz a curva (3), característica do revenido do aço rápido.

No revenido, ocorre transformação da austenita retida, o que ocasiona o aparecimento de tensões internas, motivo pelo qual é aconselhável realizar-se revenidos múltiplos, os quais servem também para revenir a martensita recém-formada pela transformação da austenita retida.

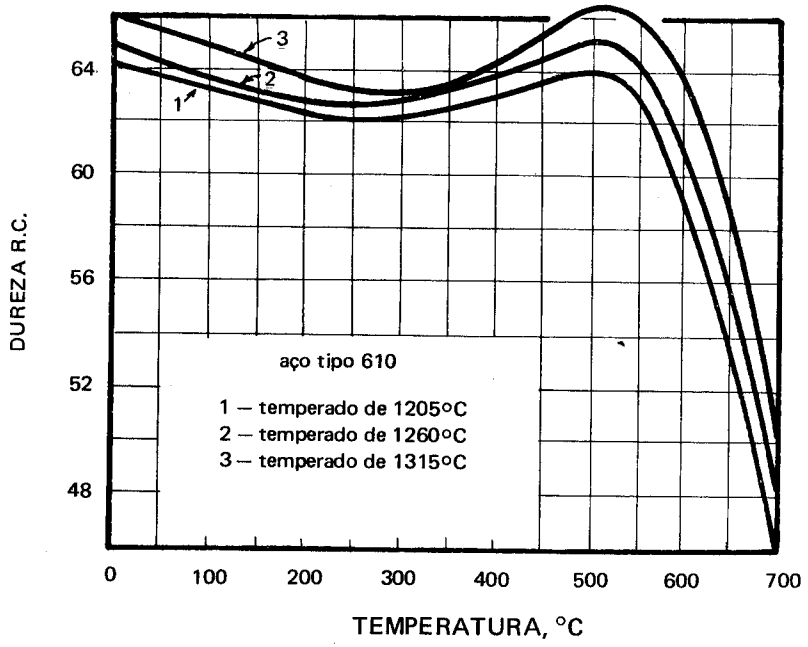


Figura 63 *Efeito da temperatura de revenido sobre a dureza do aço rápido 18-4-1 temperado em várias temperaturas.*

A Figura 63 mostra curvas de revenido para aço rápido do tipo 18-4-1 (610 ou T1), temperado em várias temperaturas.

2.5.1 **Seleção dos aços rápidos** Os aços rápidos são aplicados para usinagem de todos os tipos; contudo, nenhum tipo de aço satisfaz completamente a todas as exigências de uma ferramenta.

A Tabela 38 apresenta a composição química e os característicos fundamentais dos tipos mais comumente utilizados, inclusive alguns relativamente novos (M7, M15 e T15).

A rigor, os tipos M1, M2, M7, M10, T1 e T2 são os que apresentam melhor tenacidade, boa eficiência de corte, são mais fáceis de produzir e, assim, têm custo mais baixo.

Quanto maior o teor de vanádio, maiores a resistência ao desgaste e a dureza a quente. A adição de cobalto melhora ainda mais a dureza a quente e as ferramentas respectivas são indicadas na usinagem com cortes profundos e velocidades mais elevadas, portanto em condições mais severas de usinagem.

2.5.2 **Aços semi-rápidos** São tipos intermediários entre os aços-carbono e os aços rápidos, desenvolvidos durante a Segunda Guerra Mundial pelos alemães, contendo:

- carbono — 0,75 a 1,15%
- manganês — 0,10 a 0,40%
- silício — 0,10 a 0,40%
- cromo — 3,75 a 4,25%
- vanádio — 1,0 a 4,25%
- tungstênio — 0 a 3,00%
- molibdênio — 1,00 a 4,00% em função do tungstênio contido.

2.6 **Outros tipos de aços para ferramentas e matrizes** Entre eles, incluem-se:

— AISI L3 — com 1,00% C, 1,50% Cr e 0,20% V, para pistas de esfera de rolamento, mandris, mancais de esfera, calibres de precisão, brocas, machos de tarraxas, lâminas de faca, limas etc.;

— AISI L6 — com 0,70% C, 0,25% Mo, 0,75% Cr e 1,50% Ni, para árvores de máquinas operatrizes, matrizes de recortar discos, serras de disco, cubos, fusos de tornos, lâminas de tesouras, punções, porta-brocas ou pinças, suporte de ferramentas, serras para corte de madeira etc.;

— AISI F2, com 1,25% C e 3,50% W, para ferramentas de brunimento, matrizes para estiramento de fios e tubos, matrizes de extrusão, alargadores, machos, calibres de precisão, matrizes para estampagem profunda, matrizes de recalque a frio etc.;

— AISI P2, com 0,07% C, 0,20% Mo, 2,00% Cr e 0,50% Ni, no estado cementado, para matrizes empregadas na moldagem de plásticos;

— AISI P20, com 0,35% C, 0,40% Mo e 1,25% Cr para moldes para artigos de zinco e de plásticos, blocos de retenção de matrizes de fundição sob pressão etc.

TABELA 38

ALGUNS TIPOS DE AÇOS RÁPIDOS MAIS EMPREGADOS

Tipo	Composição química, %								Características fundamentais
	C	Si	Mn	W	Cr	V	Mo	Co	
M – 1	0,80	0,25	0,30	1,50	4,00	1,00	8,00	–	Resistência ao desgaste, tenacidade e dureza a quente
M – 2	0,85	0,25	0,30	6,00	4,00	2,00	5,00	–	Idem
M – 4	1,30	0,25	0,30	5,50	4,00	4,00	4,50	–	Idem
M – 7	1,00	0,30	0,30	1,50	4,00	2,00	8,50	–	Idem
M – 10	0,85	0,25	0,30	–	4,00	2,00	8,00	–	Idem
M – 15	1,55	0,30	0,30	6,50	4,50	5,00	4,00	5,00	Idem
T – 1	0,70	0,25	0,30	18,00	4,00	1,00	–	–	Idem
T – 2	0,85	0,25	0,30	18,00	4,00	2,00	–	–	Idem
T – 4	0,75	0,25	0,30	18,00	4,00	4,00	–	–	Resistência ao desgaste
T – 5	0,80	0,25	0,30	18,00	4,00	1,00	–	5,00	Resistência ao desgaste, tenacidade e dureza a quente
T – 15	1,55	0,30	0,30	13,00	4,50	5,00	–	5,00	Idem

3 – **Metal duro ou carbonetos duros sinterizados** É este o mais importante material empregado em ferramentas de usinagem, na indústria moderna. Vários tipos são igualmente utilizados em matrizes de conformação, principalmente de estiramento e trefilação, em ferramentas de percussão, em peças resistentes ao desgaste, em componentes de matrizes para metalurgia do pó e aplicações semelhantes.

O "metal duro" é um produto típico da "metalurgia do pó", ou seja, é fabricado a partir de pós metálicos, os quais, depois de convenientemente misturados são compactados em matrizes adequadas e submetidas à operação de sinterização, de modo a adquirir a estrutura e as propriedades necessárias ao seu emprego.

Basicamente, o metal duro é formado por dois constituintes:

– *carbonetos extremamente duros* e de alta resistência ao desgaste; o carboneto básico é o de tungstênio – WC – só ou associado a outros carbonetos – TiC e TaC(NbC). Tais carbonos são responsáveis pela alta dureza que caracteriza o metal duro, à temperatura ambiente e sua retenção a altas temperaturas e pela sua resistência ao desgaste;

– *elemento aglomerante* ou ligador – o cobalto – cuja função é aglomerar, durante a sinterização, as partículas de carbonetos sendo, em conseqüência, responsável pela tenacidade do material.

A sinterização dos compactados ou briquetes ou "pastilhas" comprimidas é feita sob a ação protetora do hidrogênio ou sob vácuo, a temperaturas que variam de 1.400° a 1.600°C, dependendo do tipo de mistura. As temperaturas mais baixas são usadas para as misturas mais simples, constituídas apenas de WC mais Co, enquanto as mais elevadas são destinadas às misturas contendo outros carbonetos, além do de tungstênio.

Admite-se que, durante a sinterização das misturas WC + Co forma-se uma fase líquida a 1.350°C.(66) Origina-se então uma solução de parte do WC em Co. No resfriamento, o WC dissolvido segrega-se e deposita-se sobre as partículas de WC não dissolvido; a máxima quantidade de WC dissolvido no cobalto é 38%, mediante uma sinterização muito prolongada. À temperatura ambiente, somente mantém-se dissolvido no cobalto 1% de WC. Isso leva a admitir que a precipitação do WC durante o resfriamento é essencial para conferir ao material os característicos desejados.

3.1 **Característicos gerais do metal duro** As propriedades fundamentais do metal duro são: dureza, tanto à temperatura ambiente como a temperaturas elevadas e resistência à ruptura transversal, característico este que se utiliza para avaliar sua tenacidade.

TABELA 39

CARACTERÍSTICOS FÍSICOS DO METAL DURO WC MAIS CO, EM FUNÇÃO DO TEOR DE COBALTO

Composição, %		Densidade g/cm³	Dureza Rockwell A	Resistência à ruptura transversal kgf/mm²	Resistência à compressão kgf/mm²	Módulo de elasticidade kgf/mm²
WC	Co					
100	–	15,7	92–94	30,1– 49,7	298	71.750
97	3	15,1–15,2	90–93	99,4–119,0	586	66.500
95,5	4,5	14,8–15,0	90–92	123,9–139,3	577	63.700
94–94,5*	5,5–6	14,8–15,0	90–91	158,9–180,2	497	61.600
94–94,5**	5,5–6	14,8–15,0	91–92	139,3–158,0	558	62.650
91	9	14,5–14,7	89–91	149,1–189,0	477	58.800
90	10	14,3–14,5	88,5–90,5	154,8–193,9	467	58.100
89	11	14,0–14,3	88–90	158,9–198,8	457	57.400
87	13	14,0–14,2	87–89	168,7–208,6	437	55.300
85	15	13,8–14,0	86–88	179,2–218,4	388	54.600

* Fase WC de granulação grosseira.
** Fase WC de granulação fina.

Costuma-se igualmente controlar sua densidade, sua porosidade e sua microestrutura.

A Tabela 39[67] mostra a variação de alguns dos característicos mencionados, em função do teor de cobalto. Nota-se também nos tipos com 5,5 a 6,0% de cobalto, a influência do tamanho de grão.

O gráfico da Figura 64[67] indica a "dureza a quente" de metal duro com 6% e 15% de cobalto comparativamente com a do aço rápido.

A presença de TiC favorece a dureza a quente.

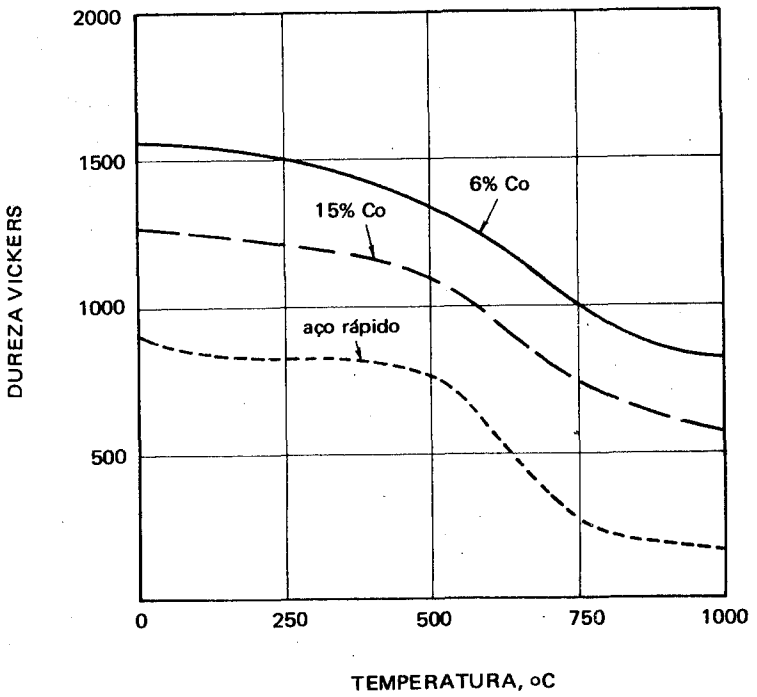


Figura 64 *Dureza a quente do metal duro de composição WC mais Co, comparada com a do aço rápido.*

A Tabela 40 mostra os característicos de tipos de metal duro contendo TiC e a Tabela 41, as propriedades comparativas de tipos contendo ou não TaC(NbC).

TABELA 40

CARACTERÍSTICOS FÍSICOS DE METAL DURO CONTENDO WC MAIS TiC MAIS Co

Composição, %			Densidade g/cm³	Dureza Rockwell A	Resistência à ruptura transversal kgf/mm²	Resistência à compressão kgf/mm²*	Módulo de elasticidade kgf/mm²
WC	TiC	Co					
94	1	5	14,5–14,7	90–91	139–159	556	63.000
87,5	2,5	10	14,0–14,2	89–90	159–179	457	56.700
84,5	2,5	13	13,7–13,8	87–89	179–199	447	54.600
86	5	9	13,2–13,4	89–91	149–159	457	58.800
82	5	13	12,8–13,0	88–90	159–179	—	—
82	10	8	11,8–12,0	90–91	149–169	—	—
78	14	8	11,1–11,3	90–91	129–139	417	53.900
78	16	6	11,0–11,2	90–91,5	109–124	427	51.800
76	16	8	10,9–11,1	90–91	119–129	—	—
69	25	6	9,6– 9,8	91–92	89–109	—	42.000
61	32	7	8,7– 9,0	92–93	79– 99	408	37.800

* Valores médios

A presença de TaC, com ou sem NbC, melhora a tenacidade.

TABELA 41

PROPRIEDADES COMPARATIVAS DE TIPOS DE METAL DURO CONTENDO OU NÃO TaC(NbC)

Composição, %				Dureza Rockwell A	Resistência à ruptura transversal kgf/mm²
WC	TiC	TaC(NbC)	Co		
53	40,5	0	6,5	92,5	79,5– 89,5
50,5	38	5	6,5	91,5	94,4–104,3
72	20,5	0	7,5	91,5	112,3–124,2
69,5	18	5	7,5	91,0	129,2–139,1
76,5	15	0	8,5	90,0	129,2–144,1
74,5	13	4	8,5	90,5	154,1–164,0
83,5	7,5	0	9,0	89,0	149,1–159,9
81	5	5	9,0	89,5	173,9–188,9
86,5	7	0	6,5	91,0	129,2–139,2
83,5	4	6	6,5	91,0	149,1–170,0

3.2 **Classes de metal duro** O metal duro pode ser dividido nos seguintes grupos:

(a) para usinagem de materiais que produzem cavacos curtos, como ferros fundidos;

(b) para usinagem de materiais que produzem cavacos longos, como o aço;

(c) para ferramentas de percussão utilizadas em mineração, construção civil etc.;

(d) para matrizes de extrusão, trefilação, estiramento e componentes em geral que exigem elevada resistência ao desgaste.

As classes (a), (c) e (d) são normalmente de composições mais simples – WC + Co – embora na usinagem de materiais de cavaco curto possa ocorrer, em alguns tipos, a presença de TiC.

A classe (b) destina-se à usinagem de materiais de cavaco longo; os tipos compreendidos nessa classe apresentam composições mais complexas – WC + TiC + Co ou WC + TiC + TaC(NbC) + Co.

TABELA 42

COMPOSIÇÃO QUÍMICA E CARACTERÍSTICOS FÍSICOS PRINCIPAIS DE METAL DURO SEGUNDO A NORMA ISO

Designação	Composição aproximada			Características principais			
	WC	TiC + TaC	Co	Densidade g/cm³	Dureza Vickers kgf/mm²	Resistência à ruptura transversal kgf/mm²	Módulo de elasticidade kgf/mm²
P 01	30	64	6	7,2	1.800	75	–
P 10	55	36	9	10,4	1.600	140	52.000
P 20	76	14	10	11,9	1.500	150	54.000
P 25	73	19	8	12,5	1.500	170	55.000
P 30	82	8	10	13,0	1.450	170	56.000
P 40	77	12	11	13,1	1.400	180	56.000
P 50	70	14	16	12,5	1.300	200	52.000
M 10	84	10	6	13,1	1.650	140	58.000
M 20	82	10	8	13,4	1.550	160	56.000
M 30	81	10	9	14,4	1.450	180	58.000
M 40	78	7	15	13,5	1.300	200	55.000
K 01	93	2	5	15,0	1.750	120	63.000
K 05	92	2	6	14,6	1.700	135	63.000
K 10	92	2	6	14,8	1.650	150	63.000
K 20	91,5	2,5	6	14,8	1.550	170	62.000
K 30	89	2	9	14,5	1.450	190	–
K 40	88	–	12	14,3	1.300	210	58.000

Existem, a rigor, classes de metal duro chamadas "universais", as quais se prestam para a usinagem de cavacos tanto curtos como longos.

A ISO (International Organization for Standardization) recomenda o agrupamento dos diversos tipos de metal duro em três grandes grupos, como está representado esquematicamente na Figura 65(67).

O grupo "P" é recomendado na usinagem de metais e ligas ferrosas que apresentam cavacos longos.

TABELA 43

PRINCIPAIS CAMPOS DE APLICAÇÃO DO METAL DURO DO GRUPO P, SEGUNDO A NORMA ISO

Designação		Campo de aplicação
Para materiais ferrosos de cavaco longo como aços e ferro fundido maleável	P01	Operações de acabamento fino, com avanços pequenos e altas velocidades, como torneamento e furação de precisão. Exige máquinas rígidas, isentas de vibração.
	P10	Idem – Também para aplicações em que ocorre grande aquecimento da ferramenta.
	P20	Operação de desbaste leve, com velocidades de médias a altas e avanços médios. Também em operações de plainamento com seções pequenas de cavaco.
	P25	Operações de desbaste com velocidades e avanços médios.
	P30	Operações com baixas a médias velocidades de corte e seções de cavaco médias a grandes: torneamento, fresagem, plainamento.
	P40	Operações de desbaste grosseiro e em condições severas de corte, como corte interrompido, mesmo em máquinas sujeitas a vibração; velocidades baixas a médias e grandes avanços e profundidades de corte; torneamento, plainamento.
	P50	Idem; é o tipo mais tenaz, aplicações em que se usam máquinas obsoletas, onde substitui o aço rápido com grande vantagem.

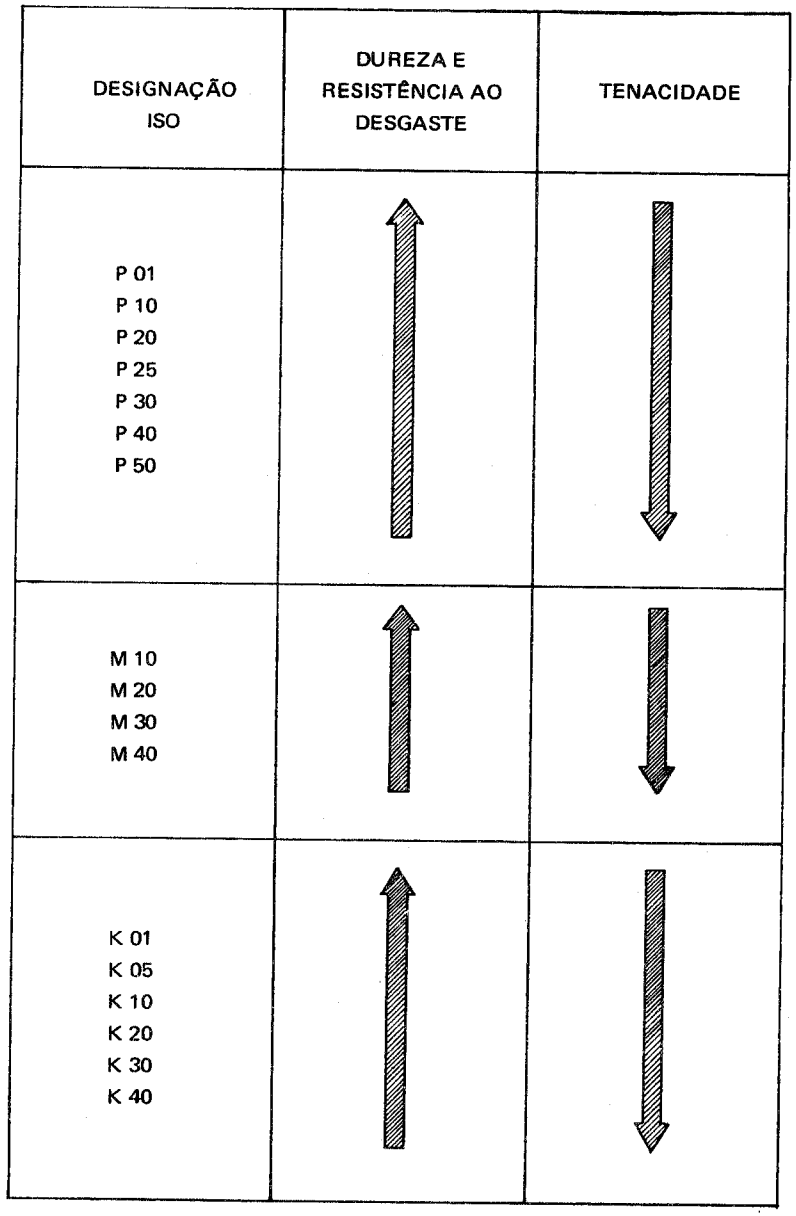


Figura 65 *Classificação dos tipos de metal duro, segundo a ISO.*

O grupo "M", na usinagem de metais e ligas ferrosos que apresentam cavacos tanto longos como curtos.

O grupo "K", na usinagem de metais ferrosos que apresentam cavacos curtos, metais e ligas não-ferrosos e materiais não-metálicos.

A Tabela 42 apresenta a composição aproximada e os característicos principais desses grupos.

As Tabelas 43 e 44 indicam os seus principais campos de aplicação.

TABELA 44

PRINCIPAIS CAMPOS DE APLICAÇÃO DO METAL DURO DOS GRUPOS M e K, SEGUNDO A NORMA ISO

Designação		Campo de aplicação
Classes universais: aços inclusive aços-liga, ferro fundido comum, ferro fundido nodular, ferro fundido maleável	M10	Operações de torneamento com velocidades médias a altas seções de cavaco médias.
	M20	Operações de torneamento, fresagem, plainamento, com velocidades de corte médias e seções de cavaco médias.
	M30	Idem, com seções de cavaco médias a grandes.
	M40	Torneamento, principalmente em máquinas automáticas.
Para materiais de cavaco curto: ferro fundido, aço temperado, metais não-ferrosos, madeiras	K01	Operações de acabamento fino e de precisão, como broqueamento e faceamento, com cortes leves e firmes, avanços pequenos e altas velocidades.
	K05	Operações de acabamento, como torneamento, alisamento e furação de precisão, com alta velocidade de corte.
	K10	Operações de usinagem em geral.
	K20	Idem, com avanços e velocidades médias.
	K30	Operações de desbaste, cortes interrompidos e profundos.
	K40	Idem, onde se têm condições muito desfavoráveis e se deve trabalhar com ângulos de saída grandes.

A norma ASA (American Standards Association) considera os tipos representados na Tabela 45. Nessa Tabela, o autor faz por tentativa, uma comparação com os tipos ISO.

TABELA 45

TIPOS DE METAL DURO SEGUNDO A NORMA ASA

Designação ASA	Tipo ISO aproximado	Campo de aplicação
C1	K30	Desbaste: ferro fundido e materiais não-ferrosos.
C2	K10	Fins gerais: ferro fundido e materiais não-ferrosos.
C3	K05	Cortes leves: ferro fundido e materiais não-ferrosos.
C4	K01	Furação de precisão: ferro fundido e materiais não-ferrosos.
C5	P40	Desbaste: aço.
C5A	P30	Desbaste e avanços grandes: aço.
C6	P25	Fins gerais: aço
C7	P20	Acabamento, grandes avanços: aço.
C7A	P10	Acabamento, avanços pequenos: aço.
C8	P01	Furação de precisão: aço.

A ASTME (American Society of Tool and Manufacturing Engineers)[68] elaborou o diagrama da Figura 66 para mostrar o efeito da composição sobre as propriedades do metal duro.

3.3 **Seleção do metal duro para usinagem** Na usinagem de metais e ligas como ferro fundido, latão, bronze etc., origina-se um cavaco curto. Com esse comportamento dos materiais sob usinagem, a principal causa de desgaste das ferramentas de metal duro é o atrito que se desenvolve no "flanco" ou "na superfície de incidência", à medida que se processa a usinagem.

Na usinagem de materiais como o aço, forma-se um cavaco longo, resultando um contato direto com a "face" ou a "superfície de ataque" da ferramenta, a uma pressão relativamente elevada. Essa pressão e mais o atrito desenvolvem, no ponto de contato, temperaturas que podem ser muito

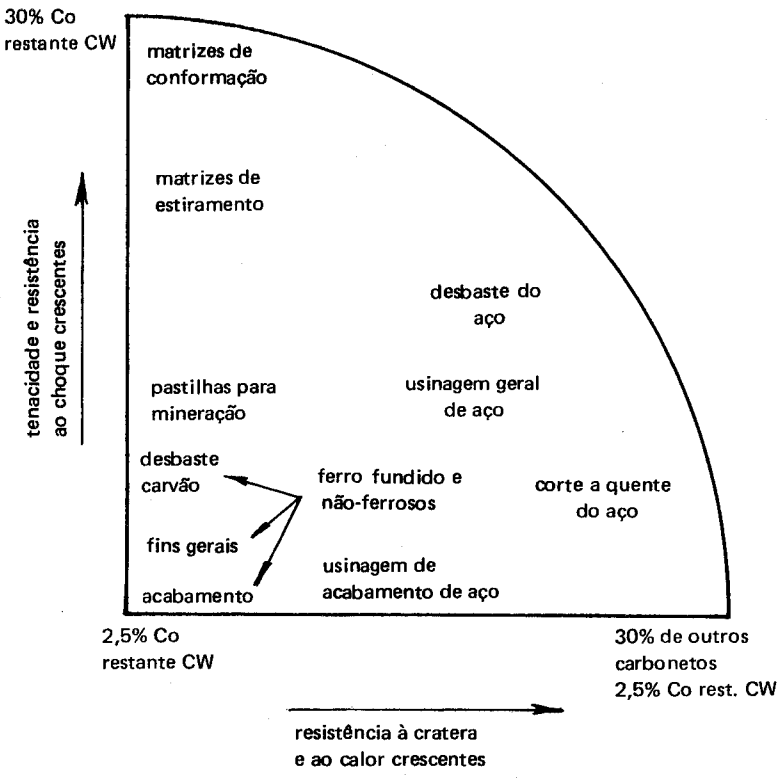


Figura 66 *Efeito da composição sobre as propriedades do metal duro.*

elevadas. Processa-se, então, como que uma soldagem numa área limitada, entre o cavaco e a ferramenta. À medida que o cavaco desliza sobre a superfície de ataque, pode ocorrer arrancamento de parte do material da ferramenta, resultando finalmente na formação de um sulco ou "cratera", como se pode verificar na Figura 67.

Continuando a usinagem, a cratera aprofunda-se e alarga-se de tal modo que enfraquece paulatinamente o ângulo do flanco e finalmente a ponta da ferramenta rompe.

Segundo Dawihl,[69] o fenômeno de formação da cratera está relacionado com a temperatura de soldagem ou caldeamento entre o material da ferramenta e o material sob usinagem. Os vários tipos de carbonetos possuem altas temperaturas de soldagem, sendo a mais elevada a do carboneto de titânio. O cobalto apresenta baixa temperatura de soldagem.

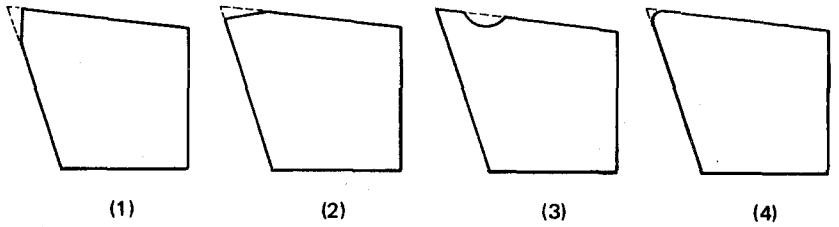


Figura 67 *Tipos gerais de desgaste de ferramentas de metal duro: (1) de superfície de incidência ou do flanco; (2) da superfície de saída; (3) por formação de cratera; (4) arredondamento da aresta de corte.*

A Tabela 46 indica as temperaturas de soldagem entre alguns tipos de metal duro e outros materiais com aço e ferro fundido. Vê-se, claramente, que as composições de metal duro contendo também carboneto de titânio apresentam maiores temperaturas de soldagem do que aquelas contendo apenas carboneto de tungstênio mais cobalto.

TABELA 46

TEMPERATURAS DE SOLDAGEM ENTRE METAL DURO E AÇO E FERRO FUNDIDO

	Temperatura de soldagem, °C
Aço de média resistência à tração com:	
cobalto	550
aço rápido temperado	575
WC mais 5% Co	625
WC mais 15% TiC mais 5% Co	775
Aço de alta resistência à tração com:	
cobalto	750
WC mais 5% Co	750
WC mais 15% TiC mais 5% Co	850
Ferro fundido de 200 Brinell com:	
WC mais 5% Co	700
WC mais 15% TiC mais 5% Co	825

Desse modo, para a usinagem de ligas como o aço, com cavaco longo, as classes mais simples não são recomendadas. Elas são apenas empregadas na usinagem de ligas de cavacos curtos, onde a tendência à soldagem é muito menor.

Além da maior temperatura de soldagem das classes contendo também TiC, admite-se, segundo Dawihl, que a resistência mecânica da solda resultante é consideravelmente menor do que aquela originada com metal duro sem TiC, exigindo, pois, menor esforço para arrancamento do material, depois de produzida a solda, com menor probabilidade de formação da cratera.

Finalmente, admite-se ainda que a presença de películas de óxidos possa diminuir o desgaste, ao impedir ou dificultar a formação da liga entre o material da ferramenta e o material sob usinagem; aparentemente, a formação de uma película de óxido seria favorecida pela presença de TiC.

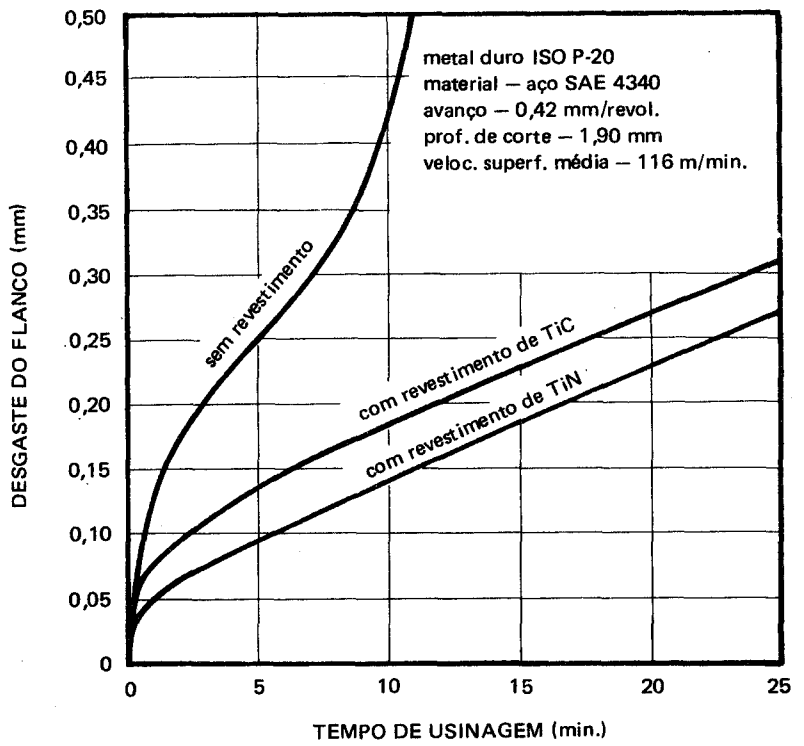


Figura 68 *Efeito dos revestimentos superficiais de TiC e TiN sobre o desgaste do flanco de ferramentas de metal duro.*

Nas operações de usinagem, o metal duro é empregado, na maioria dos casos, na forma de briquetes ou "pastilhas" soldadas ou fixadas mecanicamente em cabos ou suportes de aço.

TABELA 47

CAMPOS DE APLICAÇÃO DAS COMPOSIÇÕES WC MAIS Co

Grupo	Composição, %	
I	97 WC mais 3 Co 95,5 WC mais 4,5 Co	Usinagem de materiais não-metálicos como cerâmica, eletrodos de grafita etc. Usinagem de ferro fundido e metais não-ferrosos. Matrizes para estampagem a quente.
II	94,5 WC mais 5,5 Co 93,5 WC mais 6,5 Co	Usinagem de ferro fundido, de metais e ligas não-ferrosos, materiais plásticos e sintéticos. As classes com granulação mais fina são usadas na usinagem de ferro fundido coquilhado, ferro maleável, aço de alta resistência à tração, vidro, porcelana, pedras etc. Aplicam-se também em partes de instrumentos de medida, matrizes de estiramento etc.
III	91,0 WC mais 9 Co 89,0 WC mais 11 Co	Usinagem de madeira, resinas sintéticas, peças centrifugadas, desbaste de latão e bronze (sobretudo com máquinas obsoletas). Ferramentas de percussão e partes para resistir ao desgaste: matrizes de estiramento, estampagem etc.
IV	85 WC mais 15 Co 80 WC mais 20 Co 75 WC mais 25 Co 70 WC mais 30 Co	Peças para resistir ao desgaste exigindo alta tenacidade, como ferramentas para corte e estampagem, matrizes para forjamento rotativo etc.

3.4 **Tratamento superficial do metal duro** Para aumentar a vida das ferramentas de metal duro, os fabricantes desenvolveram, recentemente, processos de tratamento superficial, mediante um revestimento de nitreto de titânio ou de carboneto de titânio ou, simultaneamente, de nitreto e carboneto de titânio.

A Figura 68 mostra o efeito aparente sobre o desgaste do flanco da ferramenta, com revestimento e sem revestimento superficial.

3.5 **Outras aplicações do metal duro** Como já se mencionou, além de empregado na usinagem de metais e materiais não-metálicos, o metal duro tem outras importantes aplicações, nas quais, normalmente, são utilizadas as classes mais simples, constituídas de apenas carboneto de tungstênio e cobalto, com teores variáveis deste último metal.

A Tabela 47[70] apresenta os principais campos de aplicação dessas classes.

3.6 **Cermets** Trata-se de compostos "metal-material cerâmico", à base de carboneto de titânio TiC, com adição de carboneto de molibdênio e de níquel metálico como elemento aglomerante. O ferro é também empregado como elemento aglomerante.

Os "cermets" são mais frágeis que o metal duro, de modo que sua aplicação na usinagem de acabamento deve ser feita com altas velocidades e avanços de profundidade de corte de médios a baixos.

Contudo, seu desgaste é menor e, com seu emprego, obtém-se melhor acabamento superficial.

A Tabela 48[71] mostra o efeito do teor de Mo_2C sobre a dureza, resistência mecânica e densidade de cermets TiC-Mo_2C-Ni.

A Figura 69 mostra, comparativamente com ferramenta de metal duro convencional, o comportamento do "cermet" em usinagem de acabamento.

Esses materiais são empregados a velocidades superiores a 300 metros por minuto, de modo que são muito eficientes em operações de acabamento de aços ou furação de precisão.

Outras aplicações dos cermets incluem mancais, vedações e aplicações semelhantes, devido a sua elevada dureza, sua resistência ao desgaste, resistência a temperaturas elevadas e boa resistência à corrosão.

4 – **Ligas Fundidas** Essas ligas são à base de cobalto, cromo, tungstênio e molibdênio. Foram desenvolvidas e patenteadas por Haynes.[72] São produzidas por fusão, numa grande variedade de tipos com diferentes durezas.

TABELA 48

EFEITO DO TEOR DE Mo_2C NA DUREZA, RESISTÊNCIA MECÂNICA E DENSIDADE DE CERMETS TiC-Mo_2C-Ni

% TiC	% Mo_2C	% Ni	Dureza R.A.	Resistência à ruptura transversal kgf/mm²	Densidade g/cm³
85	0	15	91,5	70	5,5
82	3	15	92	70	5,2
77	8	15	92,5	70	6,0
73	12	15	92	70	6,1
65	20	15	92	79,8	6,2
55	30	15	91,5	84,7	6,4
42,5	42,5	15	91	89,6	6,9
0	85	15	82,5	59,5	8,8

Os tipos de dureza mais baixa possuem maior tenacidade e serão abordados no capítulo referente a materiais resistentes ao calor.

Os tipos mais duros, empregados em ferramentas e peças com propriedades de resistência ao desgaste, contêm de 25 a 30% de cromo. Os teores somados de tungstênio e molibdênio variam de 4 a 25%, mais comumente de 6 a 20%, de acordo com a dureza desejada. O carbono aparece em teores de 1 a 3% e é responsável por um notável efeito endurecedor. Como elemento desoxidante, estão presentes o manganês e o silício. Eventualmente, possuem vanádio, boro, tântalo, nióbio e níquel.

Essas ligas apresentam uma estrutura cristalina complexa; um dos constituintes presentes é um cristal hexagonal de carboneto de grandes dimensões, alongado ou de forma acicular, identificado como Cr_7C_3, onde algum cromo pode ser substituído por cobalto ou por tungstênio ou por ambos.

Essa estrutura é geralmente estável a temperaturas da ordem de 980° a 1.035°C.

Assim, uma de suas mais importantes propriedades é a "dureza a quente", donde sua aplicação em ferramentas de usinagem.

Sua dureza elevada confere-lhes baixa usinabilidade, de modo que as peças fundidas com dimensões muito próximas das finais, podem ser acabadas somente por retificação.

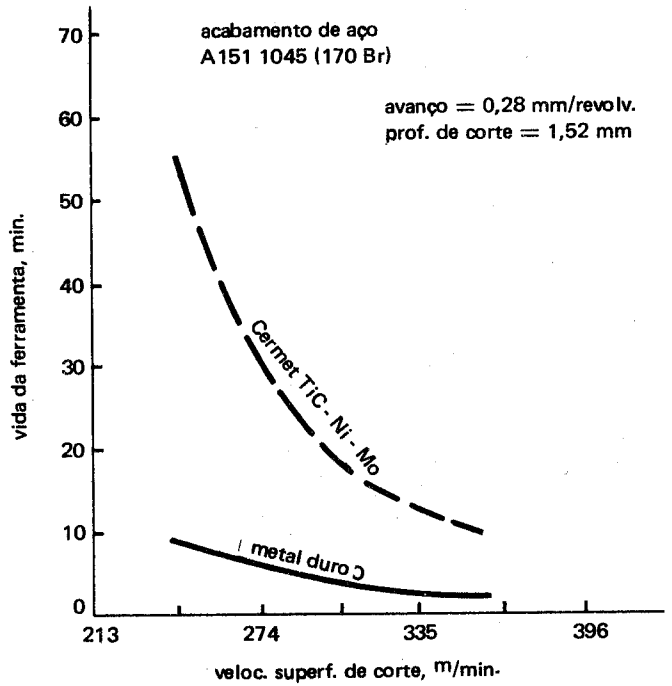


Figura 69 *Desempenho de cermet em comparação a metal duro, em usinagem de acabamento.*

São empregadas na usinagem de aço, ferro fundido, cinzento, ferro maleável, aço fundido, aço inoxidável, latão, bronze, alumínio e outros materiais.

São, por assim dizer, um produto intermediário entre aços rápidos e metal duro, de modo que podem usinar a velocidades maiores que as permitidas pelo aço rápido, mas inferiores à do metal duro. Entretanto, resistem ao choque, pressão e vibrações mais do que o metal duro.

5 — **Materiais cerâmicos** Esses materiais são constituídos de óxidos metálicos, sendo o óxido básico o Al_2O_3 ou "corindon", que é a forma estável da alumina.

São extremamente duros, inclusive a altas temperaturas, mas frágeis, de modo que, ao possibilitar velocidades de corte excepcionalmente elevadas, seu emprego só é recomendável quando as máquinas operatrizes oferecem condições de rigidez e potência que permitam tais velocidades praticamente sem vibrações.

São obtidos por sinterização. Além dos tipos constituídos fundamentalmente de alumina sinterizada quase que pura (98% mín.), há os que são constituídos de um mínimo de 90% de alumina com outros óxidos tais como SiO_2, MgO, Cr_2O_3 e Fe_3O_4.

As peças são produzidas em forma de briquetes ou pastilhas e fixadas mecanicamente no cabo da ferramenta, pois a soldagem, como se utiliza freqüentemente no metal duro, é muito difícil ou impraticável.

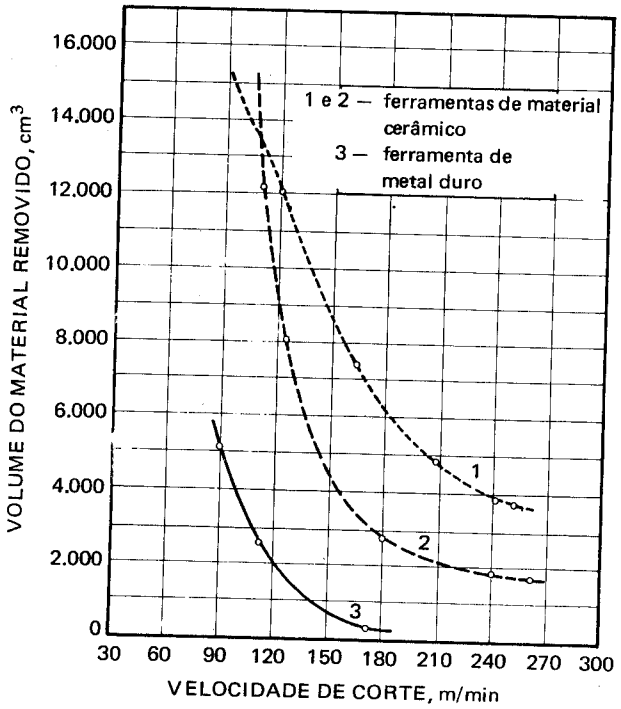


Figura 70 *Vida da ferramenta, em cm^3 de material removido, em função da velocidade de corte.*

A Figura 70 mostra a eficiência desse material, comparada com a do metal duro, mediante a determinação da quantidade de material removido em função da velocidade de corte.

6 — Outros materiais para ferramentas e matrizes O mais significativo é o "diamante", empregado em operações especiais de usinagem com operação contínua, devendo-se evitar a menor vibração, face à sua fragilidade. É utilizado na usinagem de materiais plásticos de certos bronzes e de certas ligas de alumínio.

O seu uso faz-se na forma de pontas montadas em cabos de aço.

O diamante é também empregado em matrizes de estiramento, nas fases finais da operação, principalmente de metais refratários como o tungstênio, embora seja utilizado na trefilação de outros metais como o cobre.

7 — Conclusões As curvas da Figura 71 representam a variação da dureza em função da temperatura para quatro tipos de materiais utilizados em ferramentas de corte, o que auxilia, de certo modo, na indicação e escolha do material mais adequado para determinadas condições de usinagem.

Convém lembrar, contudo, que a seleção de um material para ferramenta depende de muitos outros fatores, além do material sob usinagem e do material para corte. Entre eles, podem ser citados: condições de máquina operatriz, forma e dimensões da própria ferramenta, custo do material de ferramenta, emprego de refrigeração ou lubrificação, séries a serem usinadas etc.

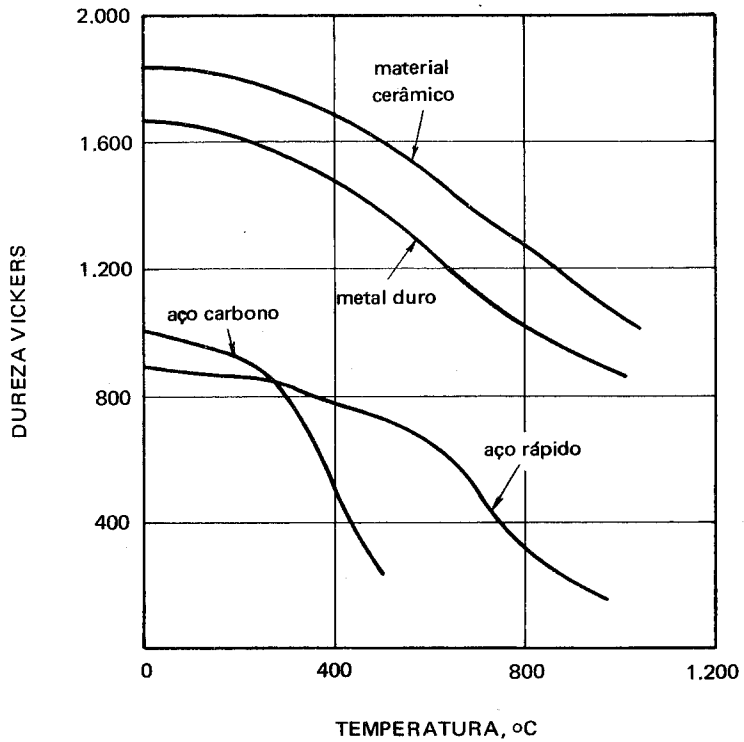


Figura 71 *Variação da dureza, em função da temperatura, para quatro tipos de materiais para ferramentas de usinagem.*

CAPÍTULO XVII

MATERIAIS RESISTENTES À CORROSÃO E AO CALOR

1 – Introdução A corrosão e a oxidação dos metais a temperaturas acima da ambiente constituem uma importante causa de perda de peças.

No caso da corrosão, diversos meios são utilizados para proteger o metal contra o fenômeno. Neste Capítulo, será estudado o recurso para conferir ao material uma "passividade" natural, ou seja, a propriedade de permanecer inalterado no meio circunvizinho.

Vários metais e ligas metálicas possuem esse característico, o qual é atribuído à "formação espontânea de uma película superficial de óxido", de alta resistência à ação corrosiva do meio. Essa película, ao interpor-se entre o material e o meio circunvizinho, evita que este exerça sua ação corrosiva.

Alguns desses metais e ligas metálicas já foram estudados nos capítulos referentes aos não-ferrosos.

No presente Capítulo serão estudados os "aços resistentes à corrosão", chamados "inoxidáveis" e, eventualmente, outras ligas não abordadas anteriormente.

Quanto à resistência ao calor, essa propriedade corresponde à capacidade que certas ligas metálicas possuem, quando expostas, de modo intermitente ou contínuo, em meios de várias naturezas (ar, gases e líquidos), à ação de temperaturas elevadas, de suportarem essas condições de serviço, tanto sob o ponto de vista químico como mecânico.

A resistência ao calor está relacionada, pois, com a resistência à oxidação a altas temperaturas. Assim sendo, os materiais resistentes ao calor são igualmente resistentes à corrosão, nas condições normais, e resistentes à oxidação a temperaturas diferentes da ambiente.

A necessidade desses materiais terem que suportar as severas condições de serviço mecanicamente significa que eles devem resistir ao fenômeno de "fluência", ou seja, apresentarem "resistência à fluência".

Em resumo, nos materiais resistentes ao calor, associam-se três característicos: resistência à corrosão, resistência à oxidação a altas temperaturas e resistência à fluência.

Como no caso da corrosão, admite-se que a resistência à oxidação a altas temperaturas se deva à formação de uma camada superficial de óxido, cuja natureza, composição, permeabilidade, estrutura, ponto de fusão, ponto de volatilização e aderência ao metal-base irão conferir a maior ou menor capacidade do material resistir às condições de serviço.

2 – Aços inoxidáveis Esses aços caracterizam-se, fundamentalmente, por resistirem à corrosão atmosférica, embora possam igualmente resistir à ação de outros meios gasosos ou líquidos.

Os aços adquirem "passividade" quando ligados com alguns outros elementos metálicos, entre os quais os mais importantes são o cromo e o níquel e, em menor grau, o cobre, o silício, o molibdênio e o alumínio.

O cromo é, de fato, o elemento mais importante, pois é o mais eficiente de todos, quando empregado em teores acima de 10%.

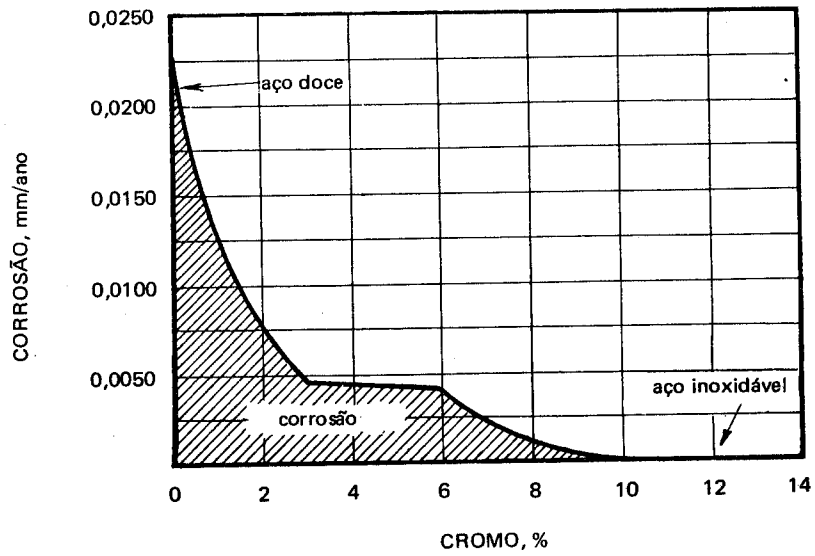


Figura 72 *Gráfico ilustrando a passividade dos aços-cromo expostos durante 10 anos a uma atmosfera industrial.*

O grafico da Figura 72 ilustra o fato, ao mostrar que à medida que aumenta o teor de cromo no aço, este passa, em atmosfera industrial, de metal de grande corrosibilidade a um metal praticamente indestrutível pela corrosão.

A temperaturas elevadas, o mesmo fenômeno ocorre, devendo, entretanto, o teor de cromo ser mais elevado, como a Figura 73 mostra, para que o material adquira resistência ao calor, ou seja, combinação de resistência à oxidação e resistência mecânica.

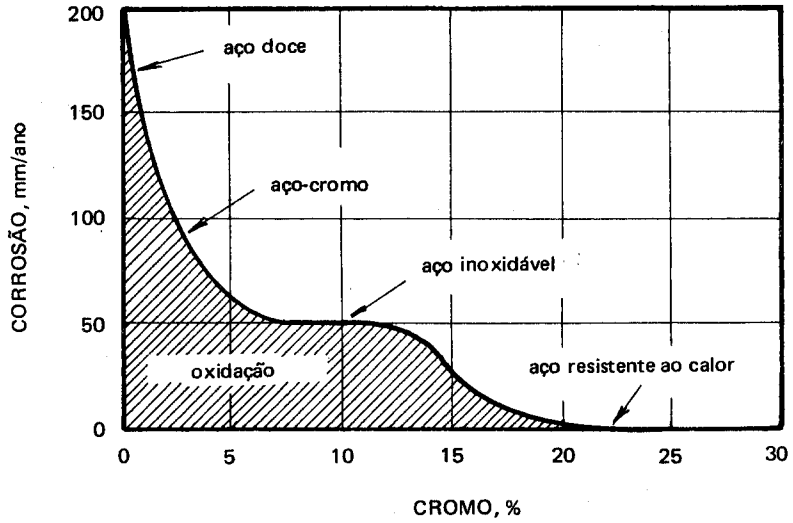


Figura 73 *Gráfico ilustrando o efeito do cromo na resistência dos aços à oxidação a altas temperaturas. A curva mostra a penetração em cubos de meia polegada aquecidos durante 48 horas a 1.000°C no ar.*

Enquanto, no caso da resistência à corrosão, o cromo já atua efetivamente a partir de 10% (Figura 72), na resistência ao calor, é necessário que sua quantidade ultrapasse 20% (Figura 73).

A passividade dos aços inoxidáveis depende dos seguintes fatores:[73] composição química, condições de oxidação, suscetibilidade à corrosão localizada ("pitting") e suscetibilidade à corrosão intergranular.

Quanto à *composição química*, o *cromo* é o elemento principal: 10% de cromo, no mínimo, são necessários, atingindo-se a passividade completa com 20 a 30%. Em segundo lugar, vem o *níquel*, que em teores

acima de 6 a 7%, não só melhora a resistência à corrosão pelo ataque de soluções neutras de cloretos, como igualmente as propriedades mecânicas. Os melhores aços inoxidáveis são os que contêm simultaneamente cromo e níquel.

O *carbono*, quando dissolvido no ferro, pouco afeta a resistência à corrosão dos aços inoxidáveis; porém, quando na forma de carbonetos, principalmente nos contornos dos grãos, prejudica muito essa propriedade.

Outros elementos que podem estar eventualmente presentes nos aços inoxidáveis são: o *molibdênio*, que melhora a resistência à corrosão nos ácidos sulfúrico e sulfuroso a altas temperaturas, em soluções neutras de cloretos e na água do mar; o *cobre*, que melhora a resistência à corrosão entre certos reagentes, como ácido sulfúrico; o *tântalo* e o *nióbio*, assim como o *titânio*, que evitam o fenômeno de corrosão intergranular, dos aços inoxidáveis cromo-níquel; e o *silício*, que melhora a resistência à oxidação a temperaturas elevadas.

Quanto a *condições de oxidação*, o aço inoxidável pode ser empregado, sem problemas, em meios oxidantes, como ácido nítrico por exemplo, mas não em meios redutores, como é o caso do ácido clorídrico e do ácido fluorídrico.

A *corrosão localizada*, freqüentemente mais prejudicial que a generalizada, é devida à ação do íon negativo cloro, sendo, portanto, as soluções de cloretos as responsáveis pelo fenômeno. A adição de molibdênio, além de proporcionar melhor acabamento da superfície metálica, evita esse tipo de corrosão.

A *corrosão intergranular* pode ocorrer em aços inoxidáveis cromo-níquel (chamados "austeníticos"), quando aquecidos para trabalho a quente ou tratamento térmico, ou devido à operação de soldagem, entre 400° e 800°C. Admite-se que o fenômeno seja devido à precipitação, nos contornos dos grãos, de um carboneto complexo de cromo e ferro; esse carboneto, em si, não afeta a resistência à corrosão do aço; entretanto, como ele é muito rico em cromo (às vezes até 90%), isso significa que, para sua formação ou precipitação, houve retirada de cromo das regiões vizinhas aos contornos dos grãos. Essas regiões empobrecidas de cromo tornam-se, em conseqüência, mais suscetíveis ao ataque corrosivo por parte do meio circunvizinho.

A corrosão intergranular pode ser combatida por diversos meios:

– reaquecimento do aço, que havia sido anteriormente aquecido na faixa crítica 400°–800°C, a uma determinada faixa de temperatura, resultando numa redissolução dos carbonetos que se haviam formado nos contornos dos grãos;

– redução do teor de carbono a valores que tornem difícil a formação de carbonetos; evita-se, assim, a remoção de cromo das áreas adjacentes aos grãos. A Figura 74 mostra o efeito do carbono na corrosão de um aço inoxidável tipo 18-8 (18%Cr-8% Ni), tratado previamente de modo a que tenha ocorrido a máxima precipitação possível de carbonetos. Nota-se a necessidade de um teor de carbono muito baixo, em torno de 0,03%, para o material adquirir a máxima resistência à corrosão intergranular.

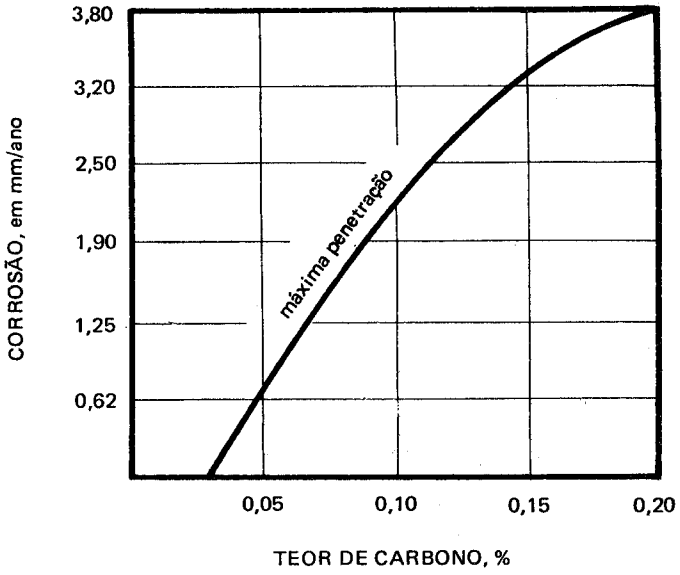


Figura 74 *Efeito do teor de carbono sobre a corrosão do aço inoxidável 18-8 tratado de modo a produzir a máxima precipitação de carbonetos.*

A Figura 75, por sua vez, indica a proporção que teoricamente deve existir entre as quantidades de carbono e de cromo para o aço tipo 18-8 adquirir a máxima resistência à corrosão intergranular. Em outras palavras, para uma probabilidade, por exemplo, de 99,8% de resistência à corrosão intergranular, seria aconselhável que, com um teor de cromo pouco superior a 18%, o teor de carbono não fosse superior a 0,020%; para o mesmo teor de cromo e uma probabilidade de 80% de resistência à corrosão intergranular, o teor de carbono pode superar ligeiramente a quantidade 0,030%;

– manter um tamanho de grão pequeno;

– deformar a frio o aço, após a solubilização, o que provoca a precipitação dos carbonetos de cromo preferivelmente ao longo dos planos de escorregamento, no interior dos grãos e não nos seus contornos;

– finalmente, o modo mais utilizado e de melhores resultados consiste na adição de titânio, tântalo ou nióbio, em teores relativamente baixos; esses elementos têm maior afinidade com o carbono que o cromo, evitando que este se precipite e mantendo as áreas adjacentes aos contornos de grãos com o mesmo teor de cromo que o restante do material.

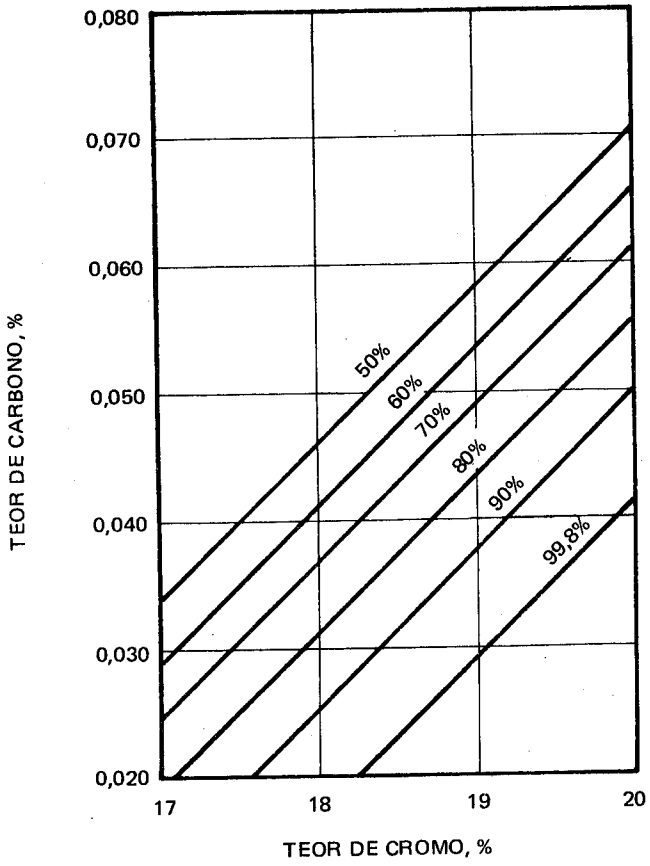


Figura 75 *Probabilidade de corrosão intergranular em função dos teores de cromo e carbono.*

2.1 **Tipos de aços inoxidáveis** O agrupamento usual dos vários tipos de aços inoxidáveis em classes é baseado na microestrutura que apresentam nas condições comuns de serviços, à temperatura ambiente. Assim, são considerados os três grupos seguintes:[73]

– aços inoxidáveis martensíticos
– aços inoxidáveis ferríticos
– aços inoxidáveis austeníticos

Os primeiros podem ser endurecidos por têmpera, ao passo que os outros dois não. No último grupo, caracterizado pela presença simultânea de cromo e níquel, a estrutura austenítica pode ser retirada à temperatura ambiente, como se verá no decorrer da exposição.

Os dois primeiros grupos compreendem os aços inoxidáveis essencialmente ao cromo, em teores elevados.

Como se sabe, o cromo tende a restringir o campo austenítico (ver Capítulo VII, item 3). Com cerca de 19% de cromo, o campo austenítico fica reduzido a uma área mínima. O cromo, assim, tende a estabilizar a ferrita.

O contrário ocorre com o níquel. Este elemento, como o cromo, elimina, por assim dizer, a alotropia do ferro; mas, ao contrário do cromo, estabiliza o ferro gama ou a austenita, de tal modo que, em determinadas condições e para teores elevados de níquel, esta estrutura é mantida à temperatura ambiente.

2.1.1 **Aços inoxidáveis martensíticos** São essencialmente ligas Fe-C-Cr, com, eventualmente em alguns tipos, pequenas quantidades de níquel.

Os tipos mais comuns são classificados nas normas AISI com os números 403, 410, 414, 416, 420, 420F, 431, 440A, 440B, 440C e 440F.

Os tipos 403, 410, 414, 416 e 420 caracterizam-se por baixo teor de carbono e um mínimo de 11,5% de cromo, que, no tipo 431, pode chegar a 17,0%. Embora o carbono seja baixo, esses aços possuem boa temperabilidade, devido à presença de cromo. Assim sendo, podem ser temperados ao ar, em óleo ou água e revenidos a temperaturas que dependem das propriedades mecânicas desejadas.

Esses aços são chamados também "tipo turbina" e suas aplicações são feitas em lâminas de turbina e compressor, molas, eixos e hélices de bombas, hastes de válvulas, parafusos, porcas etc.

Para conferir melhor usinabilidade, introduz-se enxofre ou selênio em quantidades mínimas de 0,07%.

O tipo 420F possui carbono entre 0,30 e 0,40% e nos tipos 440A, 440B e 440C, o teor de carbono é mais elevado, mínimo de 0,60% no tipo 440A e máximo 1,20% no tipo 440C. O teor de cromo varia de 12,0 a 18,0%, os maiores teores para os tipos com mais carbono.

São temperados e revenidos, podendo atingir valores de dureza Brinell entre 500 e 620 e limites de resistência à tração até cerca de 200 kgf/mm², além de alta resistência ao desgaste.

São denominados "tipo cutelaria" e empregados em cutelaria, instrumentos cirúrgicos, molas, mancais antifricção etc.

2.1.2 **Aços inoxidáveis ferríticos** Neles, o carbono é mantido, de um modo geral, baixo, entre 0,08 a 0,12%. Alguns tipos, os de maior quantidade de cromo, podem apresentar teor máximo de carbono correspondente a 0,35%.

O teor de cromo mínimo varia de 11,5% nos tipos de carbono mais baixo e o máximo pode chegar a 27,0%, nos de carbono mais elevado.

A designação AISI indica como tipos principais: 405, 406, 430, 430F, 442, 443 e 446.

A adição eventual de enxofre ou selênio, em teores mínimos de 0,07%, melhora a sua usinabilidade, de modo a torná-los mais adequados na fabricação de parafusos, porcas e peças semelhantes.

Eventualmente, ainda contêm alumínio, de 0,10 a 0,30%, ou 3,50 a 4,50%, cobre de 0,90 a 1,25% e níquel, 0,50% máx.

O tipo de conformação mais fácil e, portanto, muito comum, é o 430, com 0,12% de carbono e 14,00 a 18,00% de cromo. É empregado em equipamento para a indústria química, em equipamentos de restaurantes e cozinhas, peças de fornos e em componentes arquitetônicos ou decorativos.

O tipo de melhor resistência à corrosão é o 446, que contém um máximo de 0,35% de carbono e 23 a 27% de cromo. Possuem esses tipos, ainda, boa resistência à oxidação até a temperatura da ordem de 1.150°C. Utilizado em componentes de fornos, queimadores, radiadores etc.

Usualmente, a resistência mecânica é relativamente baixa; o tipo 446 pode atingir, nessa propriedade, um valor de 56,0 kgf/mm².

2.1.3 **Aços inoxidáveis austeníticos** Os tipos AISI mais comuns são designados pelos números 301, 302, 302B, 303, 304, 308, 309, 309S, 310, 316, 317, 321 e 347. Apresentam simultaneamente cromo e níquel como principais elementos de liga e são considerados os mais importantes aços inoxidáveis.

Geralmente, o carbono é mantido baixo – 0,08% máx. –, podendo, contudo, em alguns casos, admitir-se teores de 0,25% máx., desde que o cromo seja aumentado a teores de 22, 24 ou 26% e o níquel a teores de 12, 15 ou 22%.

O tipo mais conhecido é o "18-8", em que o teor médio de cromo é 18% e o de níquel 8%.

O níquel, além de melhorar a resistência à corrosão, melhora igualmente a resistência à oxidação a altas temperaturas, de modo que esses aços são também aplicados em condições de temperatura diferentes da ambiente.

São aços não-magnéticos e não endurecíveis por tratamento térmico, devido a sua estrutura austenítica, a qual é retida por resfriamento rápido em água, após aquecimento entre 1.000 e 1.100°C.

Entretanto, se submetidos à deformação mecânica a frio, resulta um encruamento que aumenta apreciavelmente a dureza à resistência mecânica, em proporções maiores que no encruamento de um aço comum.

O fato é atribuído à instabilidade da austenita, a qual, deformada a frio, transformar-se-ia em ferrita supersaturada de carbono.

O aço 18-8, por exemplo, pode, após estiramento a frio, atingir valores de limite de resistência à tração da ordem de 230 kgf/mm^2.

O aço nessas condições, se reaquecido, readquire a estrutura austenítica normal.

Como se mencionou, nesses aços pode ocorrer o fenômeno de corrosão intergranular, que se evita com adições de titânio, tântalo e nióbio. O titânio, quando adicionado, o é em teores correspondentes a cinco vezes o teor de carbono e o nióbio a dez vezes.

Outros elementos presentes nos aços inoxidáveis austeníticos são: silício, até 1,0 ou 1,5%, manganês, até 2,0%, eventualmente fósforo, enxofre ou selênio, em torno de 0,07% para conferir melhor usinabilidade, molibdênio, até 3 ou 4,0% para melhorar a resistência à corrosão química.

Os aços inoxidáveis austeníticos, antes de utilizados, são "austenitizados" ou seja, aquecidos entre 1.000° e 1.100°C, seguindo-se resfriamento rápido em água ou ar (no caso de peças de pequenas dimensões), de modo a reter a estrutura austenítica à temperatura ambiente e, igualmente, evitar, na faixa 400–800°C, a precipitação de carboneto de cromo.

Pode-se realizar, posteriormente, um tratamento a baixa temperatura, no máximo a 425°C, para alívio de tensões.

Depois de tratados termicamente, os aços inoxidáveis austeníticos podem atingir limites de resistência à tração de 60 a 70 kgf/mm^2, limites de escoamento de 21,0 a 28,0 kgf/mm^2, alongamento de 45 a 60%, dureza Brinell de 140 a 175 e resistência ao choque correspondente a 9,7 a 15,2 kgf.m.

As principais aplicações desses aços inoxidáveis são as seguintes: peças decorativas, utensílios domésticos, peças estruturais, componentes para a indústria química, naval, alimentícia, de papel e inclusive componentes que devam estar sujeitos a temperaturas elevadas, como peças de estufas e fornos, devido à boa resistência à oxidação que apresentam.

2.1.4 **Outros tipos de aços inoxidáveis** Entre eles, devem ser citados aqueles em que o níquel é parcialmente substituído pelo manganês. Com isso, originam-se tipos alternativos de aços inoxidáveis austeníticos ao cromo-níquel-manganês, com propriedades praticamente idênticas às do cromo-níquel e custo relativamente menor.

O tipo AISI 302, por exemplo, contendo 17 a 19% de cromo e 8 a 10% de níquel, pode ser substituído pelo tipo designado 202, contendo em média 18% de cromo, 9,0% de manganês e 5,5% de níquel.

Devem-se mencionar igualmente os aços inoxidáveis *nitrônicos*(74) os quais contêm 0,14 a 0,32% de nitrogênio, adicionado com o objetivo de aumentar a resistência mecânica dos tipos-padrão austeníticos 300, tanto à temperatura ambiente como a alta temperatura. O carbono é mantido baixo, no máximo 0,10%, havendo tipos com 0,03%. Contêm, esses aços, cromo de 17,0 a 21,0%, níquel de 1,60 a 12,5% e manganês de 5,0 a 12,0%. A quantidade deste último elemento é maior para os tipos que contêm menos níquel. Podem conter, eventualmente, molibdênio, nióbio, vanádio e silício.

Podem atingir, no estado recozido, valores de limite de resistência à tração da ordem de 84,0 kgf/mm^2 (tipo Nitrônico 32, contendo 0,10% carbono, 12,0% manganês, 18,0% cromo, 1,60% níquel e 0,32% nitrogênio). No estado encruado, seu limite de resistência à tração pode aumentar para valores superiores a 150 kgf/mm^2.

São aplicadas em armazenamento e transporte de gases liquefeitos; na indústria química e naval, em bombas, válvulas, cabos, correntes, molas e acessórios diversos; eixos de motores Diesel e aplicações análogas.

Finalmente, outro grupo importante de aços inoxidáveis compreende os tipos *endurecíveis por precipitação.*(73) Esses aços podem ser solubilizados, resfriados e reaquecidos em determinadas condições, de modo a endurecerem e ter sua resistência mecânica aumentada.

Contêm baixo carbono – 0,04 a 0,10% – manganês de 0,40 a 0,75%, silício de 0,35 a 0,50%, cromo de 15,0 a 17,0%. Alguns tipos contêm titânio e alumínio, ou nióbio e cobre ou somente alumínio ou somente nitrogênio. Eventualmente, podem apresentar molibdênio.

Devido a sua alta resistência à corrosão e elevada resistência mecânica, são principalmente empregados na indústria aeronáutica, em molas especiais e outros componentes de responsabilidade.

3 – Ligas não-ferrosas resistentes à corrosão Ao descrever-se os principais metais e ligas não-ferrosos, teve-se oportunidade de verificar que várias das ligas consideradas apresentam bons requisitos de resistência à corrosão.

Neste item serão abordadas as *ligas de níquel*, que se situam entre as mais importantes sob o ponto de vista de resistência à corrosão. O próprio níquel é um metal altamente resistente à corrosão, principalmente em condições atmosféricas normais, tanto assim que é um dos principais metais a ser utilizado como revestimento protetor. As atmosferas sulfurosas são, entretanto, corrosivas em relação ao níquel.

As atmosferas marítimas atuam como atmosferas rurais, ou seja, o níquel resiste perfeitamente à sua ação.

Esse metal resiste ainda à corrosão por parte da água, natural ou salgada, por parte de soluções salinas neutras e alcalinas. Entretanto, soluções salinas oxidantes, como cloreto de ferro e misturas de sais oxidantes, como ácidos minerais, tendem a corroer o metal.

Resiste também satisfatoriamente à ação do ácido sulfúrico em concentrações inferiores a 80%; contudo, é fortemente corroído por ácido sulfuroso, a não ser em soluções muito diluídas. Resiste a ácido fosfórico puro, mas este ácido o ataca fortemente se contiver impurezas oxidantes como compostos férricos. Resiste ainda à corrosão por parte dos álcalis mais fortes.

Devido a formar uma película superficial aderente quando aquecido a temperaturas elevadas, em atmosferas oxidantes, o níquel é muito útil em aplicações a altas temperaturas, como se verá.

Entre as ligas resistentes à corrosão, devem-se mencionar as seguintes:(75)

– *ligas níquel-cobre* – as quais apresentam geralmente maior resistência à corrosão que o níquel, em condições redutoras e maior resistência que o cobre, em condições oxidantes. Entre elas, uma das mais importantes é o "metal Monel", contendo 67% de níquel e 30% de cobre, já citado no capítulo destinado ao estudo do metal níquel;

– *ligas níquel-molibdênio* – entre elas, podem ser citadas as conhecidas com os nomes "Hastelloy", desenvolvidas em princípio para resistir à ação corrosiva do ácido clorídrico. Entre os tipos de Hastelloy, pode-se mencionar o Hastelloy B, contendo 65% de níquel, 30% de molibdênio e 5% de ferro. Outro tipo, designado por Hastelloy C, contém 58% Ni, 16% Mo, 16% Cr, 4% W e 5% Fe e possui excelente resistência à ação de soluções oxidantes, sobretudo as que contêm cloretos.

Outros tipos de Hastelloy são os seguintes: Hastelloy F, contendo 47% Ni, 7% Mo, 22% Cr e 17% Fe, com resistência à ação corrosiva de ácidos alcalinos, oxidantes e redutores; Hastelloy N, contendo 70% Ni, 17% Mo, 7% Cr e 5% Fe; Hastelloy W, contendo 62% Ni, 24% Mo, 5% Cr e 5,5% Fe; Hastelloy X, contendo 47% Ni, 9% Mo, 22% Cr e 18% Fe; Hastelloy D, sem molibdênio, contendo 85% Ni, 10% Si e 3% Cu.

A maioria destas ligas apresenta boa resistência à oxidação a altas temperaturas, de modo que são igualmente utilizadas em peças sujeitas a essas condições.

– *ligas níquel-cromo-molibdênio-cobre* – designadas por Ílio B, Ílio G, Ílio R e Ílio 98. Contêm, conforme o tipo, de 21,0 a 28,0% Cr, 5 a 8% Mo, 3,0 a 6,5% Cu, sendo o restante níquel. Utilizadas em mancais de empuxo, impulsores de bomba e outros componentes de bomba, onde se deseja alta dureza em ambiente corrosivo. Um dos tipos, o Ílio B, pode conter silício, de 2,5 a 6,3%. Essas ligas são endurecíveis por precipitação.

As ligas níquel-cromo serão abordadas mais adiante, ao serem estudadas as ligas resistentes ao calor.

4 – Aços resistentes ao calor ou refratários Os aços resistentes ao calor, chamados comumente "refratários", podem ser divididos em dois grupos:

– *aços-cromo*, com teor de cromo variável de 5 até cerca de 30%; assim, a partir de 5 a 6% de cromo, os aços já começam a apresentar melhores qualidades de resistência ao calor e manutenção das propriedades mecânicas a temperaturas acima da ambiente;

– *aços-cromo-níquel*, do tipo austenítico, apresentando cromo desde 16 até 26% e níquel desde 8 até 22%; os próprios aços inoxidáveis austeníticos do tipo 18-8, por exemplo, podem ser incluídos neste grupo.

De início, alguns conceitos precisam ser recordados, em relação aos aços resistentes ao calor:(76)

– sob o ponto de vista de resistência ao calor, a estrutura grosseira (grãos de maiores dimensões) é mais favorável do que a estrutura fina;

– assim, as estruturas obtidas por fundição são mais resistentes ao calor do que as trabalhadas;

– as estruturas do tipo austenítico são mais favoráveis do que as do tipo ferrítico;

– as falhas a altas temperaturas são geralmente intercristalinas, ao contrário das falhas através dos grãos que ocorrem normalmente à temperatura ambiente.

4.1 **Aços-cromo resistentes ao calor** O teor de cromo varia de 4,00 a 27,00%; para os de cromo mais baixo, até 18%, o teor máximo admissível

de carbono é 0,20%; para os tipos contendo de 23,00 a 27,00% de cromo, o carbono pode chegar a 0,35%. O teor de manganês varia de 0,60 a 1,50%; o teor de silício máximo é 1,00%. Alguns tipos apresentam molibdênio de 0,45 a 1,10%.

Com cromo em torno de 18%, se for permitida uma deformação de 0,1% em 1.000 horas, esses aços suportam os seguintes esforços:

7,0 kgf/mm^2 a 525°C
3,5 kgf/mm^2 a 600°C
1,0 kgf/mm^2 a 700°C
0,7 kgf/mm^2 a 750°C

o que indica que a resistência à fluência é relativamente baixa.

Uma das aplicações desses aços dá-se em válvulas de motores de automóveis e aviões, com adição de silício (cerca de 2,0%) e níquel (em torno de 1,5%).

Com o teor de cromo de 25 a 30%, os aços podem ser empregados até 1.100°C em atmosfera oxidante e até 1.000°C em atmosfera redutora carburizante ou sulfurosa. Porém sua resistência à fluência é ainda relativamente baixa.

Esses aços de alto cromo são todos do tipo ferrítico; neles a adição de alumínio promove um aumento considerável de sua resistência à oxidação, de tal modo que podem ser empregados como elementos de resistências elétricas, pois resistem à oxidação até temperaturas ligeiramente superiores a 1.300°C.

4.2 **Aços-cromo-níquel resistentes ao calor** O teor de cromo varia de 17 a 26% e o de níquel de 8 a 22%. São do tipo austenítico. O carbono é mantido baixo – 0,25% máx., no caso dos maiores teores de cromo e níquel.

O manganês máximo corresponde a 2,0% e o silício é normalmente de 1,0%, podendo, em alguns tipos, chegar a 3,0%. Eventualmente, possuem molibdênio de 2,0 a 3,0% e titânio ou nióbio (5 X C mín. Ti ou 10 X C mín. Nb), para evitar a corrosão intergranular.

O tipo 18-8 que, como se viu, é o principal aço inoxidável austenítico, pode ser utilizado em caixas e peças para fornos de recozimento, peças de recuperadores de calor, ventaneiras, tubos de caldeiras a vapor a alta pressão, tubos de escapamento de motores de combustão interna (com Ti), peças de motores a jato (com Nb) etc.

Este aço a 650°C apresenta uma resistência à ruptura de 10,5 kgf/mm^2, admitida uma deformação de 1% em 10.000 horas e de 4,2 kgf/mm^2 a 760°C, nas mesmas condições.

O tipo 25-20 (25% Cr e 20% Ni) com 1 a 2% de silício pode ser empregado em atmosferas oxidantes comuns, até 1.100°C, em atmosferas levemente sulfurosas até 1.000°C e na presença de quantidades apreciáveis de produtos sulfurosos até 900°C.

Esses aços apresentam os seguintes valores de resistência à ruptura, admitida uma deformação de 1% em 10.000 horas:

22,5 kgf/mm^2 a 540°C
12,0 kgf/mm^2 a 650°C
5,0 kgf/mm^2 a 760°C
2,1 kgf/mm^2 a 870°C
1,4 kgf/mm^2 a 980°C

4.3 **Aços ao níquel-cromo resistentes ao calor** Neste grupo, o elemento níquel predomina sobre o cromo. O níquel varia de 15 a 32%; e o cromo, de 12,5 a 25%. O carbono é mantido no máximo a 0,10%; o silício até 1,0%; o manganês pode chegar a 1,5%. Estão ainda presentes o molibdênio: no tipo conhecido como Timkem 16-26-6, contendo 16% de cromo, 26% de níquel, o molibdênio é de 6%. Podem igualmente conter titânio, alumínio, tungstênio, vanádio, boro e nitrogênio.

Esses aços podem ser empregados até 1.050°C em aplicações tais como tubulações para serviço em altas temperaturas, peças para turbinas a gás etc.

A Tabela 49[76] dá uma idéia da seleção de uma aço refratário, em função do emprego desejado e levando-se em conta apenas a natureza do meio e a temperatura.

5 – **Ligas não-ferrosas resistentes ao calor** Estas ligas podem ser divididas em dois grupos:

– ligas resistentes ao calor fundidas
– ligas resistentes ao calor trabalhadas.

5.1 **Ligas resistentes ao calor fundidas** São consideradas ligas resistentes ao calor para peças fundidas, quando destinadas a produzir peças que devam resistir às condições de serviço, quando expostas, contínua ou intermitentemente, a temperaturas acima de 650°C.[77]

As peças resultantes são utilizadas em fornos metalúrgicos, em equipamento de refino de petróleo, de produção de cimento, em fornos da indústria

TABELA 49

SELEÇÃO DE UM AÇO REFRATÁRIO

Atmosfera	Temperatura máxima de emprego em serviço contínuo °C	Aço recomendado	Observações
Oxidante	650	5–6% Cr	Solda delicada
	850	Ferrítico 17% Cr	Solda delicada; resistência à fluência pequena
	900	Austenítico 18-8 e suas variedades	
	1100	Ferrítico 28% Cr Austenítico 25-12 Austenítico 25-20 Austenítico 35 Ni-20 Cr	Evitar solda; baixa resistência à fluência
	1150	Ligas Ni-Cr (60-20 ou 80-20)	
Redutora carburizante	900	Austenítico 25-12	
	1000	Austenítico 20-20 Austenítico 35 Ni-20 Cr	
	1100	Ligas Ni–Cr	
Redutora sulfurosa	700	Austenítico 18-8	
	750	Ferrítico com 17% Cr	Evitar solda
	900	Austenítico 25-12 Austenítico 25-20	
	1000	Ferrítico com 28% Cr	Evitar solda; pequena resistência à fluência

petroquímica, em equipamento para usinas de força, em equipamento para laminação de aço, em turbinas a gás e em equipamento de fabricação de vidro e borracha sintética.

Além dos aços inoxidáveis ferríticos e austeníticos, também empregados em peças fundidas resistentes ao calor, as ligas não-ferrosas usuais para essas aplicações são à base de níquel e à base de cobalto.

Entre as ligas à base de níquel, podem ser mencionadas as seguintes:

– *Hastelloy B*, contendo 61% Ni, 28% Mo, além de Cr, Fe, Si e Mn. Caracteriza-se por boa tenacidade, resistência a alta temperatura, boa usinabilidade e boa resistência à corrosão. Pode ser solubilizada e nesse estado adquire a máxima ductilidade e resistência à corrosão. Recomendável para equipamento destinado à indústria química;

– *Hastelloy C*, contendo 51% Ni, 17% Mo e 16% Cr, recomendada para sede de válvulas, entre outras aplicações;

– *Hastelloy X*, com 45% Ni, 22% Cr e 9% Mo – apresenta alta resistência mecânica e à oxidação a temperaturas até 1.200°C, de modo que se recomenda para aplicações em componentes de fornos, na presença de atmosferas oxidantes, redutoras ou neutras. Tem sido empregada em componentes de motores a jato;

– *Inconel 713 C*, contendo 13% de Cr, 4% de Mo, 7% de Al, algum titânio e níquel o restante. É liga para emprego em fundição de precisão, para fabricação de componentes de motores a jato, como lâminas de turbina etc.

As ligas à base de cobalto contêm geralmente quantidade relativamente alta de carbono (0,25 a 0,50%), de modo que sua resistência mecânica elevada é devida não só à presença de tungstênio e cromo, como também à precipitação de carbonetos, entre os quais um de cromo.

Entre essas ligas, devem ser citadas as seguintes:

– *HS21* – contendo 27% Cr, 5,5% Mo e 62% Co, além de carbono, silício, manganês e níquel; é capaz de resistir à ação de atmosferas oxidantes e redutoras a temperaturas até 1.150°C, além de conservar a resistência mecânica. A 815°C, por exemplo, o seu limite de resistência à tração é, na média, no estado fundido, de 43,5 kgf/mm^2, com alongamento de 16%. Essa liga é recomendada para aplicações que possam exigir resistência ao choque térmico;

– *HS31* – contendo 25,5% Cr, 10,5% Ni, 7,5% W e 55% Co, além de carbono, silício, manganês e ferro. Esta liga a 815°C, no estado fundido, apresenta uma resistência à tração de 44,0 kgf/mm^2, com 15% de alonga-

mento. É recomendável para fundição de precisão de lâminas de turbina, entre outros tipos de peças.

5.2 **Ligas resistentes ao calor trabalhadas** Também neste caso, devem ser considerados alguns grupos de ligas.

As ligas à base de níquel contêm 50 a 70% de Ni, cerca de 20% de Cr, até 10% de Mo ou W, até 20% de Co e Ti mais Al. Podem ser empregadas na faixa de temperaturas de 760° a 980°C. Entre os componentes produzidos com essas ligas podem ser citados válvulas de exaustão, tubulagens coletoras, componentes na forma de chapas para motores a jato e na indústria aeronáutica em geral.

As ligas contendo titânio e alumínio podem ser endurecidas por um tratamento de endurecimento por precipitação.

Algumas dessas ligas são designadas pelos nomes Hastelloy, Nimonic e Inconel.

As ligas à base de cobalto possuem, além do cobalto, 20 a 25% de cromo, 10 a 20% de níquel, 2 a 15% de tungstênio e, eventualmente, molibdênio, nióbio e ferro.

Apresentam propriedades mecânicas satisfatórias, na faixa de temperaturas de 760° a 980°C.

Empregadas em peças forjadas ou na forma de chapas em aplicações da indústria de aviões a jato.

5.3 **Outros tipos de ligas resistentes ao calor** São ligas à base de níquel, contendo tungstênio, alumínio, zircônio, molibdênio, nióbio e carbono.(78) Uma delas, designada por WAZ-16, contém 15 a 17% W, 6,8 a 7,2% Al, 1,8 a 2,2% Mo, 1,8 a 2,2% Nb, 0,4 a 0,6% Zr, 0,15 a 0,20% C, o restante sendo níquel.

O seu limite de resistência à tração à temperatura ambiente situa-se em torno de 64,5 kgf/mm^2, com alongamento de 5%.

Como em algumas ligas de níquel, sua resistência à tração aumenta com a temperatura, atingindo 76 kgf/mm^2 a 760°C. O máximo alongamento, em torno de 5%, ocorre a 1.095°C.

Sua aplicação é feita em determinados componentes de turbinas a gás.

5.4 **Ligas para elementos de resistência elétrica** São ligas níquel-cromo, com níquel variável de 60 a 80% e cromo de 13 a 20%, o restante sendo constituído de ferro.

A mais famosa é a 80Ni-20Cr, a qual, no estado recozido, apresenta um limite de resistência à tração de 66,5 kgf/mm^2 com alongamento entre 25 e 35% e, no estado encruado, de 115 kgf/mm^2, praticamente sem alongamento. Deve-se evitar, no emprego dessas ligas a altas temperaturas, a presença de atmosferas sulfurosas e redutoras.

Outra liga é 60Ni-24Fe-16Cr, com aplicações semelhantes, incluindo-se reostatos para equipamento eletrônico, potenciômetro e pares termoelétricos.

Para aplicações idênticas, outra liga empregada é a 35Ni-45Fe-20Cr.

Para emprego em altas temperaturas, os chamados "metais refratários" ou seja, tungstênio, tântalo e molibdênio são muito importantes. Esses metais serão estudados no capítulo referente a "Produtos da Metalurgia do Pó".

CAPÍTULO XVIII

MATERIAIS PARA FINS ELÉTRICOS E MAGNÉTICOS

1 – Introdução As substâncias, segundo suas propriedades magnéticas, podem ser classificadas nas seguintes categorias:

- materiais ferromagnéticos
- materiais paramagnéticos
- materiais diamagnéticos

Os primeiros, quando colocados num campo magnético, orientam-se na direção do campo e ficam fortemente magnetizados.

Os materiais paramagnéticos também se orientam paralelamente ou na direção do campo, porém magnetizam-se fracamente.

Finalmente, os diamagnéticos se dispõem normalmente ao campo.

Por outro lado, os característicos que devem ser levados em conta nos materiais para a indústria elétrica são a permeabilidade e a força coerciva.

A "permeabilidade" corresponde a um fator que é proporcional à densidade do fluxo magnético B (chamado indução magnética) produzido no material por um campo magnético, dividido pela intensidade do campo H. A permeabilidade é expressa por

$$\mu = \frac{B}{H}$$

A "força coerciva" está relacionada com a curva de magnetização do material, representada na Figura 76. Essa curva representa a variação da indução B com a intensidade do campo ou força magnetizante H.

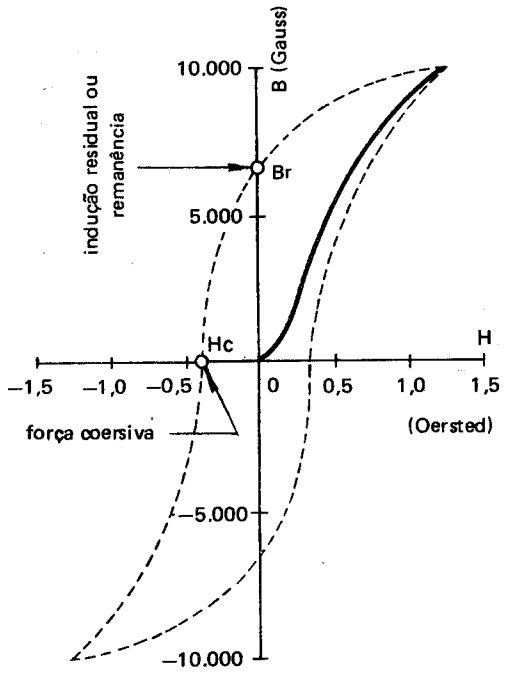


Figura 76 *Curva de magnetização e ciclo de histerese do ferro.*

Nessa figura, o trecho em linha acentuada, que parte da origem e atinge o ponto mais elevado da curva corresponde à "curva de magnetização". O ciclo fechado pela linha externa pontilhada representa o "ciclo de histerese", o qual decorre do fato dos fenômenos de magnetização não serem fenômenos reversíveis, ou seja, com a diminuição do campo H, B não diminui de acordo com a curva de magnetização.

Assim, eliminando o campo H, B não volta a zero, mas reduz-se a um valor que recebe o nome de "remanência" ou "indução residual", a qual representa a magnetização retida pelo material.

Se, a seguir, se aplicar um campo no sentido oposto, o valor da indução residual ou magnetização decrescerá progressivamente até zero. O valor do campo desmagnetizante que anula a magnetização residual recebe o nome de "força coerciva".

Em função dos característicos permeabilidade e força coerciva, os materiais para a indústria elétrica podem ser divididos em dois grupos:(79)

– materiais de alta permeabilidade e baixa força coerciva, ou materiais "magneticamente moles";

– materiais de alta força coerciva, em que a permeabilidade não é uma característica importante, chamados materiais "magneticamente duros" ou "ímãs permanentes".

2 – **Materiais magneticamente moles** Seus característicos principais são, portanto:

– alta permeabilidade
– baixa força coerciva.

Além disso, devem apresentar alta intensidade de saturação e mínima ou nenhuma modificação da permeabilidade com a temperatura.

O "ferro puro" é, de um modo geral, o metal ferromagnético ideal. Entretanto, apresenta baixa resistividade elétrica, de modo que não é recomendado em circuitos de corrente alternada, que constituem quase 75% de todas as aplicações industriais de materiais magnéticos.

Adicionando-se contudo, elementos de liga ao ferro, sua resistividade elétrica aumenta e então o material torna-se adequado para aplicações em corrente alternada.

O silício age nesse sentido, do mesmo modo que o alumínio. Entretanto, depois do silício, o níquel e o cobalto são os metais utilizados como elementos de adição ao ferro.

2.1 **Ligas ferro-silício** O teor de silício varia de 0,25 a 4,75%, conforme a Tabela 50 mostra.

Os empregos desses materiais são os seguintes:

(1) motores fracionários de baixo custo, para uso intermitente;

(2) motores fracionários e peças polares e outros circuitos magnéticos de alta permeabilidade;

(3) motores e geradores de melhor qualidade, transformadores pequenos para uso intermitente, relés e reatores;

(4) motores e geradores de eficiência média; transformadores pequenos e reatores;

(5) motores e geradores de alta eficiência e tamanho médio; transformadores de uso intermitentes, reatores, medidores elétricos, peças polares laminadas;

TABELA 50

PROPRIEDADES FÍSICAS E MAGNÉTICAS DE CHAPAS Fe-Si

Teor aproximado de silício, %	Tipo ou marca	Resistividade microhms-cm	Perda do núcleo máxima (watts/kg em 60 ciclos)	Limite de resistência à tração kgf/mm²	Alongamento em 2" %	Emprego
0,25 – 0,30	"Campo"	28	5,1	–	–	(1)
0,50 – 0,60	"Armadura"	28	3,4	31,0	25	(2)
1,25 – 1,50	"Elétrico"	44	3,7	35,0	22	(3)
2,50 – 2,75	"Motor"	44	2,5	47,5	14	(4)
2,75 – 3,25	"Dínamo"	50	2,1	–	–	(5)
3,25 – 3,50	"Hipersil"	50	2,1	49,0	12	(6)
3,60 – 4,00	"Transformador 72"	52	1,58	56,0	8	(7)
4,00 – 4,25	"Transformador 65"	58	1,43	50,5	6	(7)
4,25 – 4,50	"Transformador 58"	60	1,27	53,0	5	(7)
4,50 – 4,75	"Transformador 52"	65	1,15	49,0	2	(7)

(6) transformadores de alta eficiência para redes de distribuição;

(7) todos os tipos de transformadores, para redes de distribuição e máquinas elétricas de elevada eficiência.

2.2 **Ligas ferro-níquel** Estão indicadas na Tabela 51. São aplicadas sobretudo em instrumentos elétricos, circuitos telefônicos, transmissores e aparelhos de rádio. As melhores propriedades magnéticas dessas ligas são obtidas pelo seu recozimento em hidrogênio puro seco entre 1.000° e 1.200°C, durante várias horas, de modo a reduzir os teores de carbono, enxofre e oxigênio.(80)

2.3 **Ligas ferro-cobalto** Essas ligas são as que apresentam maior intensidade de saturação (máxima intensidade de magnetização). Esse característico atinge o valor máximo com cerca de 34,5% de cobalto. Os tipos mais comuns são:

– *Hiperco,* com 35% de cobalto, utilizado nas mesmas aplicações das ligas Fe-Si, mais especificamente em motores de alta densidade de fluxo e em transformadores;

– *Permendur*, com 50% de cobalto, de aplicação restrita a circuitos telefônicos, a eletromagnetos de corrente contínua e aplicações análogas.

3 – **Materiais com permeabilidade constante** Aplicados em equipamento telefônico e radiofônico, visto que neles se exige que não haja distorção na forma de ondas, o que só é possível com materiais de permeabilidade constante.

As ligas mais importantes nesse sentido são as seguintes:(79)

– *Perminvar*, com 30% de Fe, 45% de Ni e 25% de Co, no estado recozido;

– *Isoperm*, com 3 a 4% de Al, 10 a 15% de cobre e 40 a 50% de níquel, no estado encruado até 90% de redução;

– *Conpernick*, com 40 a 60% de níquel e o restante ferro, no estado encruado e recozido.

4 – **Materiais magneticamente duros** São empregados em ímãs permanentes.

O critério para avaliar-se a qualidade de um ímã permanente é o produto $(BH)_{máx}$ obtido na curva de desmagnetização.

Os materiais empregados são:

– aços martensíticos, ou seja, no estado temperado
– ligas endurecíveis por precipitação.

TABELA 51

LIGAS Fe-Ni MAGNETICAMENTE MOLES

Denominação	Composição, %			Características			
	Fe	Ni	Outros elementos	Permeabilidade inicial	Permeabilidade máxima	Saturação $4\pi I_S$	Resistividade microhm-cm
Permalloy 45	54	45	–	2.500	25.000	16.000	50
Permalloy 78	21	78	–	8.000	100.000	10.000	16
Permalloy 4–79	16	79	4 Mo	20.000	80.000	8.700	57
Hipernik	50	50	–	4.000	80.000	16.000	35
Mumetal	18	75	2 Cr, 5 Cu	20.000	110.000	7.200	60
Supermalloy	15	79	5 Mo	100.000	800.000	8.000	60

4.1 **Aços martensíticos** Devem apresentar alto carbono, de 0,70 a 1,00% e devem ser temperados. A adição de elementos de liga que formem carbonetos estáveis, os quais atuam como centros de deformação do reticulado, contribui para melhorar as propriedades magnéticas.

Assim, se um aço com 1,14% de carbono apresenta um produto

$$(BH)_{máx} = 0{,}18.10^6,$$

adicionando-se 5 a 6% de tungstênio, o valor desse produto sobe para $0{,}34.10^6$.

O cromo pode substituir o tungstênio e um aço com 5% de cromo e 1,0% de carbono, temperado em óleo, dá um produto

$$(BH)_{máx} = 0{,}28.10^6.$$

Os melhores aços nesse sentido são os ao cobalto. Um tipo comum possui 35% de Co, 2% de Cr, 4% de W e 0,90% de C, apresentando um produto

$$(BH)_{máx} = 1{,}0.10^6.$$

4.2 **Ligas endurecíveis por precipitação** A Tabela 52 mostra algumas ligas endurecíveis por precipitação. Nelas, ocorre a precipitação de uma fase que provoca o estado de tensões internas, necessário para que uma matriz de ferro alfa apresente alta remanência e alta força coerciva. Para isso, elas devem ser solubilizadas, temperadas e revenidas.

Ligas importantes para ímãs permanentes são os chamados "Alnicos", indicados na Tabela 53, solubilizadas ou homogeneizadas a 1.200°C, temperadas e envelhecidas a 650°C.

Os Alnicos são duros, frágeis e dificilmente usináveis, de modo que as peças de Alnico ou são fundidas na sua forma definitiva ou são produzidas por metalurgia do pó.

TABELA 52

LIGAS ENDURECÍVEIS POR PRECIPITAÇÃO PARA ÍMÃS PERMANENTES

Tipo de liga	Composição, %					Propriedades Magnéticas		
	Mo	Co	Ni	Ti	W	Hc	Br	(B.H.)máx.
Fe–Mo–Co	17	12	–	–	–	250	10.500	$1{,}1 \times 10^6$
Fe–W–Co	–	24	–	–	27	149	9.600	$1{,}4 \times 10^6$
Fe–Mo	23,4	–	–	–	–	219	7.000	$1{,}5 \times 10^6$
Fe–Co–Ni–Ti	–	30	16	12	–	920	6.350	$2{,}0 \times 10^6$

TABELA 53

TIPOS DE ALNICO PARA ÍMÃS PERMANENTES

Liga	Composição, %					Propriedades magnéticas			Observações
	Al	Ni	Co	Outros	Fe	Hc	Br	(B.H)máx.	
Alnico I	12	20	5	–	rest.	440	7.200	$1,4 \times 10^6$	Duro e frágil
Alnico II	10	17	12,5	6 Cu	rest.	550	7.200	$1,6 \times 10^6$	Duro e frágil
Alnico II (sinterizado)	10	17	12,5	6 Cu	rest.	520	6.900	$1,4 \times 10^6$	Duro
Alnico III	12	25	–	–	rest.	450	6.700	$1,38 \times 10^6$	Duro e frágil
Alnico IV	12	28	5,0	–	rest.	700	5.500	$1,3 \times 10^6$	Duro e frágil
Alnico V	8	14	24	3 Cu	rest.	550	12.500	$4,5 \times 10^6$	Duro e frágil
Alnico VI	8	15	24	3 Cu 1 Ti	rest.	750	10.000	$3,5 \times 10^6$	Duro e frágil
Alnico XII	6	18	35	8 Ti	rest.	950	5.800	$1,5 \times 10^6$	Duro e frágil

CAPÍTULO XIX

PRODUTOS DA METALURGIA DO PÓ

1 – Introdução Como se sabe, a metalurgia do pó é a técnica de produção de peças metálicas a partir de metais e suas ligas reduzidos ao estado pulverulento. Os pós, de diversos tipos, depois de convenientemente misturados, são submetidos a uma operação de compactação, em prensas especiais, utilizando-se matrizes com a forma e dimensões definitivas ou praticamente definitivas, de acordo com o desenho da peça a ser fabricada.

Os compactados "verdes" são a seguir "sinterizados", ou seja, aquecidos em condições controladas de temperatura, tempo e ambiente, de modo a produzir uma consolidação das peças e conferir-lhes a estrutura, densidade e as propriedades mecânicas desejadas.

Normalmente, o processo termina na sinterização, pois é possível apenas por compactação e sinterização e, eventualmente, calibragem final, obter-se produtos definitivos.

Está se tornando comum, entretanto, por questões econômicas, produzir-se peças semi-acabadas e terminá-las por operações suplementares de usinagem.

Do mesmo modo, por problemas de ordem técnica, freqüentemente utilizam-se processos de dupla compactação, dupla sinterização ou infiltração metálica.

De qualquer maneira, em face do avanço tecnológico, a única restrição que existe no momento em relação ao campo abrangido pela metalurgia do pó é relativa às dimensões das peças sinterizadas, o que é facilmente compreensível, se se considerar que as prensas necessárias para a operação de compactação têm capacidade limitada.

Sob o ponto de vista econômico, a técnica compete em condições vantajosas com as técnicas metalúrgicas convencionais, desde que as séries a serem produzidas justifiquem o elevado custo das matrizes e desde que as formas das peças sejam relativamente complicadas e suas dimensões não muito grandes.

Por outro lado, há uma grande variedade de produtos metálicos que, pelos seus elevados pontos de fusão ou pelos seus característicos físicos e efeitos estruturais, ou por constituírem misturas de substâncias metálicas com não-metálicas, só podem ser obtidos por metalurgia do pó.

Nesses casos, a técnica não tem competição e é a única possível a adotar.

Nessas condições, os produtos da metalurgia do pó podem ser divididos em dois grandes grupos:

– produtos que só podem ser obtidos por metalurgia do pó;

– produtos que podem ser obtidos pelas técnicas metalúrgicas usuais, mas são mais economicamente obtidos pela metalurgia do pó.

Todos eles são muito importantes na indústria em geral e na indústria mecânica em particular.

Ao primeiro grupo pertencem os seguintes materiais:

– metais refratários
– ligas pesadas
– metal duro
– materiais porosos
– escovas coletoras de corrente elétrica
– contatos elétricos compostos
– materiais de fricção sinterizados

O metal duro já foi estudado no capítulo referente a "Materiais para Ferramentas e Matrizes".

Ao segundo grupo pertencem:

– peças de ferro e aço sinterizado
– certos ímãs Alnico
– peças de metais e ligas não-ferrosos

2 – **Metais refratários** Compreendem os metais de alto ponto de fusão: tungstênio (ponto de fusão 3.410°C), molibdênio (2.610°C), tântalo (2.996° mais ou menos 50°C) e nióbio (2.468° mais ou menos 10°C).

A própria metalurgia desses metais é baseada na técnica da metalurgia do pó, pois os seus minérios são tratados de modo a produzir os metais em pó.

O *tungstênio* é extraído da volframita (tungstato de ferro e manganês) ou da xelita (tungstato de cálcio), os quais são tratados quimicamente e transformados a trióxido de tungstênio WO_3, que, por redução em hidrogênio, passa a tungstênio puro na forma pulverulenta.

O pó é, a seguir, comprimido em barras a pressões da ordem de 4 a 6 tf/cm^2; as barras resultantes são submetidas a uma pré-sinterização, em torno de 1.000° a 1.100°C, para possibilitar seu manuseio. A sinterização final é realizada em fornos especiais por passagem direta, através da barra, em atmosfera protetora de hidrogênio, de corrente elétrica, atingindo-se temperaturas da ordem de 3.000°C. Durante o processo de sinterização ocorre crescimento de grão, o qual começa acima de 900°C e atinge um máximo entre 2.600° e 2.800°C. (81)

Para reduzir esse crescimento de grão, adiciona-se no pó de tungstênio, óxido de tório ou de alumínio ou sílica ou óxidos alcalinos.

Durante a sinterização, verifica-se igualmente contração e redução da porosidade.

No estado sinterizado, essas barras são muito frágeis, mas elas podem ser facilmente forjadas a temperaturas entre 1.300° e 1.700°C. O processo de deformação consiste, na realidade, em forjamento rotativo.

A seção é reduzida até aproximadamente 1 mm de diâmetro e o material atinge uma densidade de 18,5 g/cm^3 (a densidade teórica do tungstênio é 19,3 g/cm^3).

A seguir as barras são trefiladas, em fieiras de ligas duras até cerca de 0,3 mm de diâmetro numa faixa de temperaturas de 400 a 800°C. A partir dessa seção, empregam-se fieiras de diamante e a trefilação é realizada mediante reduções de 10%, conseguindo-se diâmetros variáveis de 8 a 12 mícrons.

A densidade do fio trefilado é praticamente a teórica do tungstênio e a resistência à tração é excepcionalmente elevada, atingindo nos fios mais finos valores superiores a 400 kgf/mm^2.

Esses fios de tungstênio são utilizados em filamentos para lâmpadas incandescentes, tubos eletrônicos e eletrodos de raios X.

A temperatura de serviço desses filamentos é muito elevada – da ordem de 2.500°C, nas lâmpadas incandescentes, mais elevada que a temperatura de recristalização do metal. Assim, há tendência de crescimento do grão, o que deve ser controlado para proporcionar uma vida mais longa ao filamento. Adições de 0,7 a 1,0% de ThO_2 retardam esse crescimento de grão.

Além de ser produzido na forma de filamentos, o tungstênio pode ser conformado na forma de chapas ou de outras seções relativamente simples, de modo que suas aplicações são mais amplas: partes estruturais para alto vácuo, eletrodos de soldagem, eletrodos de velas de ignição, elementos de aquecimento etc. Uma aplicação importante tem-se na forma de pequenos discos soldados em rebites de aço, para a fabricação de platinados. Nesse emprego, o tungstênio funciona como material de contato elétrico.

O *molibdênio* tem um processo de fabricação muito semelhante ao do tungstênio, ou seja, seus compostos minerais são reduzidos a óxido MoO_3 e reduzidos a molibdênio metálico puro na forma de pó.

O pó é comprimido em barras e sinterizado, sem pré-sinterização prévia, pela passagem direta de corrente elétrica. O material é a seguir submetido a forjamento rotativo ou laminação e, devido a sua elevada ductilidade, trabalhado a frio, nos estágios finais dessas operações. A densidade do produto final varia de 10,0 a 10,2 g/cm^3, sendo portanto muito próxima da teórica (10,22 g/cm^3).

Pode-se conseguir valores de resistência à tração em torno de 240 kgf/mm^2 no estado encruado ou de 120 kgf/mm^2 no estado recozido.

A principal aplicação do fio de molibdênio é feita em grelhas de tubos eletrônicos. Chapas de molibdênio são usadas em dispositivos eletrônicos. Outras aplicações incluem: eletrodos de raios X, material para contato elétrico e elementos de aquecimento para fornos elétricos.

Nesta última aplicação, a resistência deve trabalhar numa atmosfera protetora, como hidrogênio ou sob vácuo, visto que o molibdênio, como aliás o tungstênio, oxida-se facilmente a temperaturas elevadas.

O *tântalo*, embora seja entre os metais refratários o único que possa ser fundido, é normalmente obtido na forma de pó, a partir de seus minérios, onde sempre se encontra nióbio.

O pó de tântalo é obtido pela formação de fluoretos duplos de tântalo e nióbio, cuja separação é possível porque o fluoreto de tântalo – K_2TaF_7 – é menos solúvel que o de nióbio – K_2NbF_5.

O tântalo em pó é obtido pela eletrólise do seu fluoreto. O metal é purificado por tratamentos alternados com ácidos diluídos e álcalis; um tratamento final com HF produz um pó cuja pureza é de cerca de 99,8%. Recozimento em vácuo, entre 1.200° e 1.600°C, melhora essa pureza.

O pó é comprimido em barras e sinterizado sob vácuo, entre 2.600° e 2.700°C, pela passagem de corrente elétrica através das barras. Os compactados sinterizados são muito porosos; sua densidade é aumentada por forjamento comum e a seguir nova sinterização sob vácuo é realizada, obtendo-se barras adequadas para trabalho mecânico, como forjamento, laminação e estiramento à temperatura ambiente.

Obtêm-se densidades iguais à teórica (16,65 g/cm^3) e limites de resistência à tração entre 87 e 120 kgf/mm^2 no estado encruado e entre 35 e 62 kgf/mm^2 no estado recozido. A ductilidade, no estado recozido, corresponde a um alongamento de 25 a 40%, bem maior que o do tungstênio ou molibdênio.

Esse metal é resistente à ação de ácidos como HCl, HNO_3, água-régia fervente, H_2SO_4, H_3PO_4; mas é atacado por ácido fluorídrico, H_2SO_4 contendo SO_3 livre e álcalis fortes.

Suas principais aplicações são baseadas na sua grande resistência à corrosão: recipientes, tubos, agitadores e peças semelhantes para a indústria química. Outras aplicações incluem lâminas para turbinas a vapor, bocais, válvulas, diafragmas etc.

Finalmente, o tântalo tem sido usado, na forma de fios, em cirurgia, para ligar ossos quebrados ou substituir ossos quebrados e cartilagem destruída.

O *nióbio* tem propriedades semelhantes às do tântalo, do mesmo modo que seu processo de fabricação é análogo.

Sua densidade é de 8,57 g/cm^3 e as propriedades mecânicas podem ser assim resumidas:

- limite de resistência à tração:
  - no estado recozido – cerca de 30 kgf/mm^2
  - no estado encruado – cerca de 60 kgf/mm^2
  - na forma de fios – 67 a 90 kgf/mm^2
- alongamento:
  - no estado recozido – 10%
  - no estado encruado – 2%

Suas aplicações são restringidas a tubos eletrônicos.

3 – Ligas pesadas Existem aplicações industriais que exigem peças de elevada densidade. Por exemplo: recipientes e cápsulas para substâncias radioativas, rotores de giroscópios, contrapesos de diversos tipos, amortecedores de vibrações torcionais, excitadores de vibrações, embreagens centrífugas, pesos para relógios automáticos, recipientes de isótopos, componentes de controle para mísseis guiados, cames, parafusos, engrenagens etc.

TABELA 54

COMPOSIÇÃO E PROPRIEDADES DE ALGUMAS LIGAS PESADAS

Material	Densidade g/cm^3	Resistência à tração kgf/mm^2	Limite de escoamento kgf/mm^2	Alongamento %	Limite de fadiga kgf/mm^2	Dureza R.C.
W-6,0Ni-4,0Cu	16,9	78,4	52,5	6	28,0	24
W-3,5Ni-1,5Cu	18,0	77,0	59,5	5	30,1	27
W-7,0Ni-3,0Fe	17,0	87,5	61,6	18	43,4	25
W-3,5Ni-1,5Fe	18,0	91,0	63,0	15	47,2	28
W-4,0Ni-2,0Fe-4,0Mo	17,2	105,0	98,0	2	45,5	36

Os metais de mais elevada densidade são:

platina – 21,5 g/cm^3
ouro – 19,3 g/cm^3
tungstênio – 19,3 g/cm^3
urânio – 18,7 g/cm^3
chumbo – 11,4 g/cm^3

Os metais nobres – platina e ouro – são de custo elevado e, portanto, de restrita utilização industrial, do mesmo modo que o urânio, por seus característicos intrínsecos.

O tungstênio, além de ser dificilmente trabalhável, não pode ser fundido nem sinterizado nas formas, às vezes muito complexas, que as peças para as aplicações mencionadas exigem; nem pode o tungstênio ser usinado.

Face a essas dificuldades, desenvolveram-se ligas baseadas em tungstênio, facilmente sinterizáveis, possuindo alta densidade e ótima usinabilidade.

Essas ligas, chamadas "pesadas", caracterizam-se por apresentar, como principal componente, o tungstênio, mais níquel, em teores de 1 a 16% e cobre, em teores de 3 a 20%.

Sua densidade, dependendo da composição, pode chegar a 18,5 g/cm^3, só inferior à da platina, ouro, tungstênio e urânio e muito superior à do chumbo.

Sua usinabilidade é excelente, do mesmo modo que suas propriedades mecânicas, comparáveis às de um aço de alto carbono. Sua resistência à tração pode, por exemplo, atingir valores da ordem de 80 kgf/mm^2 e o alongamento, de 4 a 8%.

A Tabela 54[82] mostra a composição e as propriedades mecânicas de algumas dessas "ligas pesadas".

Como se vê, nesses exemplos, o metal-base tungstênio é mantido sempre num teor mínimo de 90%, de onde a alta densidade obtida.

4 – Materiais porosos A fabricação de determinados produtos que apresentam porosidade proposital e controlada é um dos exemplos típicos da importância da técnica da metalurgia do pó, no sentido de obtenção de efeitos físicos e estruturais especiais.

Os principais materiais porosos sinterizados são os "filtros metálicos" e os "mancais" ou "buchas autolubrificantes".

Os "filtros metálicos" são produzidos comumente de bronze ou aço inoxidável. Em qualquer caso, o pó empregado é o da liga correspondente

e apresenta uma granulação maior que a normalmente utilizada nos outros tipos de pós; além disso, sua forma é geralmente esférica.

A operação de compactação é realizada sem aplicação de pressão ou a pressão muito baixa.

As peças são produzidas em grande variedade de formas e dimensões, como discos, copos etc. São aplicadas como filtros e diafragmas na indústria química para gases, óleos e diversas soluções químicas, na petroquímica etc.; por serem materiais metálicos, possuem propriedades mecânicas superiores aos materiais comuns, como os cerâmicos, utilizados nas mesmas aplicações.

Os "mancais" ou "buchas autolubrificantes" constituem o material sinterizado poroso mais importante, devido a seu extenso uso, no formato principalmente de buchas (cilíndricas simples, cilíndricas com flange, esféricas simples, esféricas com pescoço etc.), na indústria automobilística em equipamentos tais como geradores, motores de arranque, bombas de água, limpadores de pára-brisas etc., na indústria de aparelhos eletrodomésticos, tais como exaustores, ventiladores, batedeiras, liqüidificadores, máquinas de lavar, em motores fracionários e muitas outras aplicações.

A liga mais comumente empregada na confecção dos mancais porosos é o bronze, em que o teor de estanho varia de 9 a 10%, contendo ainda grafita, entre 1 e 2%.

As peças são compactadas na forma definitiva e a sinterização é levada a efeito a 800°C, de modo a produzir-se uma estrutura correspondente à do bronze 90-10. Em seguida, as peças são submetidas a uma calibragem, sobretudo do diâmetro interno, porque, geralmente, as tolerâncias dimensionais exigidas são muito estreitas.

As pressões de compactação relativamente baixas, mais a presença de grafita e de uma substância volátil adicionada na mistura dos pós, proporcionam a formação de poros interligados e em comunicação com a superfície. O volume total de poros presentes pode chegar a 30%.

Depois de sinterizadas, as buchas são impregnadas de óleo, geralmente sob vácuo, a temperaturas acima da ambiente (em torno de 70°C). Em poucos minutos, os poros ficam impregnados de óleo e o material adquire característicos de autolubrificação.

O princípio da autolubrificação é o seguinte: ao girar o eixo de qualquer aparelho onde esteja montado um mancal da natureza descrita, o óleo é arrastado dos poros até a superfície do eixo, quer por ação de bombeamento do eixo em rotação, quer por ação do calor que se desenvolve devido ao atrito, aumentando a fluidez do lubrificante.

Forma-se, assim, uma película contínua e uniforme de óleo que impede o contato direto de metal contra metal. Ao interromper-se o movimento do

eixo, é o óleo reabsorvido pelos poros, por ação de capilaridade, repetindo-se essa ação alternada toda vez que o eixo gira ou pára, com insignificante ou nenhuma perda de óleo.

Adições na mistura original de cobre e estanho, de níquel, fósforo ou ferro aumentam a resistência mecânica das buchas resultantes.

Além do bronze, são fabricados mancais autolubrificantes de ferro, mais resistentes mecanicamente; além disso, possuem o coeficiente de expansão térmica próximo ao eixo do aço.

As pressões de compactação são maiores e a temperatura de sinterização é geralmente de 1.100°C.

Essas buchas de ferro podem ser de três tipos:

– tipo 1 – com 0,5 a 20% de grafita, apresentando excelente resistência ao desgaste, mas são frágeis;

– tipo 2 – com 10% de cobre, fáceis de calibrar, mas com menor resistência ao desgaste;

– tipo 3 – com 25% de cobre, fáceis de calibrar e razoável resistência ao desgaste.

As mais comuns apresentam, contudo, carbono (grafita) até 1,0% e cobre até 10,5%.

Uma das aplicações interessantes do ferro poroso sinterizado impregnado de óleo foi feita, durante a última guerra, pelos alemães, na fabricação de "cintas de propulsão" de projéteis; essas cintas apresentaram, aparentemente, vida mais longa que as de cobre.

Utilizam-se também buchas de ferro-chumbo-grafita, com 2 a 6% de chumbo, as quais são mais resistentes que as anteriores.

De um modo geral, as buchas à base de ferro são empregadas quando as pressões de serviço são mais críticas ou elevadas.

As propriedades dos vários tipos de ligas para buchas porosas estão indicadas na Tabela 55 [83].

Outra aplicação importante da metalurgia do pó nesse setor é a de "mancais com suporte de aço".

O tipo mais comum é aquele em que uma chapa de aço de suporte – geralmente revestida de cobre – é coberta com uma camada de pó de uma liga Cu-Pb.

Essa camada é submetida à sinterização, resultando uma camada porosa que adere à capa de aço. Em seguida, procede-se a uma laminação e re-sinterização.

TABELA 55

PROPRIEDADES DE LIGAS CONVENCIONAIS PARA BUCHAS POROSAS

Material	Densidade g/cm³	Conteúdo mínimo de óleo %	Máxima carga estática kgf/mm²	Resistência à tração kgf/mm²	Alongamento %
Bronze de baixa densidade	5,8/6,2	25	3,6/5,3	8,7	3
Bronze de média densidade	6,2/6,4	18	5,3/7,1	10,2	4
Bronze de alta densidade	7,0/7,4	11	7,5	10,7	—
Ferro de baixa densidade	5,7/6,2	18	7,1	10,7	—
Ferro de alta densidade	6,0/6,4	15	14,3	26,5	—
Fe-Cu	5,8/6,2	18	10,7/14,3	16,3	1
Fe-Cu-Sn (45Cu-5Sn)	5,6/6,0	28	5,3	10,2	2

As principais composições utilizadas estão indicadas na Tabela 56,(84) com os correspondentes valores de dureza Vickers.

TABELA 56

TIPOS DE MANCAIS COM SUPORTES DE AÇO

Nº	Cobre	Chumbo	Estanho	Dureza
1	60	40	–	25 – 35 HV
2	70	30	–	30 – 45 HV
3	75	24	1	40 – 50 HV
4	74	22	4	45 – 60 HV
5	80	10	10	60 – 80 HV

As ligas nºs 1 a 4 são empregadas em mancais de virabrequins e a nº 5 em pequenos mancais de extremidade.

5 – Materiais para contatos elétricos Tem-se aqui também uma aplicação exclusiva da metalurgia do pó: combinação de materiais metálicos que não se ligam pelos processos convencionais de fusão e que, por isso, mantêm as propriedades dos componentes.

As combinações mais conhecidas são:

- tungstênio ou molibdênio com prata ou cobre;
- cobre, bronze ou prata com grafita;
- prata com carboneto de tungstênio.

Em princípio, contudo, os materiais para contato elétrico podem ser divididos em dois grupos:

- materiais "metal-grafita"
- materiais compostos ou "pseudoligas".

5.1 **Materiais "metal-grafita"** São empregados em escovas coletoras de corrente de equipamento elétrico. Servem para transferir corrente elétrica entre partes estacionárias e em movimento de motores, geradores, conversores rotativos ou de reostatos, chaves elétricas etc.

As escovas exclusivamente de carbono são adequadas para aplicações em que se têm alta voltagem e baixa corrente. Entretanto, onde se têm condições opostas, ou seja, baixa voltagem e alta corrente, é necessário o emprego de um material que tenha maior capacidade de transportar corrente elétrica.

A combinação de metais ou ligas de altas condutibidades térmica e elétrica – como prata, cobre ou bronze – com grafita, a qual apresenta, além de boa condutibilidade, excelentes característicos lubrificantes, de modo a reduzir o atrito e o desgaste, permitiu resolver, por assim dizer, o problema, produzindo um material que combina as características dos componentes.

A quantidade de grafita varia de 5 a 70%. Nas composições de maior quantidade de grafita, é necessário empregar-se uma substância aglomerante, como piche, para assegurar coesão suficiente do produto sinterizado.

5.2 **Materiais compostos ou "pseudoligas"** Os contatos elétricos empregados em serviços pesados ou críticos, para operarem com plena eficiência, deverão caracterizar-se por duas propriedades distintas: elevada condutibilidade elétrica e elevada resistência ao calor.

Os fatores destrutivos fundamentais dos materiais nas aplicações de contato elétrico são: calor que se desenvolve devido à resistência elétrica, formação de arco e desgaste devido ao movimento mecânico. A formação do arco, por sua vez, pode provocar uma como que soldagem de materiais, o que leva, em última análise, à transferência ou perda de material.

Se, de um lado, a prata e o cobre são os melhores elementos, sob o ponto de vista de condutibilidade elétrica, por outro lado sua resistência ao calor e ao desgaste são relativamente pequenas.

Procurou-se, então, aliar-se a esses metais outros que se caracterizassem por elevada resistência ao calor e ao desgaste: o tungstênio ou o molibdênio.

A associação de metais dessa natureza, de modo a incorporar-se, numa única peça, os característicos intrínsecos de cada um, só é possível pela técnica de metalurgia do pó.

Originaram-se, assim, os contatos sinterizados de cobre ou prata com tungstênio ou molibdênio – as "pseudoligas".

Geralmente, o componente refratário – W ou Mo – apresenta-se em teores entre 40 e 85% em peso.

Os contatos de prata-tungstênio possuem uma resistência de contato um pouco menor que os de cobre-tungstênio, porém sua resistência à oxidação é maior; por essa razão, são preferidos nos casos de condução de correntes permanentes, porque a elevação de temperatura é menor que nos contatos Cu-W.

A pequena tendência à soldagem dessas pseudoligas pode ser ainda mais reduzida se parte do tungstênio for substituído por carboneto de tungstênio.

Os contatos de cobre-tungstênio empregam-se em interruptores de potência de altas tensões, na forma de anéis interruptores, lâminas de contato e outras formas.

Os de prata-tungstênio empregam-se em interruptores de potência de baixa tensão, como principais condutores de uma corrente permanente, interruptores e comutadores de potência para guindastes etc.

A fabricação desses contatos obedece a dois procedimentos: emprego da técnica básica de metalurgia do pó, ou seja, mistura, compactação, sinterização e conformação final ou emprego da técnica de infiltração.

Quando se emprega a técnica usual, as propriedades físicas do contato, principalmente sua condutibilidade elétrica, são melhoradas consideravelmente quando a sinterização é realizada a uma temperatura acima do ponto de fusão do metal de alta condutibilidade, ou seja, do cobre ou da prata. Devido à grande contração que, nesse caso, ocorre durante a sinterização, é necessário uma operação final de conformação, que pode consistir de uma recompressão ou calibragem ou de usinagem. Pode-se empregar ainda operações de forjamento ou extrusão, que conferem os melhores característicos de densidade, dureza e condutibilidade. Entretanto, essas operações somente são possíveis quando a quantidade de metal refratário é relativamente pequena. Quando esse metal refratário está presente em teores superiores ou próximos de 70 a 80%, é quase impossível essa conformação posterior. Recomenda-se, nesses casos, compressão a quente e retificação final.

A técnica de infiltração pode ser realizada de dois modos:

– confecção de um "esqueleto poroso" do metal refratário, o qual é, a seguir, mergulhado num banho líquido do metal de alta condutibilidade e menor ponto de fusão, cobre ou a prata;

– confecção de um "esqueleto poroso" do metal refratário, seguindo-se infiltração pelo contato direto do metal de menor ponto de fusão, ao sinterizar-se o conjunto a uma temperatura superior à do ponto de fusão desse metal.

A Tabela 57[85] indica as propriedades de vários materiais para contatos, incluindo a condutibilidade em %IACS (International Annealed Copper Standard).*

* Em %IACS, a condutibilidade da prata metálica é 106.

TABELA 57

PROPRIEDADES DE ALGUNS MATERIAIS PARA CONTATOS ELÉTRICOS PRODUZIDOS PELA METALURGIA DO PÓ

Material	Densidade g/cm³	Limite de resistência à tração kgf/mm²	Dureza Rockwell	Condutibilidade elétrica % IACS
W – 27,5 Ag	15,6	49,0	90 B	49
W – 35,0 Ag	14,8	35,0	85 B	51
W – 49,0 Ag	13,5	24,5	55 B	65
W – 15,0 Ag	17,0	45,5	26 C	38
W – 13,0 Cu	16,7	63,0	26 C	33
W – 26,0 Cu	14,7	63,0	98 B	46
W – 45,0 Cu	12,6	44,1	79 B	55
WC – 50,0 Ag	12,4	28,0	91 B	47
WC – 44,0 Cu	11,6	52,5	99 B	43
Mo – 39,0 Ag	10,2	42,0	82 B	47
Mo – 50,0 Ag	10,2	–	75 B	52

6 – Materiais de fricção sinterizados São aplicados em sistemas de embreagem e frenagem de equipamento pesado de terraplenagem, além de equipamento militar (tanques de guerra, por exemplo), aviões, prensas, tornos, pontes rolantes e outras aplicações onde se possa tirar o máximo proveito das propriedades especiais que apresentam. Tais propriedades são, em linhas gerais, as seguintes:(86)

– coeficiente de fricção igual ou apenas ligeiramente inferior ao dos materiais de fricção não-metálicos;

– regularidade das propriedades de fricção com a variação da temperatura; essa não é uma propriedade típica dos materiais não-metálicos para fricção, os quais não suportam bem as bruscas variações de temperaturas que se verificam nas operações de frenagem e embreagem;

– resistência ao calor gerado;

– boa condutibilidade térmica;

– resistência ao desgaste;

– resistência à transferência de material de fricção à superfície de trabalho, evitando o fenômeno de "agarramento";

– suavidade de funcionamento.

O conjunto desses característicos só é possível conseguir, se se misturarem materiais que, em si, possuam essas propriedades e as transfiram para a mistura resultante.

Um dos tipos mais importantes de materiais de fricção sinterizados tem como base o cobre. O cobre atua como arcabouço metálico à camada de fricção, para o que se junta o estanho, de modo a resultar, na sinterização, o bronze. O cobre é ainda o elemento fundamental na dissipação do calor gerado durante o atrito.

Os teores de cobre variam de 60 a 85% e o de estanho entre 2 a 10%. O chumbo também é adicionado na mistura: as suas partículas ficam dispersas no corpo da mistura e atuam como lubrificantes nas operações de frenagem e embreagem, no caso da temperatura de trabalho ultrapassar seu ponto de fusão, evitando-se assim o fenômeno de "agarramento" já mencionado.

O zinco e o ferro são eventualmente adicionados em algumas misturas.

Para conferir as propriedades de fricção, adicionam-se à mistura pós de substâncias abrasivas, como sílica, óxido de alumínio, feldspato, carboneto de silício, silimanita, mulita etc.; chegando a constituir até 20% em peso da mistura.

Finalmente, introduz-se igualmente pós de natureza lubrificante, como grafita e sulfeto de molibdênio, para, inicialmente, melhorar as condições de compactação da mistura e, quando as peças estão em serviço, suavizar o funcionamento dos conjuntos onde elas serão montadas.

As peças empregadas como material de fricção sinterizado caracterizam-se por apresentarem geralmente pequena espessura e uma área superficial muito grande. Essas dimensões exigem que se adotem certos artifícios técnicos durante a sua produção.

A compactação, por exemplo, não pode ser levada a efeito pelo enchimento automático das matrizes com a mistura de pós. Do mesmo modo, os compactados comprimidos, devido a sua grande área e pequena espessura e devido ainda ao fato de apresentarem uma quantidade comparativamente baixa de material metálico, são muito frágeis e devem ser manuseados com grande cuidado.

A sinterização não melhora apreciavelmente a sua rigidez, de modo que as peças compactadas, geralmente em forma de anéis, são aplicadas em suportes de aço onde, durante a sinterização, se soldam, ficando assim

proporcionadas ao produto final, as indispensáveis rigidez e resistência mecânica.

As Tabelas 58 e 59[87] mostram respectivamente composições típicas de materiais de fricção empregados em embreagens e freios e as funções dos vários componentes desses materiais.

TABELA 58

COMPOSIÇÕES TÍPICAS PARA EMBREAGENS E FREIOS ESPECÍFICOS

Embreagens e freios, em seco	75 Cu; 6 Pb; 7 Sn; 5 grafita; 4 MoS 3 feldspato 56 Fe; 14 Zn; 18 grafita – 8 cromita 4 SiC
Freios de aviões	63 mín Fe – 4 grana de ferro coquilhado; 3 silicieto de ferro; 2,5 PbO; 4,5 Sb e 6 SiC
Embreagens e freios, em óleo	74 Cu; 3,5 Sn; 2 Sb; 16 grafita; 4 galena

7 – **Ferro e aço sinterizados** A fabricação de peças sinterizadas de ferro e aço constitui, no atual estágio da indústria, o campo mais importante da metalurgia do pó.

As peças sinterizadas de ferro e aço são produzidas na forma definitiva ou, por questões técnicas (furos laterais, roscas e particularidades semelhantes), na forma quase definitiva, exigindo, pois, algumas operações posteriores de usinagem e acabamento.

A pressão de compactação varia de 1 a 10 tf/cm^2, em função principalmente da compressibilidade do pó utilizado. A temperatura de sinterização, para os casos mais comuns, é de 1.100°C, mas para os aços pode chegar a 1.200°–1.300°C.

As técnicas modernas de fabricação que incluem utilização de pós de melhor compressibilidade, dupla compressão e dupla sinterização, impregnação com cobre ou liga de cobre, permitem atingir densidades elevadas, superiores a 7,5 g/cm^3.

BIBLIOTECA

TABELA 59

COMPOSIÇÃO DE MATERIAIS DE FRICÇÃO TÍPICOS

Pó	Tamanho de partícula	Quantidade %	Objetivo
Cobre	–150 mesh	62	Cu e Sn formam uma matriz de bronze para condução do calor
Estanho	–325 mesh	7	Idem
Ferro	–100 mesh	10	Aumenta o coeficiente de fricção
Chumbo	–325 mesh	10	Atua como lubrificante secundário
Sílica	–200 mesh	4	Principal agente controlador da fricção
Grafita	–325 mesh	7	Atua como lubrificante
Pressão aplicada na mistura de pó: cerca de 1,4 tf/cm^2 Sinterização: 760° C, durante uma hora			

Nessas condições, as peças podem ser submetidas a tratamentos térmicos, de modo a ter suas propriedades consideravelmente melhoradas.

A Tabela 60[88] apresenta a influência do tratamento térmico sobre as propriedades do aço sinterizado, em comparação com aço convencional.

Tratamentos de cementação ou carbonitretação para melhorar a resistência ao desgaste e tratamentos superficiais, como oxidação a vapor, fosfatização, cromação etc., para melhorar a resistência à corrosão, podem também ser facilmente aplicados.

O tratamento a vapor é realizado a temperaturas entre 580° e 600°C, numa câmara em que se introduz uma corrente regular de vapor de água; o resultado do tratamento é formação de uma casca superficial de óxido de ferro muito estável e aderente, que previne contra a corrosão, além de aumentar a dureza e a resistência ao desgaste.

TABELA 60

INFLUÊNCIA DO TRATAMENTO TÉRMICO SOBRE AS PROPRIEDADES DE AÇO SINTERIZADO, EM COMPARAÇÃO COM AÇO CONVENCIONAL

Material	Carbono %	Densidade g/cm³	Estado	Resistência à tração kgf/mm²	Alongamento %	Dureza Brinell
Aço convencional	0,19-0,25		Recozido	42-50	27	120-145
			Temperado em água a 860°C e revenido a 450°C	62	18	177
			Idem, mas revenido a 700°C	53	24	152
Aço sinterizado	0,27	7,54	Apenas sinterizado a 1.100°C	40	23,5	124
			Temperado em óleo a 860°C e revenido a 320°C	47	22,5	134
			Idem, mas revenido a 704°C	37	34	120
			Temperado em água a 830°C e revenido a 320°C	58	13	158
Aço convencional	0,42-0,50		Recozido	60-72	17	171-206
			Temperado em água a 840°C e revenido a 450°C	84	10	240
			Idem, mas revenido a 700°C	65	19	185
Aço sinterizado	0,52	7,47	Apenas sinterizado a 1.100°C	47	17	137
			Temperado em óleo a 830°C e revenido a 320°C	59	14,5	146
			Idem, mas revenido a 704°C	41	25	126
			Temperado em água a 830°C e revenido a 320°C	86	8	311
Aço convencional	0,57-0,65		Recozido	70-85	14	200-243
			Temperado em água a 800°C e revenido a 450°C	97	9	277
			Idem, mas revenido a 700°C	72	17	206
Aço sinterizado	0,64	7,43	Apenas sinterizado a 1.100°C	49	11,5	132
			Temperado em óleo a 830°C e revenido a 427°C	68	13	161
			Idem, mas revenido a 704°C	46	16	132
			Temperado em água a 830°C e revenido a 320°C	96	8	218

Os outros tratamentos superficiais, como fosfatização ou cromação, são somente eficazes, se as peças forem suficientemente densas.

Uma das técnicas mais empregadas para aumentar a densidade das peças de ferro e aço sinterizadas e, portanto, sua resistência mecânica, além de melhorar a ductilidade, é a "impregnação metálica", que consiste em obter-se inicialmente uma peça relativamente porosa – às vezes chamada de "esqueleto poroso" – a qual é submetida a um processo de infiltração de cobre ou de uma de suas ligas, de modo a resultar um produto praticamente isento de poros, cuja densidade pode atingir valores até 7,8 g/cm³ e propriedades mecânicas muito próximas das obtidas pelos processos metalúrgicos convencionais.

Outra técnica, recentemente desenvolvida, é a do "forjado sinterizado", em que peças pré-moldadas e sinterizadas de peso determinado de acordo com a configuração da matriz de forjamento, são submetidas a um forjamento em matriz fechada. Resulta uma peça que exige apenas ligeiro acabamento por usinagem.

Essa tecnica está sendo empregada na indústria automobilística para a produção de componentes de embreagem da transmissão automática de automóveis, entre outras aplicações.

As vantagens da técnica são, entre outras, as seguintes:[89]

- fabricação seriada
- economia de material
- bom acabamento superficial
- pouca usinagem posterior
- estrutura fina orientada
- cargas de forjamento e custos de forjamento menores que no forjamento convencional em matriz.

A Tabela 61 apresenta as propriedades mecânicas comparativas de um aço tipo 1040 no estado apenas sinterizado e no estado sinterizado e forjado a quente.

A Tabela 62 indica os tipos principais de ligas utilizados na fabricação de peças de ferro e aço sinterizado.

As aplicações comuns dessas peças são, entre outras:

– *ferro sinterizado, sem elementos de liga, de baixa densidade e baixa resistência mecânica*: pequenas engrenagens e componentes mecânicos, onde as cargas de trabalho são pequenas;

TABELA 61

PROPRIEDADES COMPARATIVAS DE UM AÇO 1040 NO ESTADO APENAS SINTERIZADO E NO ESTADO SINTERIZADO E FORJADO A QUENTE

	Aço 1040			
	Sinterizado	Temperado de 850°C e revenido a 175°C	Sinterizado e forjado	Temperado de 850°C e revenido a 175°C
Densidade, g/cm^3	6,6	–	7,67	–
Limite de escoamento, kgf/mm^2	12,0	26,0	35,0	50,0
Limite de resistência à tração, kgf/mm^2	16,0	31,0	51,0	74,0
Alongamento em 1" %	1,8	0,8	25,0	10,0

TABELA 62

TIPOS PRINCIPAIS DE LIGAS EMPREGADAS NA FABRICAÇÃO DE PEÇAS SINTERIZADAS DE FERRO E AÇO

Liga	Característicos químicos, %	Densidade g/cm^3	Característicos mecânicos		
			Resistência à tração kgf/mm^2	Alongamento %	Dureza aparente
Ferro puro, de baixa densidade	C-inf. a 0,3	5,6 a 6,0	11,2	2,0	–
Ferro puro de alta densidade	C-inf. a 0,3	6,8 a 7,6	21,0 a 28,0	6 a 11	60 RF a 30 RB
Aço	C-cerca 1,0	5,6 a 6,4	20,3 a 24,5	0 a 0,5	25 RB a 50 RB
Aço ao Cu	C-O a 1,0 Cu-1,5 a 10,5	5,6 a 6,4	21,0 a 42,0	0 a 1,0	45 RB a 70 RB
Aço ao Ni no estado sinterizado	C-O a 0,9 Ni-1,0 a 8,0 Cu-O a 2,5	6,4 a 7,6	19,6 a 65,1	4 a 10,5	38 RB a 96 RB
Idem, no estado tratado termicamente	C-0,3 a 0,9 Ni-1,0 a 8,0 Cu-O a 0,5	6,4 a 7,6	57,5 a 126	0,5 a 2	32 RC a 47 RC
Ferro e aço infiltrado, no est. sinterizado	C-O a 0,3 Cu-15 a 25	7,2 a 7,6	45,5	1,0	60 RB
Idem, no estado tratado termicamente	C-0,6 a 1,0 Cu-15 a 25	7,2 a 7,6	87,5	0 a 0,5	42 RC
Aço inoxidável	AISI 303 AISI 316 AISI 410	5,6 a 6,8	24,5 a 38,5	0 a 4	–

– *ferro-carbono, ferro-cobre-carbono e ferro-carbono-níquel*, de densidade média (entre 6,2 e 6,6 g/cm^3) e limite de resistência à tração entre 28 e 49 kgf/mm^2: componentes de máquinas de escrever, de calcular, de brinquedos, de aparelhos eletrodomésticos, de veículos etc.;

– *aço ao níquel, ferro e aços infiltrados*, de alta densidade (acima de 6,8 g/cm^3): componentes de veículos, de máquinas de calcular, de armas e muitas outras aplicações onde as peças de aço produzidas pelos processos metalúrgicos usuais são substituídas por peças sinterizadas, por questões de economia, tolerâncias dimensionais e acabamento.

8 – **Materiais magnéticos** Entre os materiais magneticamente moles, são produzidas por metalurgia do pó peças polares para motores ou geradores a corrente contínua e aplicações análogas, em ferro sinterizado, ligas Fe-Ni sinterizadas e laminadas para alto-falantes e instrumentos de medida e núcleos de auto-indução para aplicações de alta freqüência, mediante a compactação de pó de ferro puro ou ligas Fe-Ni como permalloy.

A vantagem do processo de sinterização sobre a fundição reside no fato do ferro em pó ser de alta pureza, essencial para as melhores propriedades magnéticas, nas aplicações consideradas.

Entre os materiais magneticamente duros, os mais importantes, sob o ponto de vista de metalurgia do pó, são alguns tipos de ímãs Alnico que, como se sabe, são relativamente difíceis de obter por fundição e usinagem posterior, dada a sua pequena usinabilidade.

Na produção desses materiais, emprega-se o alumínio na forma de uma liga Fe-Al, face às dificuldades de usar-se alumínio puro. A sinterização é realizada a temperaturas entre 1.200° e 1.300°C, em presença de uma fase líquida, porque a liga mencionada Fe-Al tem ponto de fusão inferior àquela faixa de temperaturas. A atmosfera de sinterização é hidrogênio puro. É necessário que o resfriamento subseqüente seja rápido, em atmosfera de hidrogênio.

As propriedades magnéticas desses materiais são melhoradas se se aplicar um campo magnético durante o resfriamento.

Outros materiais magneticamente duros que podem ser produzidos por metalurgia do pó incluem os aços Fe-Co-W e Fe-Co-Mo e ligas de Fe e Co com Cu e Ni.

9 – **Metais e ligas não-ferrosos produzidos por metalurgia do pó** Praticamente todos os metais e ligas não-ferrosos podem ser utilizados para a fabricação de peças sinterizadas. Os exemplos mais importantes são os seguintes:

9.1 **Cobre e suas ligas** Peças sinterizadas de cobre são normalmente aplicadas quando se visa alta condutibilidade elétrica. É óbvio que as peças de cobre somente são produzidas por metalurgia de pó, quando este processo se torna mais econômico que os processos metalúrgicos convencionais. De qualquer modo, as técnicas atualmente usadas permitem obter-se peças de alta densidade, o que, sob o ponto de vista prático, é importante.

Quando se visa alta resistência à corrosão, o bronze é a liga escolhida. Do mesmo modo, engrenagens, cames, arruelas, parafusos e outros componentes empregados em todos os setores industriais de formas irregulares que aconselhem o uso da técnica, são produzidos em latão e alpaca, cujos característicos são boa resistência mecânica e boa ductilidade, elevada usinabilidade (se eventualmente for necessário uma operação adicional de usinagem) e alta resistência à corrosão.

A Tabela 63[90] apresenta propriedades e aplicações de algumas ligas de cobre obtidas por metalurgia de pó.

9.2 **Alumínio e suas ligas** A metalurgia do pó do alumínio é de desenvolvimento recente, porque vários problemas técnicos impediram por muito tempo a aplicação da técnica. Uma das dificuldades relacionava-se com a compactação do pó, que ocasionava como que uma soldagem entre as partículas de alumínio e as paredes das matrizes e tornava problemática a obtenção de compactados em boas condições, a não ser utilizando lubrificação manual entre cada compressão. Outra dificuldade relacionava-se com o elevado grau de oxidação dos compactados durante a sinterização.

Esses problemas foram resolvidos pelo emprego, entre outros artifícios, de adição de um lubrificante à base de cera no pó antes da compactação, pela adição de pó de magnésio para diminuir a oxidação etc.

Aparentemente, o maior êxito foi obtido pelo emprego de técnica especial de sinterização (velocidade de aquecimento e tempo à temperatura de sinterização), sem necessidade de atmosfera protetora, ou seja, sinterizando ao ar.[91]

As peças oxidam apenas ligeiramente e apresentam boa rigidez. Não há quase alteração dimensional, de modo que as operações de calibragem são praticamente eliminadas.

Geralmente, são produzidas peças de ligas de alumínio, suscetíveis de tratamento de endurecimento por precipitação.

A Tabela 64[92] apresenta as propriedades e as aplicações de algumas ligas de alumínio sinterizadas.

10 – **Ferritas** As ferritas compreendem uma série de óxidos metálicos complexos de propriedades magnéticas características.

TABELA 63

PROPRIEDADES TÍPICAS E APLICAÇÕES DE ALGUMAS LIGAS DE COBRE SINTERIZADAS

Material, composição, %	Condição	Densidade g/cm³	Limite de resistência à tração kgf/mm²	Dureza aparente Rockwell	Alongamento %	Aplicações
Latão com 88 a 91 Cu 8,3 a 12,0 Zn e 0 a 0,3 Fe	Sinterizado	7,4	14,0	57H	13	Componentes mecânicos exigindo resistência à corrosão e aspecto agradável
Idem	Sinterizado	7,8	18,9	70H	10	
Latão com 88 a 91 Cu 1,0 a 2,0 Pb restante Zn	Sinterizado	7,4	12,6	46H	14	Idênticas às de acima; tipo de usinagem fácil
Idem	Sinterizado	7,8	17,8	60H	20	
Latão com 77 a 80 Cu 1,0 a 2,0 Pb, 0,3 máx. Fe, 0,1 máx. Sn restante Zn	Sinterizado	7,4	16,8	55H	13	Componentes mecânicos resistentes à corrosão atmosférica. Componentes de armas, peças de fechaduras, engrenagens porcas etc.
Idem	Sinterizado	7,8	19,6	68H	19	
Idem	Sinterizado	8,2	22,4	75H	23	
Latão c/68,5 a 71,5 Cu 27,8 a 31,5 Zn, 0 a 0,3 Fe	Sinterizado	7,4	21,7	76H	20	Componentes mecânicos exigindo resistência à corrosão e aparência agradável
Idem	Sinterizado	7,8	25,9	85H	26	

TABELA 63 (*continuação*)

PROPRIEDADES TÍPICAS E APLICAÇÕES DE ALGUMAS LIGAS DE COBRE SINTERIZADAS

Material, composição, %	Condição	Densidade g/cm³	Limite de resistência à tração kgf/mm²	Dureza aparente Rockwell	Alongamento %	Aplicações
Latão c/68,5 a 71,5 Cu, 1,0 a 2,0 Pb, restante zinco	Sinterizado	7,4	19,6	65H	22	Como anterior; tipo de usinagem fácil
Idem	Sinterizado	7,8	23,8	76H	27	
Alpaca com 62,5 a 65,5 Cu, 16,5 a 19,5 Ni, rest. Zn	Sinterizado	7,8	21,0	75H	10	Componentes mecânicos, engrenagens, alavancas, componentes elétricos, peças para resistência à corrosão marítima
Idem	Sinterizado	8,2	25,9	85H	12	
Alpaca c/62,5 a 65,5 Cu, 16,5 a 19,5 Ni, 1,0 a 1,8 Pb, rest. Zn	Sinterizado	7,8	21,0	75H	10	Idem; tipo de usinagem fácil
Idem	Sinterizado	8,2	24,5	85H	12	

TABELA 64

PROPRIEDADES TÍPICAS E APLICAÇÕES DE ALGUMAS LIGAS DE ALUMÍNIO SINTERIZADAS

Material, composição %	Tratamento	Densidade g/cm^3	Limite de resistência à tração kgf/mm^2	Dureza Rockwell	Alongamento %	Aplicações
0,25Cu, 0,6Si, 1,0Mg 1,5 lubrif, rest. Al*	Sinterizado (a 593°C)	2,55	14,7	65/70H	0	Quando se desejam resistências mecânica e à corrosão
	Tratado	2,55	24,1	80/85E	2,0	
4,4Cu, 0,8Si, 0,5Mg 1,5 lubrif. rest. Al*	Sinterizado	2,64	21,2	70/75E	3,0	Quando se desejam boa resistência mecânica e razoável ductilidade
	Tratado	2,64	33,6	85/90E	2,0	
2,0Cu, 1,0Mg, 0,5Si, rest. 4Al	Sinterizado	2,53	16,8	83H	6,0	Quando se desejam boas propriedades mecânicas
	Tratado	2,53	26,6	74E	3,0	
0,25Cu, 1,0Mg, 0,6Si, 0,10Cr rest. Al	Sinterizado	2,50	12,9	66H	10,0	Quando se desejam boas resistências mecânicas e à corrosão, boa ductilidade e boa conductibilidade
	Tratado	2,50	21,0	71E	2,0	
1,6Cu, 2,5Mg, 0,20Cr, 5,6Zn, rest. Al	Sinterizado	2,51	21,0	90H	3,0	Quando se desejam boas resistências mecânicas e à corrosão, boa ductilidade e elevada dureza
	Tratado	2,51	31,5	80E	2,0	

* Al com 99,4 Al, 0,3 Al_2O_3, 0,15 Fe, 0,07 Si, o restante sendo outras substâncias metálicas.

BIBLIOTECA

Sua estrutura corresponde à do composto $MgAl_2O_4$[93] ou um óxido misto $Al_2O_3.MgO$, do tipo denominado "spinel", cujo reticulado é cúbico centrado, em que se fazem presentes ânions de oxigênio e, parcialmente nos interstícios, cátions metálicos.

Um conceito fundamental das ferritas é o produto μQ, principalmente nas aplicações em microondas e no projeto de indutores e transformadores. μ é a permeabilidade magnética e Q representa a qualidade do circuito, porque

$$Q = \frac{Lw}{R},$$

onde w é a pulsação (função da freqüência), L a indutância e R a resistência ôhmica.

Esse produto nas aplicações industriais deve ser alto.

Alguns valores de μQ são dados a seguir, para uma freqüência de 20 kHz:

pó de ferro	– 2.000
pó de permalloy	– 4.000
pó de permalloy ao Mo	– 10.000
ferrita de zinco e manganês	– 250.000

Outro elemento importante a considerar nas ferritas é a temperatura Curie, ou seja, a temperatura acima da qual os materiais perdem seu ferromagnetismo.

Quanto às propriedades físicas das ferritas, as mais importantes e que determinam suas aplicações industriais são as magnéticas e elétricas.

Como são materiais cerâmicos, à base de óxidos, sua condutibilidade elétrica obviamente é pequena, sobretudo quando comparada com a dos metais e ligas magnéticas, que são, geralmente, também bons condutores da eletricidade.

O ferro, por exemplo, possui uma resistividade de 10^{-5} ohm-cm, enquanto esse característico, nas ferritas comerciais, varia de 10^2 a 10^9 ohm.cm.

Assim, a combinação dessas propriedades físicas, magnetismo e resistividade, num mesmo material, recomenda a aplicação das ferritas em condições magnéticas de alta freqüência.

As ferritas podem ser naturais ou sintéticas.

Alguns óxidos, como magnetita Fe_3O_4, jacobsita $(Fe, Mn)_3O_4$, franklinita $(Fe, Mn.Zn)Fe_2O_3$, magnesioferrita $MgFe_3O_4$, magnetoplumbita $PbMn_{3,5}Fe_{7,5}Al_{0,5}Ti_{0,5}O_{19}$, são ferritas naturais, cuja aplicação prática, entretanto, é muito restrita.

As sintéticas, obtidas por processos de metalurgia do pó, são do tipo "spinel". Compreendem vários tipos:

– $Mn_{0,5}Zn_{0,5}Fe_2O_4$ e $Ni_{0,5}Zn_{0,5}Fe_2O_4$, de alta permeabilidade e baixa perda por histerese, utilizadas em transformadores de alta freqüência e filtros. Suas resistividades elétricas são de 10^2 e 10^5 ohm.cm respectivamente;

– $Mg_{0,5}Mn_{0,5}Fe_2O_4$, que apresenta um ciclo de histerese do tipo retangular e é utilizada no armazenamento de informações. Apresenta ainda uma resistividade da ordem de 10^8 a 10^9 ohm.cm e seu fluxo magnético pode ser invertido em cerca de 1 microssegundo;

– $BaO.6Fe_2O_3$, na forma de pó fino sinterizado; corresponde a um material excelente para ímã permanente.

Conforme os tipos e as propriedades de permeabilidade, produto Q, histerese, impedância, temperatura Curie etc., são empregadas em indutores de filtros, transformadores de alta freqüência, núcleos de antenas, indutores variáveis, sintonizadores e seletores, diminutos transformadores, núcleos de memória, isolantes, circuladores, atenuadores, comutadores, moduladores, controles de temperatura etc.

Na fabricação das ferritas, parte-se de pós metálicos geralmente do tipo carbonila, porque são os mais puros e a pureza é essencial. No caso de ferritas ao Mn e Zn, parte-se de pós de Fe_2O_3, $MnCO_3$ e ZnO quimicamente puros, os quais, depois de misturados nas proporções desejadas, são pelotizados em tambor giratório e sinterizados, em forno sem controle de atmosfera, a 1.200°C, durante uma hora, sendo a seguir pulverizados.

Os pós são a seguir submetidos às etapas comuns da metalurgia do pó.

11 – Conclusões Muitas das limitações ou restrições que se atribuíam às peças sinterizadas estão hoje ultrapassadas. Assim:

– a metalurgia do pó, mediante técnicas apropriadas, pode produzir peças com densidade praticamente igual ou muito próxima da teórica do metal ou liga considerada. Com tratamento térmico adequado, em peças de aço, pode-se conseguir limites de resistência à tração superiores a 100 kgf/mm^2;

– as peças sinterizadas de ferro e aço podem ser tratadas superficialmente, desde que impregnadas com material plástico especial ou com cobre;

– as peças sinterizadas podem ser usinadas com certa facilidade, desde que se utilizem ferramentas de metal duro, com velocidades e avanços adequados;

– a resistência ao choque pode ser tão boa quanto às obtidas pelos processos usuais, desde que as peças sejam suficientemente densas;

– do mesmo modo, a ductilidade depende da densidade;

– peças de forma simples também podem ser produzidas economicamente, desde que as séries sejam grandes, embora a técnica seja mais apropriada para peças de formas complexas;

– peças de metais e ligas não-ferrosos estão sendo normalmente produzidas com as vantagens e característicos inerentes do processo.

Finalmente, já está sendo, de certo modo, comum a fabricação de aços rápidos a partir de pós correspondentes, utilizando as técnicas combinadas de sinterização e laminação.

Um dos processos usuais para obter aços rápidos por metalurgia do pó é o ASEA STORA[93] que parte de pós atomizados. A compactação é feita por pressão isostática a cerca de 4 tf/cm^2, a frio. As briquetes são aquecidas em fornos de indução a 1.000°C e são recompactadas novamente a quente a 1.000°C, à pressão de 1 tf/cm^2. Obtém-se uma peça, ou lingote, inteiramente sinterizada, apresentando, entretanto, certa porosidade, a qual pode ser facilmente forjada ou laminada, adquirindo então a máxima densidade.

A estrutura resultante é muito fina e muito uniforme, o que aparentemente favorece a qualidade da ferramenta, conferindo-lhe vida mais longa.

Em resumo, mesmo não considerando os fatores que tornam a metalurgia do pó uma técnica singular e insubstituível na fabricação de determinados produtos – como se teve oportunidade de verificar no decorrer desta exposição –, as vantagens do seu emprego na fabricação de peças que podem ser obtidas pelos processos metalúrgicos convencionais são de tal ordem que a tornam perfeitamente competitiva com essas técnicas usuais.

CAPÍTULO XX

CIMENTO E CONCRETO

1 – Introdução Embora o cimento e o concreto não sejam materiais de construção mecânica, o autor julgou conveniente apresentar algumas noções a respeito desses materiais, para que o engenheiro mecânico, ao deparar eventualmente com os problemas de uma fundação de máquinas ou de uma construção simples, tenha uma idéia de como aplicá-los.

Sendo o *concreto* uma mistura em que uma *pasta de cimento portland com água* serve de liga entre materiais finos e grosseiros, conhecidos com os nomes de *agregados*, de modo a produzir uma massa dura e resistente, será abordado inicialmente, ainda que de modo superficial, o cimento portland.

2 – Cimento portland O cimento portland é um *aglomerante*, ou seja, uma substância destinada a ligar materiais empregados em construção, como areia, pedregulho ou pedra britada, barras de aço etc.

É um *aglomerante artificial*, resultante do "cozimento", até fusão parcial (cerca de 1.450°C) de uma mistura calcário-argilosa, convenientemente proporcionada. Essa mistura, depois de cozida, é moída e a ela se adiciona certa quantidade de gesso, para regular a "pega", ou seja o tempo de início de endurecimento.

Por outro lado, o tipo de aglomerante que caracteriza o cimento portland é o "hidráulico", ou seja é um aglomerante que pode ser empregado em água.

As matérias-primas essenciais na fabricação do cimento portland são calcário (carbonato de cálcio $CaCO_3$) e argila. Os componentes principais dessa mistura são cal, sílica, alumina e óxido de ferro.

O cozimento de uma mistura dessas substâncias dá um material chamado "clinquer", cujos principais constituintes são: silicato tricálcico $3CaO.SiO_2$, silicato dicálcico $2CaO.SiO_2$, aluminato tricálcico $3CaO.Al_2O_3$, ferro-aluminato-tetracálcico $4CaO.Al_2O_3.Fe_2O_3$ e magnésia MgO. O cozimento deve levar a um produto praticamente isento de cal livre.

O gesso ou gipsita que se adiciona, por ocasião da moagem do clinquer, com o fim de regular o tempo de início de endurecimento, deve ser em quantidade tal que o teor de SO_3 no cimento resultante não seja superior a 2,5%.

A análise química do cimento revelará a presença dos seguintes componentes:(94)

CaO	–	60 a 67%
SiO_2	–	17 a 25%
Al_2O_3	–	3 a 8%
Fe_2O_3	–	0,5 a 6,0%
MgO	–	0,1 a 6,0%
SO_3	–	1 a 3,0%

Os constituintes do cimento – silicatos e aluminatos – são responsáveis pelo endurecimento do cimento, pois quando são misturados com água, se hidratam.

O silicato tricálcico é o responsável pelo endurecimento rápido e pela alta resistência em pouco tempo; o silicato dicálcico, ao contrário, apresenta baixa resistência até sete dias, mas esta aumenta rapidamente depois de um mês, de modo que, além de um ano, os dois silicatos apresentam resistências praticamente idênticas.

Os aluminatos não têm muita importância sob o ponto de vista de resistência.

Os principais característicos do cimento portland e que são objeto de métodos de ensaio* são: finura, pega, expansibilidade e resistência à compressão.

A *finura*, ou seja, o tamanho de grão do cimento deve obedecer à seguinte especificação: o resíduo deixado na peneira normal de 0,075 mm não deve exceder 15%.

---

* O primeiro método de ensaio (MB-1) elaborado pela ABNT foi relativo ao cimento portland. Seus característicos são também objeto da primeira especificação brasileira da ABNT – EB-1.

Quanto à *pega*, costuma-se especificar o início da pega ou o início do endurecimento: este deve verificar-se no mínimo uma hora após o lançamento da água de amassamento.

A *expansibilidade* não pode exceder os seguintes limites:

– expansibilidade a frio – 10 mm
– expansibilidade a quente – 10 mm

Finalmente, a *resistência à compressão* é medida em corpos de prova preparados com "argamassa normal", isto é, que contêm uma parte de cimento e três partes de areia normal, em peso. Essa propriedade deve situar-se entre os seguintes limites:

– a 3 dias de idade – 80 kgf/cm^2
– a 7 dias de idade – 150 kgf/cm^2
– a 28 dias de idade – 250 kgf/cm^2

2.1 **Outros tipos de cimento** Além do cimento portland comum, que é o normalmente empregado nas obras civis e que é também chamado "pega lenta", outros tipos de cimentos são os seguintes:

– *cimento portland branco*, empregado quando se deseja argamassa ou concreto branco;

– *cimento aluminoso*, obtido em fornos especiais, a partir de uma mistura de bauxita e calcário, de tal modo que o cimento resultante contenha pelo menos 30% de alumina. É mais resistente à compressão que o portland comum, não se altera quando submetido a temperaturas elevadas durante um certo tempo e apresenta grande resistência ao ataque por parte de águas agressivas. Sua pega é lenta. Exige, para sua hidratação, cerca do dobro da água que o cimento portland comum;

– *cimento de pega rápida*, empregado em serviços de reparos urgentes ou para concreto a ser utilizado em baixas temperaturas. Esse cimento desenvolve a resistência normal do cimento portland comum em 3 dias ou menos;

– *cimento metalúrgico*, empregado nas mesmas aplicações que o cimento portland comum, obtido a partir de uma mistura adequadamente proporcionada de escória de alto-forno com clinquer.

As aplicações do cimento são feitas como:

– *pasta*, que é a mistura de cimento com determinada quantidade de água; a pasta adquire com o tempo resistência mais ou menos considerável;

– *argamassa*, que consiste numa mistura de cimento, água e agregado miúdo, isto é, areia. O agregado miúdo é definido como aquele cujos grãos são inferiores a 0,5 cm de diâmetro;

– *concreto*, que é a mistura de cimento, água, agregado graúdo (pedregulho ou pedra britada) e agregado miúdo (areia). O agregado graúdo possui tamanho de grão superior a 0,5 cm de diâmetro.

3 – Concreto O concreto resulta, portanto, da adição na pasta de material granuloso resistente e inerte. Essa mistura, quando "fresca" ou recém-preparada, pode ser moldada com facilidade, possibilitando a execução de peças e estruturas das mais diversas formas.

A pasta deve envolver e aderir bem aos grãos dos agregados. Quando a pasta endurece, tem-se um material de grande resistência e, portanto, muito útil nas construções em geral.

O concreto simples, como foi definido, apresenta boa resistência à compressão, mas sua resistência à tração é pequena.

Como em muitas aplicações esta propriedade deve ser assegurada, associam-se ao concreto barras de aço que absorvem partes dos esforços a que as estruturas estão submetidas. Origina-se, assim, o "concreto armado".

A indicação das quantidades relativas de cimento e agregado, em peso ou volume, chama-se "traço".

Uma mistura, por exemplo, de uma parte de cimento, duas partes de agregado miúdo e quatro partes de agregado graúdo é definida pelo traço 1:2:4.

A mistura, contudo, somente fica bem identificada quando se indicar a relação água/cimento, ou seja o volume de água, em litros, correspondente a um quilo de cimento. Por exemplo, a relação 0,8 significa que para cada quilo de cimento devem ser acrescentados 0,8 litros de água.

Chama-se "dosagem" a fixação das proporções dos componentes do concreto.

3.1 **Propriedades do concreto** A propriedade básica do concreto é a *resistência mecânica*. Outro característico importante é a "impermeabilidade".

Nessas propriedades, a pasta exerce um papel fundamental, desde que se admita que os agregados sejam de boa qualidade; em outras palavras, como a pasta é a massa que envolve os agregados, se ela for de alta resistência, o concreto resultante também apresentará elevada resistência; se ela for impermeável, o concreto será igualmente impermeável.

A qualidade da pasta é, pois, essencial.

Os fatores que influem na qualidade da pasta são os seguintes:

– *qualidade do aglomerante*, ou seja, do cimento;

– *condições de "cura"*, ou seja, as condições que influem sobre o desenvolvimento das reações entre o cimento e a água. A "cura" depende da temperatura e da proteção contra a evaporação da água da pasta. Se a temperatura se elevar, as reações de hidratação são aceleradas, além de aumentar-se a evaporação da água da mistura. Se esta evaporação acelerada tiver lugar durante o período de endurecimento, ou seja, enquanto as reações de hidratação estiverem se processando, estas mesmas reações poderão ficar limitadas e resultar um endurecimento precário. Uma excessiva evaporação da água poderá igualmente promover o aparecimento de poros e prejudicar a impermeabilidade do concreto;

– *tempo*, visto que as reações de hidratação não são instantâneas, ou seja, se processam ao longo de um determinado tempo; em outras palavras, mesmo depois de endurecido, as propriedades do concreto melhoram com a idade;

– *relação água/cimento*, este é, de certo modo, o principal fator. Quanto menor for a relação água/cimento, tanto mais difícil a formação de poros, visto que a água excedente àquela necessária para as reações de hidratação, se distribui na massa e cria os poros que prejudicam a impermeabilidade do concreto.

Em particular, a resistência do concreto é afetada pela qualidade da pasta.

Chamando R a resistência mecânica da pasta e x a relação água/cimento, e admitindo-se constantes a qualidade do cimento, as condições de cura e a idade, a resistência mecânica é expressa pela fórmula

$$R = f(x)$$

Para o caso particular da resistência à compressão, que é a propriedade que mais interessa na prática, pode-se exprimir a influência da relação água/cimento sobre a resistência do concreto pela equação:

$$R = \frac{A}{B^x}$$

em que A e B são constantes dependentes da qualidade do cimento, das condições de cura e da idade (Figura 77).[95]

Além da resistência à compressão e da impermeabilidade, outros característicos que devem ser levados em conta no concreto são:

– *consistência*, isto é, a mobilidade da massa que compõe a mistura fresca e a coesão entre os seus elementos componentes. Essa propriedade é importante, pois dela depende a maior ou menor facilidade de lançamento e adensamento do concreto no interior das formas, de acordo com o processo adotado;

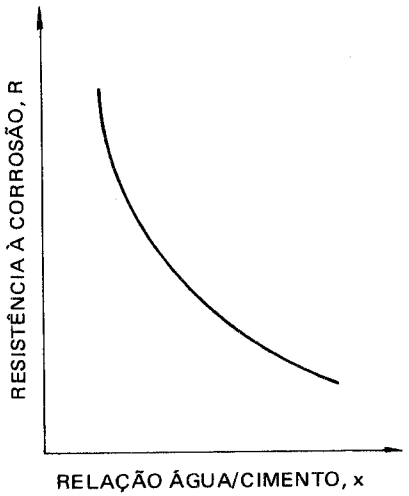


Figura 77 *Curva exprimindo a influência da relação água/cimento* x *sobre a resistência à compressão* R.

– *trabalhabilidade*, característico intimamente relacionado com a consistência da massa. Por outro lado, a trabalhabilidade relaciona-se também com a natureza da obra e com os métodos adotados para lançamento e adensamento do concreto. Assim, por exemplo, um concreto adequado para peças de grandes dimensões, pouco armadas com barras de aço ou com as armaduras espaçadas, pode não ser apropriado para peças delgadas ou muito armadas. Do mesmo modo, um concreto pode não se apresentar adequado para adensamento manual, mas perfeito para adensamento mecânico, por vibração, em que se utilizam dispositivos especiais vibradores.

A trabalhabilidade para uma mesma obra depende exclusivamente da consistência do concreto.

Essa consistência é chamada *plástica*, quando se presta para adensamento manual; entretanto, dentro de uma determinada faixa de plasticidade, ela pode apresentar-se mais ou menos fluida, originando-se assim as consistências *plástico-fluida, plástico-média* e *plástico-seca.*

No caso do adensamento por vibração, a consistência deve ser plástico-seca ou o concreto deve apresentar uma consistência menos fluida.

Do mesmo modo, nesse tipo mecanizado de adensamento, não podem ser usadas as consistências plástico-média ou plástico-fluida, sob pena de ter-se segregação dos agregados, principalmente os graúdos.

3.2 **Dosagem racional do concreto** No concreto, a pasta deve preencher não só os espaços correspondentes aos vazios entre as partículas de agregado como também envolver os grãos uniformemente.

Pode-se dizer, pois, que a consistência da mistura depende da consistência da pasta e da espessura da película que envolve os grãos de agregado.

Por outro lado, se se mantiverem constantes a qualidade e a consistência da pasta, a espessura da película referida varia com a quantidade de agregados, com o volume de vazios entre os grãos e com a superfície total dos grãos, ou seja, da sua composição granulométrica (proporção com que se distribuem os grãos das várias dimensões no agregado total).

Assim sendo, a distribuição granulométrica é um fator de grande importância na consistência do concreto, porque dela depende a espessura da película da pasta que envolve os grãos.

Esse fato pode ser melhor compreendido se, para um agregado de composição granulométrica constante, se fizerem algumas misturas experimentais, originando concretos de determinadas consistências.

Variando a relação água/cimento, ou seja x, a consistência da pasta se modifica e, portanto, a do concreto. Um maior valor de x, dará um concreto mais trabalhável. Variando a quantidade do agregado e mantendo constante x, também se modifica a consistência do concreto, porque varia a espessura da película de pasta que envolve os grãos. Para uma maior quantidade de agregado, em conseqüência, se mantido x constante, o concreto torna-se menos trabalhável.

Mantidos agora constantes os valores de x e da quantidade total do agregado, varia-se a composição deste. Esta variação produz uma modificação do número de vazios e da superfície total dos grãos a serem envolvidos pela pasta, o que afetará a consistência e, portanto, a trabalhabilidade do concreto.

Sempre que se conseguir obter uma consistência mais fluida e trabalhável apenas pela alteração da composição granulométrica do agregado, considera-se que se obteve a melhor composição granulométrica.

Nos concretos que forem adensados por vibração, admite-se maior quantidade de agregado e maiores proporções de grãos graúdos, para idênticos valores da relação água/cimento x.

Por outro lado, o tipo de agregado, principalmente o graúdo, influi sobre a consistência do concreto.

Em igualdade de condições, a pedra britada – que é atualmente o agregado graúdo mais utilizado – apresenta maiores dificuldades para o adensamento que o pedregulho, pois este último, possuindo superfícies mais lisas e formas mais próximas da esférica, diminuem o atrito entre os grãos, o volume de vazios e a superfície total.

Em resumo, a *dosagem racional do concreto*, para um fim específico, requer duas etapas distintas:(95)

a) escolher a relação água/cimento x que, para um dado cimento, determinadas condições de cura e idade, produza pasta que proporcione, na peça a ser produzida, adequada resistência mecânica;

b) procurar obter uma quantidade de agregado e uma composição granulométrica deste, de tal ordem que, misturados com água e cimento, possam produzir uma mistura trabalhável para o emprego considerado.

Não há portanto, na dosagem racional, traços nem consumo de cimento pré-fixados.

Obedecidas as etapas acima, obtém-se economicamente concreto de determinada qualidade e trabalhável.

Na dosagem racional do concreto, é necessário proceder-se a minucioso controle das várias etapas de sua produção, desde o exame dos materiais componentes, inclusive determinação da umidade contida no agregado, até a determinação da consistência e verificação da qualidade do concreto resultante.*

3.3 **Aditivos para concreto** É comum adicionar-se ao concreto certas substâncias, com o objetivo de criar ou reforçar certos característicos.

Esses aditivos são adicionados antes ou depois da mistura. Suas finalidades básicas são as seguintes:(96)

---

* O trabalho de Ary F. Torres e Carlos E. Rosman, sob o título *Método para Dosagem Racional do Concreto*, editado pela Associação de Cimento Portland indica, em pormenores, como determinar-se racionalmente a composição do concreto.

– conferir, ao concreto recém-misturado, boa trabalhabilidade, boa coesão, baixo calor de hidratação, longo tempo de pega;

– conferir, ao concreto endurecido, permeabilidade.

Entre os aditivos utilizados devem ser mencionados os seguintes:

– "incorporadores de ar", adicionados ao concreto recém-misturado, no sentido de diminuir a tensão superficial da água. Esses incorporadores de ar agem como fluido e substituem uma parte da água, agem como inerte e substituem uma parte da areia fina (1 ou 2 mm) e facilitam o lançamento do concreto. No concreto endurecido, os incorporadores de ar melhoram a sua estanqueidade, a sua durabilidade e o tornam mais resistente à ação de elementos agressivos;

– "retardadores", os quais atuam quimicamente, modificando a solubilidade dos diversos constituintes do cimento e retardando a pega. São aditivos solúveis na água;

– "dispersantes", os quais atuam no sentido de reduzir a quantidade de água por meio de ação físico-química. Mediante o uso de dispersantes adequados, a redução da quantidade de água, além da correta dosagem, bons agregados, areia apropriada etc., pode significar a obtenção de resistência à compressão da ordem de 1.000 kgf/mm^2 e de tração na flexão de 100 kgf/mm^2.

CAPÍTULO XXI

MADEIRAS

1 – Introdução Na sua notável obra *A Próxima Era da Madeira,*[97] Egon Glesinger, técnico de reputação mundial sobre formação e industrialização de florestas, afirma:

"A madeira é universal. Tornou-se matéria-prima que pode satisfazer quase todos os requisitos da existência e não simples produto sucedâneo. Pode produzir alimentos para o homem e para os animais e realmente o faz. Já ocupa o segundo lugar do mundo entre as fontes de tecidos vegetais. No futuro poderá fornecer ao mundo grande parte de seus combustíveis e lubrificantes para motores. Como material de construção ela oferece agora toda uma variedade de madeiras compensadas, plásticos e compostos de madeira que podem satisfazer todas as condições técnicas.

A madeira é abundante. Em comparação com as imensas áreas florestais de 40 milhões de quilômetros quadrados, ou seja, um quarto das terras emersas, as regiões produtoras de carvão, de minérios de ferro e de petróleo, parecem insignificantes. E utilizamos agora apenas uma fração dos recursos florestais do mundo. Florestas tropicais e árticas constituem de fato uma "terra incógnita" de superfície comparável àquela do continente norte-americano. E quanto à capacidade de produção, em superfícies iguais, a floresta pode, anualmente, dar algumas vezes mais fibras do que um campo de algodão e tanto açúcar quanto uma plantação de beterraba.

A madeira é inesgotável. A floresta não é uma mina que um dia se esgotará, mas sim uma área cultivada. A madeira fornecerá para sempre à humanidade o material de que venha a precisar, desde que as árvores sejam tratadas como uma plantação e a floresta manejada apropriadamente".

2 – Constituição da madeira A madeira se origina das árvores e é constituída por um conjunto de tecidos que forma a massa de seus troncos.

O *tronco* é a parte da árvore donde se extrai a madeira. Situado entre as raízes e os ramos, o tronco é composto de células alongadas, de várias naturezas, segundo sua idade e suas funções, reunidas por uma matéria intercelular.

A Figura 78 mostra o corte transversal de um tronco de árvore. Na parte externa, o tronco compreende a *casca*, que se subdivide em casca externa e casca interna. A casca é uma camada protetora que protege e isola os tecidos da árvore contra os agentes atmosféricos. Debaixo da casca, situa-se o *liber*, que é um tecido cheio de canais que conduzem a seiva descendente. Debaixo do liber, encontra-se o *alburno* (ou *câmbio*) que é uma camada viva de formação recente, formada de células em plena atividade de proliferação, igualmente cheia de canais, que conduzem a seiva ascendente ou seiva bruta; sua espessura é mais ou menos grande, segundo as espécies. Sob o alburno, encontra-se o *cerne*, formado por madeira dura e consistente, impregnada de tanino e linhina. O cerne é a parte mais desenvolvida da árvore e a mais importante sob o ponto de vista de material de construção. É formado por uma série de anéis concêntricos de coloração mais clara e mais escura alternadamente; são os anéis ou camadas anuais, que possibilitam conhecer a idade da árvore, sobretudo nos países temperados, onde são mais nítidos. Finalmente, no centro do tronco, encontra-se a *medula*, constituída de material mole.

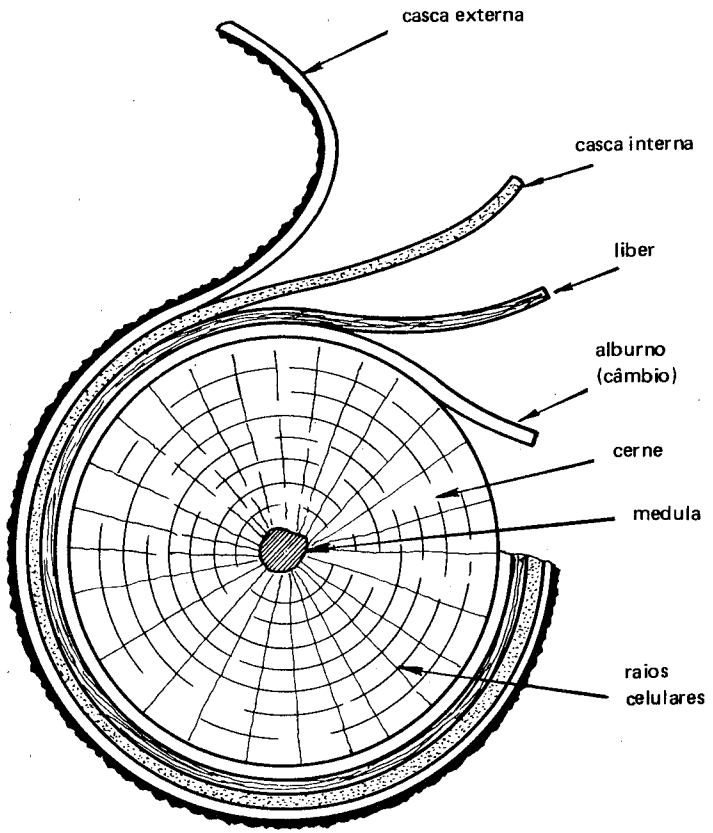


Figura 78 *Corte transversal de um tronco de árvore.*

A madeira é constituída quimicamente por celulose e linhina. Sua composição química é aproximadamente 50% de carbono, 42 a 44% de oxigênio, 5,0 a 6,0% de hidrogênio, 1% de nitrogênio e 1,0% de matéria mineral que se encontra nas cinzas.

Para se apreciar a estrutura da madeira, são realizados no tronco, três tipos de corte: transversal ou perpendicular ao eixo maior do tronco, que permite verificar a natureza do cerne e do alburno; longitudinal ou por um plano que passa pelo eixo, que permite apreciar a fibrosidade da madeira; e tangencial ou segundo uma corda tangencial a qualquer dos anéis de crescimento, que mostra o curso das fibras.

3 – Classificação das madeiras As madeiras, pela sua estrutura anatômica, compreendem dois grandes grupos:

– *coníferas* ou resinosas, da classe botânica das gimnospermas;
– *frondosas*, da classe botânica das angiospermas dicotiledôneas.

Às coníferas pertencem o pinho e o pinheirinho. Às frondosas pertence a maioria das madeiras utilizadas, tais como aroeira-do-sertão, sucupira amarela, *eucaliptus citriodora*, jatobá, cabreúva vermelha, guarantã, pau-marfim, peroba-rosa, caviúna, *eucaliptus robusta*, canela, amendoim, peroba-de-campos, imbuia, pinho brasileiro, freijó, cedro, jequitibá-rosa etc.

4 – Característicos físicos e mecânicos da madeira São característicos físicos a umidade, o peso específico e a retratilidade. São característicos mecânicos as resistências à compressão, à tração, à flexão ao cisalhamento, ao fendilhamento e ao choque.

A *umidade* afeta grandemente a resistência mecânica da madeira, de modo que é importante a sua determinação. As madeiras, logo após o corte, ou seja, ainda "verdes", apresentam 80% ou mais de umidade. Com o tempo,

secam, perdendo inicialmente a água chamada embebição, alcançando o ponto de saturação ao ar: cerca de 25% de umidade. Continuando a secar, as madeiras perdem a água de impregnação, contida nas fibras e paredes dos vasos, resultando contração.

A secagem ao ar, ao abrigo das intempéries, ocasiona perda de umidade até o seu teor alcançar o equilíbrio com o grau higrométrico do ar.

A secagem em estufa, a 105°C, durante determinado tempo, pode ocasionar total evaporação da água de impregnação, chegando a umidade a 0%.

A água de constituição, ou seja, aquela contida nas moléculas da madeira não se altera.

O *peso específico* das madeiras varia de 0,30 a 1,30 g/cm^3, dependendo da espécie da madeira, da árvore de origem, da localização do corpo de prova retirado da madeira em exame etc. As madeiras comerciais brasileiras apresentam pesos específicos que variam de 0,35 a 1,30 g/cm^3.

A *retratilidade* corresponde às contrações lineares e volumétricas e sua determinação é feita em corpos de prova retirados da madeira com vários teores de umidade: madeira verde, madeira seca ao ar e madeira seca em estufa.(91)

Quanto às propriedades mecânicas propriamente ditas, elas dependem do teor de umidade da madeira e, principalmente, do seu peso específico.

As propriedades que interessam, sob o ponto de vista prático são:(98)

- resistência à compressão paralela às fibras
- módulo de elasticidade à compressão
- resistência à flexão estática
- módulo de elasticidade à flexão
- resistência à flexão dinâmica ou ao choque
- resistência à tração normal às fibras
- resistência ao fendilhamento
- dureza
- resistência ao cisalhamento.

As melhores madeiras para construção são as que provêm de árvores de maior altura, com troncos retos e regulares. Devem apresentar boa homogeneidade, boa resistência mecânica e dureza, sem, contudo, serem muito densas e difíceis de trabalhar.

Quando as aplicações são de natureza mecânica, como em certas máquinas, cabos de ferramentas e aplicações semelhantes, as madeiras devem aliar à resistência à compressão boa resistência ao choque, ou seja, tenacidade.

A seguir, indicam-se algumas das principais madeiras encontradas no Brasil, com os respectivos pesos específicos, variáveis dentro dos limites assinalados e aplicações comuns:(99)

– *acapu* ou angelim de folha larga, com peso específico entre 0,85 e 1,00 g/cm^3, ocorrente no Pará e Amazonas, aplicada em móveis, acabamentos internos, assoalhos, compensados, construção naval e civil etc.;

– *almecegueira* ou breu, com densidade entre 0,40 e 0,50, ocorrente no Norte e Centro do Brasil e no litoral de São Paulo até o Rio Grande do Sul, aplicada em móveis, acabamento de interiores, compensados etc.;

– *amendoim* ou amendoim bravo, com densidade entre 0,80 e 0,90, ocorrente em São Paulo, Mato Grosso e norte do Paraná, aplicada em móveis, acabamentos de interiores, assoalhos, cabos de ferramentas etc.;

– *angélica* ou angélica-do-Pará, com densidade de 0,70 a 0,90, ocorrente no Pará e Amazonas, aplicada em móveis, assoalhos, esquadrias, implementos agrícolas, construção naval, estruturas etc.;

– *angico-preto* ou angico preto rajado, de densidade entre 0,75 e 0,95, ocorrente no Vale do Rio Doce, São Paulo e Mato Grosso, aplicada em cabos de ferramentas, assoalhos, dormentes etc.;

– *angico-vermelho* ou angico verdadeiro, com densidade entre 0,70 e 0,80, ocorrente no Vale do Paranapanema, norte do Paraná, até Rio Grande do Sul, aplicada em assoalhos, construções rurais, vigamentos, dormentes etc.;

– *araputangaí* ou mogno, com densidade de 0,40 a 0,50, ocorrente em Mato Grosso, Goiás, Pará, Amazonas e Acre, aplicada em móveis, acabamentos interiores, compensados, construção naval etc.;

– *aroeira-do-sertão* ou aroeira legítima, de densidade entre 0,85 e 1,70, encontrada no Nordeste, Bahia, Minas Gerais, São Paulo, Goiás e Mato Grosso, aplicada em construção naval, pontes, postes, moirões etc.;

– *cabreúva-parda* ou bálsamo, com densidade de 0,90 a 1,10, ocorrente na região costeira e em Santa Catarina, aplicada em móveis, acabamentos de interiores, tábuas e tacos de assoalhos etc.;

– *canela* ou canela-clara, com densidade de 0,60 a 0,75, ocorrente nas serras da Mantiqueira e do Mar, aplicada em móveis, carpintaria, dormentes etc.;

– *caroba* ou jacarandá-caroba, de densidade entre 0,40 a 0,50, ocorrente desde o sul da Bahia até o Rio Grande do Sul, aplicada em caixotes, brinquedos etc.;

– *carvalho brasileiro* ou cedro rajado, com densidade entre 0,65 e 0,75, encontrado no litoral do Estado de São Paulo, aplicada em móveis, acabamentos de interiores, compensados etc.;

– *castanheiro* ou castanheiro-do-Pará, com densidade de 0,65 a 0,75, ocorrente no Pará, Amazonas e Acre, aplicada em móveis, construção civil, construção naval, compensado etc.;

– *copaíba* ou óleo-copaíba, de densidade entre 0,70 e 0,90, encontrada em todo o país, utilizada em móveis, acabamentos de interiores, cabos de ferramentas, coronha de armas, implementos agrícolas etc.;

– *faveiro* ou sucupira-branca, de densidade entre 0,90 a 1,10, ocorrente em Minas Gerais, São Paulo, Goiás e Paraná, empregada em tábuas, tacos, implementos agrícolas, carrocerias, construção naval etc.;

– *freijó* ou frei-jorge, de densidade entre 0,40 e 0,90, encontrada no Pará, aplicada em móveis, construção civil, construção naval etc.;

– *jenipapo* – ou jenipapeiro, com densidade entre 0,70 e 0,85, ocorrente no Pará, Amazonas e Acre, utilizada em tornearia, implementos agrícolas etc.;

– *grumixava* ou salgueiro, com densidade entre 0,60 e 0,80, ocorrente na Serra do Mar, empregada em móveis, tornearia, cabos de ferramentas, compensados etc.;

– *guaraiúva* ou quebra-quebra, com densidade entre 0,80 e 0,90, ocorrente em São Paulo, empregada em tornearia, cabos de ferramentas, construção naval etc.;

– *guarantã* ou pau-duro, com densidade entre 0,95 e 1,10, ocorrente em São Paulo, Mato Grosso e Goiás, empregada em tornearia, tacos, cabos de ferramentas, implementos agrícolas, estacas, postes etc.;

– *imbuia* ou canela imbuia, com densidade entre 0,70 e 0,80, encontrada no Paraná, Santa Catarina, empregada em móveis, acabamentos de interiores, tacos etc.;

– *ipê-pardo* ou piúva do cerrado, com densidade entre 0,90 e 1,20, encontrada em Mato Grosso, Bahia, Minas Gerais, São Paulo e Paraná, empregada em tornearia, tábuas e tacos de assoalhos, implementos agrícolas, construção civil, construção naval etc.;

– *jacarandá-do-litoral* ou jacarandá do brejo, com densidade entre 0,75 e 1,10, ocorrente na região do litoral, entre São Paulo e Santa Catarina, empregada em móveis, tacos de assoalhos, tornearia, cabos de cutelaria etc.;

– *jatobá* ou farinheira, com densidade entre 0,80 e 1,10, ocorrente em todo o país, empregada em implementos agrícolas, tacos, construção civil, construção naval, dormentes etc.;

– *jequitibá-rosa* ou pau-caixão, com densidade entre 0,50 e 0,70, ocorrente na Bahia, Rio de Janeiro, São Paulo, Minas Gerais e Espírito Santo, empregada em móveis, compensados etc.;

– *pau-ferro* ou muirapixuna, com densidade entre 0,90 e 1,20, ocorrente nas catingas do Nordeste, empregada em tornearia, construção civil, dormentes, implementos agrícolas, construção naval etc.;

– *pau-marfim* ou marfim, com densidade entre 0,75 e 0,95, ocorrente no Sul do país, empregada em móveis, implementos agrícolas, tornearia etc.;

– *peroba* ou amargoso, com densidade entre 0,75 e 0,85, ocorrente no Paraná, Mato Grosso, Minas Gerais, São Paulo e Bahia, empregada em móveis, esquadrias, carrocerias, construção civil etc.;

– *peroba-do-campo* ou ipê-peroba, com densidade entre 0,75 e 0,85, encontrada na Bahia, Minas Gerais, São Paulo, Goiás e Mato Grosso, empregada em móveis, tacos, construção naval etc.;

– *pinho brasileiro* ou pinho do Paraná, com densidade entre 0,50 e 0,60, encontrada no Paraná, Santa Catarina, Rio Grande do Sul, Minas Gerais e São Paulo, empregada em móveis, acabamentos de interiores, compensados etc.;

– *sucupira-parda* ou sucupira, com densidade entre 0,90 e 1,10, ocorrente no Pará, Amazonas, Goiás, Mato Grosso e Bahia, empregada em móveis, tornearia, tacos de assoalhos, implementos agrícolas, construção naval etc.;

– *vinhático* ou amarelinho, com densidade entre 0,55 e 0,65, ocorrente no litoral fluminense, Minas Gerais, Bahia e Mato Grosso, empregada em móveis, acabamentos de interiores, compensados, construção naval etc.

5 – Defeitos e enfermidades das madeiras As madeiras estão sujeitas a defeitos ou anomalias que alteram sua estrutura e a enfermidades que afetam sua composição química, reduzem sua resistência e causam o seu "apodrecimento".

As anomalias principais são as seguintes:

– *fibra torcida ou revirada*, defeito esse caracterizado pelo fato das fibras das árvores não crescerem paralelamente ao eixo, mas sim em forma de hélice, devido ao excessivo crescimento das fibras periféricas com relação às internas. Estas madeiras servem somente para postes e pés-direitos;

– *irregularidades nos anéis de crescimento* ou nós, o que, quase sempre, rejeita a madeira;

– *excentricidade do cerne*, causada por crescimento heterogêneo, resultando em pouca elasticidade e baixa resistência;

– *fendas* ou gretas mais ou menos profundas, no sentido transversal; outras fendas de diversos tipos e denominações constituem igualmente anomalias que podem dificultar a utilização plena da madeira.

Quanto às *enfermidades* das madeiras, os principais agentes destruidores são fungos, bactérias, insetos, moluscos e crustáceos marinhos.

Os fungos que atacam a celulose e a linhina são os mais nocivos.

A madeira saturada de água ou com umidade inferior a 20% é mais difícil de ser atacada pelos fungos.

Há moluscos que atacam as madeiras de embarcações, de diques e outras construções navais, incrustando-se na madeira e abrindo galerias verticais. O meio de combatê-los consiste em tratar-se a madeira com creosoto. Depois de atacadas por esses moluscos, as madeiras podem ser tratadas com sulfato de cobre.

6 – **Preservação da madeira** Um dos meios utilizados para preservar as madeiras é por intermédio da *secagem*, natural ou artificial.

Além da secagem, há os *tratamentos superficiais*, os quais são aplicados por pintura ou imersão da madeira ou por impregnação ou por outros métodos.

Os materiais aplicados são chamados "preservativos". Quando se utiliza o processo de pintura, os preservativos são de preferência previamente aquecidos, para penetrar mais profundamente na madeira.

Na imersão, mergulha-se a madeira no preservativo durante 15 a 20 minutos, com melhores resultados que a simples pintura superficial, pois todas as possíveis trincas e fendas ficam em total contato com o material protetor.

Sem entrar em pormenores, os processos de impregnação que podem utilizar, numa mesma operação, vapor, vácuo e pressão, são os mais eficientes de todos, pois, por seu intermédio, as partes internas das madeiras são também atingidas e ficam protegidas da ação dos agentes destruidores.

Os preservativos mais comumente empregados são: o creosoto, já mencionado e o mais importante de todos, o sulfato de cobre, o bicloreto de mercúrio, óleos crus (parafinados, asfálticos) etc.

7 – **Aplicações das madeiras** Além das aplicações normais, principalmente em construção civil, carpintaria, marcenaria, na indústria mecânica e nas indústrias de transporte ou de veículos em geral, sobretudo na forma de acabamentos, uma importante aplicação da madeira é feita em forma de *compensados* ou *contraplacados*.

Nestes produtos, três ou mais lâminas ou folhas de madeira são sobrepostas (sempre número ímpar), de tal modo que a direção das fibras se altere em ângulo reto. Essas lâminas são ligadas por uma cola especial.

Uma lâmina trava o movimento da vizinha, produzindo uma tensão interna que deve ser absorvida pela cola, a qual deve ser capaz de travar o movimento e a contração das lâminas e suportar os esforços a que o material estará sujeito.

A madeira compensada ou contraplacada pode ser obtida em grandes dimensões, apresenta pequena ou nenhuma contração, não está sujeita a efeitos de inchamento, tem grande resistência ao fendilhamento, resiste à flexão nos dois sentidos e proporciona um melhor aproveitamento de sua superfície.

Esse material tem emprego importante em veículos de transporte, como aviões, barcos (contraplacados à prova de água), além de todas as aplicações em arquitetura, construção, móveis, recipientes, caixas, modelos etc.

CAPÍTULO XXII

MATERIAIS PLÁSTICOS

1 – Constituição dos plásticos São conhecidas as expressões científicas "elasticidade" e "plasticidade" e, em conseqüência, "materiais elásticos" e "materiais plásticos".

Tais expressões são geralmente aplicadas em materiais metálicos, de modo que os materiais estudados neste capítulo, conhecidos como "materiais plásticos", não se aplicam as definições usuais adotados para os materiais metálicos.

Os "plásticos" podem ser definidos como "um grupo arbitrário" de materiais artificiais, geralmente de origem orgânica sintética, que em algum estágio de sua fabricação adquiriram a condição plástica durante a qual foram moldados, com aplicação de pressão e calor(100).

De acordo com o Instituto Britânico de Padrões,(100) os plásticos são definidos como "amplo grupo de materiais sólidos, compostos eminentemente orgânicos, usualmente tendo por base resinas sintéticas ou polímeros naturais modificados e que possuem, em geral, apreciável resistência mecânica. Em determinado estágio de sua fabricação, a maioria dos plásticos pode ser fundida, moldada ou polimerizada na forma final. Alguns plásticos são semelhantes à borracha, enquanto algumas formas de borracha quimicamente modificadas são consideradas plásticos".

O carbono é o elemento fundamental de todos os plásticos. Em geral, tem-se combinação de um átomo de carbono com quatro átomos de outro elemento.

Para compreender melhor a natureza dos materiais plásticos, inclusive da definição do Instituto Britânico de Padrões, é necessário estabelecer e definir alguns conceitos fundamentais(101):

– "monômero" é a menor unidade molecular que constitui partícula elementar da matéria;

– "polímero" é a combinação de monômeros, por um processo chamado "polimerização", formando uma cadeia.

Exemplo de um monômero é o gás etileno C_2H_4 e exemplos de polímeros são o polietileno e o polipropileno (Figura 79).(101)

O processo de polimerização que produz os polímeros a partir dos monômeros consiste na aplicação de calor, pressão, utilização de processos químicos e aditivos, de modo a resultar estruturas em forma de cadeia, como as Figuras 79(b) e (c) mostram.

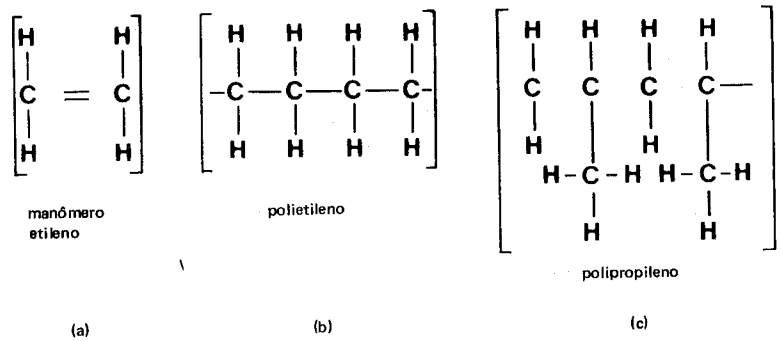


Figura 79 *Um monômero e dois tipos de polímeros que são produzidos a partir dele (b) e (c)*

Os polímeros são, no comércio, freqüentemente chamados de "resinas".

Entre os monômeros podem ser citados o fenol, o formaldeído, a uréia, a melamina, o acetado de vinil, o etileno, o hexametileno, a diamina etc.

A combinação de dois grupos de monômeros diferentes, por polimerização, produz um "copolímero", que é diferente do "polímero".

Considerando o polímero e o copolímero como uma cadeia, tem-se o aspecto da Figura 80.

Figura 80 *Cadeias representativas de copolímeros e polímeros.*

Como resultado da polimerização, quando vários monômeros são juntados, originam-se grandes moléculas.

Chama-se "polímero linear" aquele que apresenta largura de apenas uma unidade; por outro lado, seu comprimento é, freqüentemente, de vários milhares de unidades, como numa cadeia.

Num plástico formado a partir de polímeros lineares, a aderência das cadeias entre si é devida à atração intermolecular, a qual ocorre quando cada cadeia toca ou se cruza com outra.

As forças moleculares que mantêm os elos dos polímeros lineares individuais, são forças primárias, ao passo que as que mantêm cadeias de polímeros juntas, quando elas se tocam ou se cruzam, são chamadas secundárias. Estas forças secundárias – forças coesivas – conferem aos plásticos suas propriedades individuais.

Quando as forças que mantêm juntas as cadeias são fracas, produz-se uma cadeia fraca, flexível e elástica. O polímero resultante é denominado "elastômero". Se, entretanto, as forças de atração – forças coesivas – são fortes e a atração entre as moléculas é maior, o polímero torna-se mais rígido, resiste ao dobramento e à deformação.

Em resumo:

– "fibra" é o polímero que apresenta a ligação mais forte;

– "elastômero" é o polímero com ligações fracas e uma estrutura desordenada que confere elasticidade ao material;

– "plástico" é o polímero com ligações fortes, o qual quando deformado, não readquirirá a forma original.

As dimensões de um polímero variam de um plástico a outro. O seu "peso molecular" pode dar uma indicação geral de suas dimensões; esse peso molecular é o peso total de todos os elementos que formam as imensas e longas moléculas.

Outra indicação do tamanho de um polímero é o "grau de polimerização GP", que corresponde ao número que indica quantas ligações ou unidades repetidas há numa cadeia molecular.

Por exemplo, o cloreto de polivinila com GP equivalente a 97 possui ligações ou unidades repetidas em maior número que o polietileno (GP = 28). Portanto, apresenta maior peso molecular, se o mesmo número de moléculas ou grau de polimerização estiver presente em cada cadeia.

Como a resistência ao escoamento aumenta à medida que o comprimento da cadeia molecular aumenta, um polímero com um GP maior resistirá mais à tendência de tornar-se plástico, pela aplicação de calor, do que um polímero que apresenta ligações mais curtas ou menor quantidade de unidades repetidas.

Além do peso molecular e do grau de polimerização, outro fator que determina o comportamento de um polímero é a chamada "cristalinidade". Este característico corresponde a uma medida da regularidade e perfeição da estrutura molecular e determina, parcialmente, a natureza e o comportamento do plástico. A esse respeito, quanto mais próximos e paralelas as cadeias, mais resistente o material.

A simetria das cadeias varia nos vários polímeros. A Figura 81 representa a variação da simetria em três polímeros diferentes. Na Figura a letra "G" representa vários grupos químicos.

As estruturas que apresentam um elevado grau de simetria são chamadas "isotáticas"; as que apresentam um razoável grau de simetria são chamadas "sindiotáticas"; as que apresentam moléculas ou simetria molecular a esmo são chamadas "atáticas".

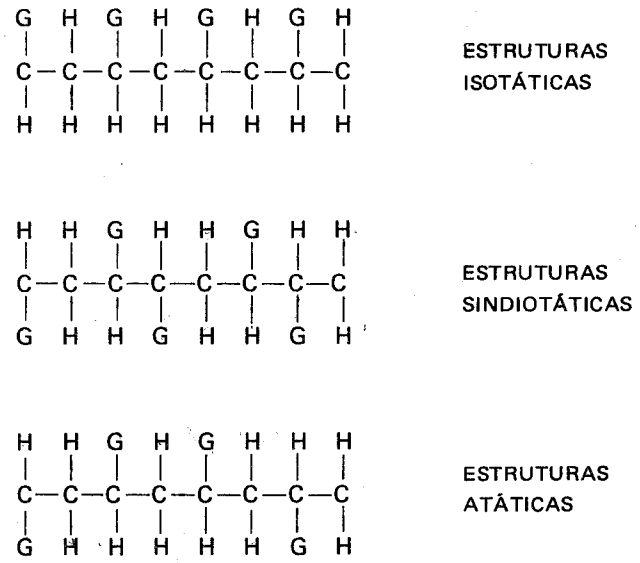


Figura 81 *Representação esquemática de três polímeros diferentes.*

As estruturas de maior simetria molecular (isotáticas) são as que possuem maior cristalinidade. Elas são também as que possuem maior resistência.

Modificando-se a polimerização, pode variar a posição de "G" nas estruturas mencionadas.

Um polímero com elevado grau de simetria tem suas cadeias moleculares ou "cristalitas" compactas e é isotático. Essa estrutura torna o polímero muito estável e lhe confere ponto de fusão mais elevado.

Alguns plásticos podem apresentar vários graus de simetria. Por exemplo, o polipropileno pode ser atático e isotático, de modo que, reduzindo-se a simetria de sua estrutura molecular, pode-se diminuir o seu ponto de fusão.

2 – **Grupos de plásticos** Há dois grupos gerais de plásticos: termofixos ou termoestáveis e termoplásticos.

Os *plásticos termofixos* ou *termoestáveis* possuem polímeros em rede; são polímeros com cadeias laterais. Os polímeros em transversais são formados entre os cordões lineares. Essas ligações transversais, à medida que se formam, causam diminuição da mobilidade dos cordões, provocando solidificação.

Para a moldagem, esses plásticos exigem geralmente calor e pressão. O aquecimento do polímero, que pode se converter em rede, ocasiona uma reação mais rápida das cadeias laterais e acelera a conversão do líquido em sólido (donde o nome termoestável).

Explicando de outro modo: na primeira aplicação de calor, os materiais termoestáveis tornam-se moles e plásticos, mas prosseguindo no processo de aplicação do calor (operação conhecida com o nome de "cura",[98]) eles se transformam quimicamente e endurecem.

Atingido o grau de dureza, assim permanecem e mesmo reaquecidos não se tornam moles. Sob intenso calor, é óbvio, haverá combustão do material.

Entre os materiais termofixos, os mais comuns são os provenientes do fenol e formaldeído e da uréia e formaldeído.

Os *materiais termoplásticos* são os que correspondem a um polímero linear que, ao ser aquecido sob pressão, a sua consistência altera-se de sólida a mole e viscosa. Neste processo não ocorrem reações químicas e os artigos obtidos podem ser reamolecidos. Em outras palavras, os termoplásticos podem amolecer seguidamente sob a ação do calor e endurecer novamente quando resfriados.

Entre os mais importantes termoplásticos, situam-se aqueles à base de nitrocelulose, acetato de celulose, metacrilato de polimetila, poliestireno, cloreto de polivinila (ou PVC), polietileno e náilon.

As propriedades desses plásticos resultam dos característicos de simetria dos polímeros originais.

Assim, um plástico com alta resistência à tração possui simetria elevada ou satisfatória e é isotático ou sindiotático.

Os de menor resistência são de simetria atática e não apresentam polímeros em rede.

A Figura 82[102] mostra como se formam as cadeias, a partir de moléculas monômeros, de modo a resultar polímeros termoplásticos, lineares ou com ramos – (a) e (b) – e polímeros termoestáveis, em rede – (c).

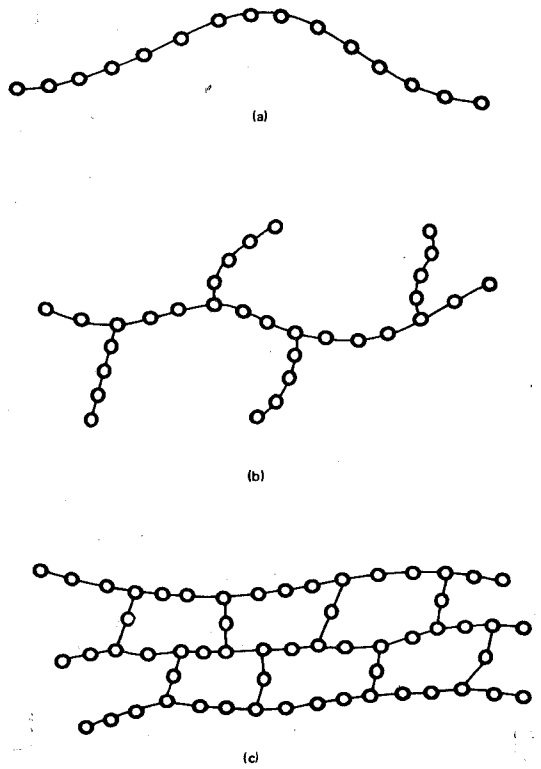


Figura 82 *(a) molécula linear; (b) molécula ramificada; (c) polímero em rede, como em plásticos termoestáveis (ou termofixos).*

3 – **Propriedades dos polímeros** As propriedades que caracterizam principalmente os polímeros são mecânicas, químicas, térmicas, óticas e elétricas.[101]

De um modo geral, essas propriedades devem ser associadas. Em outras palavras, não é suficiente um plástico ser transparente ou apresentar bons característicos de isolante ou resistir bem à ação de corrente elétrica sob determinada voltagem, se sua resistência não for suficiente para suportar os esforços mecânicos ou as modificações estruturais que possam ocorrer pela aplicação, por exemplo, de correntes elétricas além das previstas.

Do mesmo modo, a ação de agentes químicos deve ser considerada, pois moléculas estranhas podem romper as ligações químicas ou as cadeias longas dos polímeros, ficando reduzida a resistência mecânica do material.

Alguns detergentes, por exemplo, podem conter moléculas que enfraquecem, com o tempo, certos tipos de polímeros.

Em resumo, os característicos que devem ser levados em conta nos plásticos são:

- característicos óticos, como cor e transparência;
- térmicos ou resistência ao calor;
- elétricos ou resistência dielétrica;
- mecânicos ou resistência mecânica;
- químicos ou resistência à ação de moléculas estranhas.

Além dessas, duas outras propriedades são particularmente importantes nos materiais plásticos: temperatura de empenamento e temperatura recomendada de serviço.(100)

A primeira corresponde à temperatura na qual uma quantidade arbitrária de deflexão no dobramento ocorrerá sob a ação de uma carga de aproximadamente 18 kgf/cm^2.

Essa temperatura varia de 38 a 260°C.

A segunda é baseada na experiência de fabricantes e usuários e corresponde à temperatura na qual um material plástico pode ser utilizado continuamente, sob carga zero. Essa temperatura varia de 50 a 315°C.

As temperaturas acima devem ser consideradas apenas como guia.

De qualquer modo, acima das mesmas não se recomenda o emprego desses materiais.

4 — Aditivos São substâncias adicionadas aos plásticos com determinados objetivos. Entre eles, devem ser citados os "estabilizadores", os "materiais de enchimento" e os "plastificantes".

Os aditivos previnem, de um modo geral, a degradação dos plásticos por auto-envelhecimento, oxidação, efeito do calor e da luz, fratura por flexão continuada e fratura por ação atmosférica prolongada.(101)

Os "estabilizadores" têm por objetivo, entre outros, prevenir ou reduzir a degradação dos plásticos, quando expostos à ação da luz e do calor. Essa degradação é devida à formação indesejável de moléculas que penetram na estrutura do polímero e rompem as ligações das cadeias.

Entre os estabilizadores, podem ser mencionados:(101) sais de chumbo orgânicos e inorgânicos, derivados orgânicos de metais tais como bário, cálcio, cádmio e zinco e derivados orgânicos do zinco tetravalente.

A adição de um "material de enchimento", outro tipo de aditivo, promove como que a formação de um novo material, apresentando melhores resistência mecânica, resistência ao desgaste e ao choque e maior estabilidade dimensional. Por exemplo, a adição de asbesto numa resina fenólica produz materiais coloridos, quimicamente e mecanicamente resistentes e com apreciável resistência ao desgaste. Outros tipos de materiais e enchimento, além de fibras de asbesto, são fibras de celulose, certas misturas de pó etc.

Os "plastificantes" são aditivos que reduzem a rigidez ou fragilidade dos plásticos. Por exemplo, uma parte de um plastificante adicionada a três partes de cloreto de vinil produz um plástico flexível.

Entre os plastificantes mais usados podem ser mencionados:(101) grupos dos ftalatos (entre os quais as misturas chamadas alfanóis, ou seja, ésteres com 7 ou 9 átomos de carbono), diésteres, poliésteres, epóxis etc.

Em resumo, os aditivos dos plásticos compreendem:

- estabilizadores, que controlam a degradação pela luz e calor;
- materiais de enchimento, que melhoram a resistência do material;
- plastificantes, que reduzem a sua fragilidade e os tornam flexíveis.

5 — Principais tipos de plásticos Como se viu, os materiais plásticos estão compreendidos em dois grandes grupos: os termoplásticos e os termoestáveis ou termofixos. Serão, a seguir, considerados os principais tipos de materiais de cada um desses grupos:

5.1 **Termoplásticos** São os mais empregados. Entre os principais tipos, podem ser enumerados os seguintes:

5.1.1 **Olefínicos** Entre eles, situam-se o polietileno e o polipropileno, obtidos a partir dos polímeros olefínicos etileno e propileno.

São os materiais plásticos mais utilizados no momento.

Os "polietilenos" são de baixo custo, possuem boa tenacidade, resistência dielétrica excelente e boa resistência química. Há muitos tipos de polietilenos, dependendo da densidade, a qual varia de 0,910 a 0,959 g/cm^3.

Os de densidade mais elevada possuem mais resistência mecânica, são mais rígidos, mas relativamente muito frágeis, enquanto os de menor densidade são mais flexíveis.

Seu emprego varia, de acordo com a densidade, desde caixas, garrafas, vasilhas, gaxetas, isolamentos de fios, brinquedos, cabos de escovas até certos componentes mecânicos, como mancais, engrenagens etc.

Os "polipropilenos" são semelhantes aos polietilenos de alta densidade, portanto com propriedades mecânicas na faixa superior daqueles. A resis-

tência à tração se situa na faixa de 3,3 a 3,85 kgf/mm^2 e a máxima temperatura de serviço é da ordem de 121°C.

São fáceis de moldar, possuem muito boa resistência elétrica e absorção de água desprezível. São leves, rígidos e razoavelmente resistentes a muitos agentes químicos.

Empregam-se em aparelhos eletrodomésticos, indústria automobilística (partes internas, painéis etc.), isoladores, bagagens etc.

Na família dos plásticos olefínicos deve-se incluir também os "copolímeros olefínicos" que compreendem os tipos "polialômeros", "inômeros" e "copolímeros etilênicos".(103)

Os "polialômeros" são altamente cristalinos e podem ser produzidos de modo a apresentar de média a elevada resistência ao choque, com razoável resistência à tração. São utilizados em caixas de máquinas de escrever, recipientes de alimentos e aplicações semelhantes.

Os "ionômeros" são plásticos não rígidos, de baixa densidade, transparência e tenacidade. Possuem alta resistência à abrasão. Não podem ser empregados a temperaturas acima de 70°C. Utilizam-se em recipientes para moldagem por injeção, artigos de uso doméstico, cabos de ferramentas, isolamento elétrico, tubulações, caixas de embalagem etc.

Finalmente, os "copolímeros etilênicos" compreendem vários tipos comerciais, entre os quais os mais comuns são o acetato-vinil-etileno (EVA) e o acrilato-etil-etileno (EEA).

O primeiro (EVA) é mais ou menos idêntico aos elastômeros em flexibilidade. Porém possuem baixa resistência ao calor e a solventes. Entre suas aplicações incluem-se buchas, gaxetas, vedações etc.

O EEA é semelhante ao primeiro sob o ponto de vista de densidade, resistência ao calor e a solventes. Porém, é superior em relação à resistência à fissuração sob tensão pelo meio ambiente e possui mais resistência à radiação ultravioleta. É flexível e tenaz, como o EVA.

Empregos típicos: borrachas e canos para água flexíveis, empacotamento de filmes, bandejas de lavadoras de pratos etc.

5.1.2 **Poliestirenos** Após os polietilenos, são os materiais plásticos mais utilizados. São baseados no monômero estireno; de baixo custo e facilmente moldáveis, extrudáveis ou laminàveis.

Sua resistência mecânica é satisfatória, mas sua fluência não. Como não têm resistência ao calor, seu emprego está restrito a aplicações à temperatura ambiente. Também sua resistência ao empenamento pelo calor é baixa.

Algumas adições melhoram as suas propriedades, como o aditivo acrilonitrila, que aumenta a resistência mecânica, a resistência ao choque e eleva de cerca de 8°C a temperatura de empenamento. Além disso, esses poliestirenos aditivados com acrilonitrila apresentam melhor resistência à ação de ácidos, bases, sais e alguns solventes.

As aplicações variam desde ladrilhos de parede, maçanetas, tampas de recipientes, caixas de pequenos aparelhos de rádio até revestimentos de portas de refrigeradores, brinquedos etc.

Esses materiais têm sido igualmente usados na forma de espuma rígida, obtida por insuflamento de gases, como isolante de caminhões frigoríficos.

5.1.3 **Vinílicos** Neste grupo incluem-se o cloreto de polivinila (PVC) e o cloreto de vinilideno. Os polímeros de origem são instáveis e degradam-se rapidamente pela ação da luz e do calor, formando produtos escuros de baixa qualidade. A introdução de estabilizadores no polímero-base diminui essa degradação, originando-se os materiais vinílicos.

Possuem excelente resistência química e por isso são empregados sobretudo em ambientes químicos e em aplicações sujeitas ao intemperismo.

Caracterizam-se ainda por boa resistividade elétrica e resistência à abrasão elevada.

O PVC rígido – constituído de homopolímeros vinílicos não-plastificados – é empregado na forma de chapas em recipientes químicos, dutos, cobertas e peças arquitetônicas. Também, na forma de tubos, em equipamento das indústrias de óleo, química e processamento de alimentos.

O PVC flexível – composto de homopolímeros ou copolímeros com adição de plastificantes – é usado em películas e folhas para embalagens, estofamentos etc.

O cloreto vinilideno é flexível, transparente e possui resistência a agentes químicos e solventes maior que o PVC; sua resistência ao calor vai até cerca de 93°C.

5.1.4 **Acrílicos** De um modo geral, a base dessa família de materiais plásticos é constituída de polímeros de metacrilato de metil, eventualmente modificado com outros monômeros,(103) alguns nomes conhecidos são "lucita" e "plexigás". Sua resistência ao choque é boa e sua resistência às intempéries e claridade ótica são excelentes.

A temperatura de empenamento gira em torno de 90°C.

Além dos tipos transparentes, há tipos opacos, coloridos, assim como o natural branco aquoso.

Pelas características de resistência às intempéries, podem ser utilizados em aplicações externas.

Sua resistência à tração varia de 3,5 a 7,7 kgf/mm^2, valor elevado, considerando-se que se trata de materiais plásticos.

São conformados na forma de chapas, tubos e blocos. Empregam-se em maçanetas, cabos, lentes para sinalização, peças transparentes para aviões, rádios, televisores, componentes estruturais e decorativos de veículos, de máquinas calculadoras etc.

5.1.5 **Celulósicos** O primeiro plástico a ser utilizado, desenvolvido no fim do século passado, foi o celulóide que é um polímero-nitrato; hoje seu emprego é restrito, devido a sua inflamabilidade.

A família dos celulósicos é constituída de polímeros naturais, a partir de celulose refinada de polpa de madeira, de algodão e outros vegetais.

Apresentam alta tenacidade, baixa resistência, transparência e podem ser facilmente coloridos.

A sua conformação é fácil, com a adição de quantidade adequadas de plastificantes.

Os principais tipos de materiais celulósicos são:

– acetato celulósico ou simplesmente acetato, que é o de custo mais baixo, com boa tenacidade e rigidez, desde tipos moles a mais duros. Empregado em brinquedos, armações óticas, coberturas transparentes de máquinas, canetas e algumas pequenas utilidades domésticas;

– buritato-acetato-celulósico – CAB – é mais tenaz e de temperatura de amolecimento mais elevada – 87,5°C – que a do anterior. Aplicações: cabos de ferramentas, proteções de telas de televisores, teclas de máquinas de escrever etc. Na forma de tubos extrudados são utilizados em dutos elétricos e aplicações similares;

– propionato celulósico, semelhante ao anterior em característicos e custo, contudo inferior em resistência às intempéries. Possui melhores propriedades de moldagem e alguns tipos, resistência mecânica e módulo de elasticidade superiores. Na forma de peças moldadas, suas aplicações são, entre outras, produtos caseiros, volantes etc., e na forma de chapas em embalagens e recipientes para alimentos;

– celulose etílica, a mais tenaz da família e de alta resistência ao choque, mesmo a temperaturas inferiores a zero. Muito leve e, entre todos os celulósicos, é o que tem menor absorção de água. Sua resistência à abrasão é baixa. Utilizado em capacetes, roletes, engrenagens, peças de refrigeradores, caixas de lanternas etc.

5.1.6 **Náilon (poliamidas)** Náilon é o nome genérico para poliamidas sintéticas, obtidas a partir da condensação de certas diaminas e ácidos dibásicos. É talvez o material plástico mais conhecido.

Os náilons possuem excelentes propriedades mecânicas, como resistência à tração, à fadiga e ao choque, devido a sua estrutura com grau de cristalinidade relativamente elevado. Apresentam igualmente elevada resistência à abrasão e resistência à ação da maioria dos agentes químicos e solventes, exceto ácidos fortes e alguns solventes.

Contudo, apresentam uma taxa de absorção da umidade relativamente elevada, o que causa alteração dimensional, que pode superar 2% num ambiente com 100% de umidade.

São conformados por moldagem e extrusão. Tem-se sinterizado peças pequenas e médias, a partir de pó de náilon, com adições de óleo, grafita ou dissulfeto de molibdênio para conferir propriedades de mancais.

De início, os náilons eram utilizados como produto têxtil. Contudo, as principais aplicações como material plástico correspondem a componentes mecânicos, de instrumentos, carcaças de máquinas, engrenagens, além das aplicações mencionadas como mancais.

5.1.7 **Acetais** São materiais de estrutura altamente cristalina. Foram desenvolvidos para competir com peças de zinco e alumínio produzidas por fundição sob pressão.

Um dos tipos, chamado DELRIN, é homopolímero. É mais duro, mais rígido e apresenta resistência à flexão e à fadiga mais elevadas, porém baixa ductilidade.

Outro tipo, chamado CELCON, é copolímero e caracteriza-se por ser mais estável a temperaturas elevadas durante longos períodos. Apresenta igualmente melhor resistência à água aquecida.

Alguns tipos especiais são cheios de vidro, de modo que possuem maior tenacidade e resistência ou de tetrafluoretileno que confere característicos notáveis de fricção e resistência ao desgaste.

Podem ser produzidos por moldagem e extrusão e, entre as aplicações típicas, incluem-se diversos componentes mecânicos como mancais, válvulas de engrenagens, peças de veículos etc.

5.1.8 **Policarbonatos** São semelhantes ao náilon. São os mais tenazes de todos os plásticos, portanto de elevada resistência ao choque. São transparentes, mas podem ser facilmente coloridos. Possuem ainda excelente resistividade elétrica. Contudo, são pouco resistentes à ação de solventes e rompem com facilidade quando expostos a certos produtos químicos, embora não sejam afetados por graxas, óleos e ácidos.

São excelentes materiais para vidros de proteção e em equipamentos de segurança. Outras aplicações incluem componentes óticos como lentes, carcaças de máquinas, componentes de instrumentos e ferramentas, hélices marítimas, caixas de condicionadores de ar e outros aparelhos eletrodomésticos.

5.1.9 **ABS ou acrilonitrila-butadieno-estireno** Estes plásticos são opacos, com razoáveis propriedades mecânicas, como elevada resistência ao choque, rigidez e dureza numa ampla faixa de temperaturas – menos 40°C a mais 100°C.(103)

São facilmente conformados, por injeção, extrusão e moldagem. Podem ser estampados ou conformados a frio, a partir de chapas extrudadas, se tiverem sido tratados com resinas especiais.

Entre as aplicações mais usuais, incluem-se tubulações e acessórios, capacetes, bagagens, carcaças de utensílios diversos, dutos para fumaças, componentes de escritório e de veículos, substituindo peças metálicas.

5.1.10 **Fluoroplásticos** São materiais importantes em aplicações de engenharia, devido a suas excelentes qualidades. São, contudo, de custo elevado.

São constituídos de polímeros em que alguns ou todos os átomos de hidrogênio são substituídos por átomos de fluor.(103)

Possuem cristalinidade e peso molecular relativamente elevados.

Seus principais característicos são: cor branca natural, a melhor resistência química e o melhor desempenho a altas temperaturas (temperatura de serviço até cerca de 260°C) entre os plásticos, alta resistência dielétrica e excelentes propriedades de fricção. Embora a resistência ao choque seja satisfatória, sua resistência à fadiga e à fluência são apenas razoáveis. Contudo, as propriedades mecânicas podem ser melhoradas com substâncias de enchimento e de reforço.

Há três tipos principais de fluoroplásticos:(103) "fluorocarbônicos", "clorotrifluoroetilenos" e "fluohidrocarbonos".

Entre os primeiros, o mais usado é o "tetrafluoroetileno" (PTFE ou TFE), pois é o que apresenta a melhor temperatura de serviço (260°C) e a melhor resistência química. É conhecido também como "Teflon": não é fácil de fabricar, de modo que o método usual de obtenção de peças de Teflon é mediante a compactação do material em pó, seguida de sinterização.

O "clorotrifluoroetileno" (CTFE ou CFE) é mais resistente e mais rígido que os fluorocarbônicos e possui melhor resistência à fluência.

Os "fluorohidrocarbonos" são semelhantes aos anteriores, porém apresentam menor resistência ao calor e melhores resistências à tração e à compressão.

Todos eles, exceto o tetrafluoroetileno, podem ser conformados por moldagem, extrusão e outros métodos convencionais.

Entre as aplicações desses materiais, contam-se as seguintes: buchas autolubrificantes, componentes mecânicos, peças e tubos resistentes ao ataque químico, componentes eletrônicos para serviços a alta temperatura, vedações, revestimentos de tanques etc.

5.1.11 **Óxidos polifenilenos** São materiais relativamente novos, de alta resistência e larga faixa de temperatura de utilização,(103) os dois principais tipos são: "óxido fenileno" e "óxido fenileno modificado". Possuem baixo coeficiente de dilatação térmica e boa resistividade elétrica.

Aplicam-se em instrumentação médica, componentes de máquinas de lavar pratos e, pelos característicos elétricos, nos campos da eletricidade e da eletrônica.

5.1.12 **Superpolímeros** Igualmente de desenvolvimento recente, caracterizam-se por manter as propriedades mecânicas e a resistência química acima de 200°C, por largo período de tempo. São de preço elevado e difíceis de processar, exigindo maiores temperaturas e pressões.

Incluem os tipos "polimido", "polisulfone", "sulfeto de polifenileno", "poliarisulfone" e "poliéster aromático".

Sua aplicação é limitada em serviços especiais, como nas atividades nucleares e aeroespaciais.

5.2 **Plásticos termoestáveis (ou termofixos)** Nestes plásticos, as cadeias dos polímeros são unidas entre si por fortes ligações covalentes, ao contrário dos termoplásticos, o que lhes confere característicos diferentes, como maior dureza e relativa fragilidade.(103) Apresentam também maior estabilidade térmica e maior resistência à fluência.

Por outro lado, podem ser utilizados na forma moldada, para o que é necessário introduzir-se nas resinas substâncias de enchimento e de reforço. Exigem igualmente ciclos de moldagem mais longos.

Uma vez moldadas as peças ou conformadas pelo calor e polimerizadas, permanecem estáveis e tornam-se infusíveis, ou seja, não amolecem pelo aquecimento e não são solúveis quimicamente.

A matéria-prima desses plásticos é composta de resinas e de substâncias de enchimento e de reforço.

A resina consiste em um polímero, agentes de cura, endurecedores, inibidores e plastificantes.

As substâncias de enchimento consistem em um ou mais dos seguintes componentes: partículas minerais ou orgânicas, fibras, substâncias têxteis ou papel orgânico ou inorgânico retalhado.

Após misturados os componentes, na forma geralmente de grânulos ou pelotas, o processamento consiste em:

– pré-conformação, pela compressão à temperatura ambiente, numa forma que corresponde à da cavidade do molde;

– pré-aquecimento, em que a peça pré-conformada é aquecida de modo a permitir que o material flua no interior do molde;

– moldagem, em que ocorre a conformação e a polimerização ou cura sob pressão e calor.

Os principais tipos de plásticos termoestáveis são os seguintes:

5.2.1 **Fenólicos** Conhecidos também como "fenol-formaldeídos", possuem excelente resistência ao calor e estabilidade dimensional e são de custo relativamente baixo para moldar e conformar.

Existem muitos plásticos fenólicos, desde os de mais baixo custo, constituídos de componentes de baixo custo com substâncias de enchimento tais como farinha ou felpa de madeira, para emprego sem grande responsabilidade, até os tipos de custo mais elevado, com maior resistência ao choque, para emprego em componentes estruturais ou elétricos, enchidos com papel, fibras de vidro etc., aos tipos enchidos com minerais, de maior resistividade elétrica, aos tipos resistentes ao calor, enchidos de vidro ou de componentes minerais e que conservam suas propriedades mecânicas na faixa de temperaturas de 190° a 260°C, aos tipos com excelente resistência à ação da água e de substâncias químicas, para emprego em ambientes químicos e em condições de choque.

Desse modo, o campo de aplicações dos fenólicos é muito amplo: agitadores de máquinas de lavar, rodas, blocos de fusíveis, componentes de ignição e de aparelhos elétricos, carcaças de rádios e televisores, carcaças de motores etc.

5.2.2 **Poliésteres** É um material rapidamente "curado" pelo calor. A denominação "poliéster" é empregada para descrever uma categoria de plásticos obtidos por meio de uma reação de condensação entre poliálcool e um ácido policarboxílico. Um dos tipos, em forma de fibra sintética, é conhecido pelo nome de "Terylene".

Como a maioria dos plásticos termoestáveis, sua resistência à ação de solventes, à ação do tempo, à ação do calor e de esforços mecânicos é excelente.

Entre as aplicações mais importantes dos poliésteres, podem ser mencionadas as seguintes:[101][102] reforçados com vidro, em automóveis esportivos e em barcos; em tanques de armazenamento de óleo, água e certos produtos químicos; em tubos reforçados; em móveis, malas e objetos decorativos; assentos, cabos de objetos de cutelaria; em chassis de máquinas domésticas; caixas de máquinas de escrever ou aparelhos de escritório; em armários de escritório; na forma de fibras, em correias transportadoras, correias em V, mangueira, pneus e tecidos revestidos para roupa de proteção; em encerados; em filmes para isolamento elétrico; em componentes elétricos e mecânicos, como engrenagens, buchas, mancais, conectores, caixas de chaves elétricas etc.

5.2.3 **Alquidos** São compostos de uma resina poliéster e, geralmente, um monômero-dialil-ftalato, adicionados de várias substâncias de enchimento de natureza orgânica.[103]

Possuem excelente resistência até aproximadamente 150°C, elevada rigidez e razoável resistência à tração (até 6,3 kgf/mm^2, reforçado com vidro) e ao choque.

Caracterizam-se ainda por baixa absorção de umidade e boa resistência dielétrica, de modo que são aconselháveis para utensílios elétricos e eletrônicos, tais como chaves elétricas, isoladores, componentes para controle de motores e sistemas de ignição.

5.2.4 **Alílicos** Possuem valores excepcionalmente elevados de isolação e resistência dielétrica, além de baixa absorção de umidade, de modo que são aconselháveis para utensílios elétricos e eletrônicos. De custo elevado, os principais tipos são: ftalato de dialil (DAP), isoftalato de dialil (DAIP) e carbonato de alil diclicol.

O DAIP possui a máxima temperatura de serviço em torno de 230°C.

O carbonato de alil diclicol apresenta elevada transparência e alta estabilidade de propriedades óticas sob carga e calor e em muitos ambientes químicos.

5.2.5 **Epóxis** São mais conhecidos como adesivos,[103] de custo elevado e, portanto, aconselháveis em aplicações onde se desejam qualidades superiores, como elétricas e mecânicas, baixa absorção de umidade, além de facilidade de processamento. A máxima temperatura de serviço é cerca de 270°C.

Se reforçados com fibras de vidro, atingem a máxima resistência possível em materiais plásticos de 110 a 175 kgf/mm^2.

Aplicações usuais incluem: componentes estruturais de aviões, moldes elétricos, componentes eletrônicos etc.

5.2.6 **Aminos** Incluem os grupos melaminos e uréias.(103) De baixo custo, caracterizam-se por boa resistência química e possibilidade de serem coloridos com qualquer tonalidade.

Os produtos moldados de amino são duros, rígidos e resistentes à abrasão. São utilizados nos campos elétrico e mecânico.

As uréias são empregadas em utensílios domésticos, assentos de lavabos, utensílios de fiação, peças para fins elétricos exigindo elevada resistência à formação de arco, placas de chaves elétricas de baixo custo etc.

5.2.7 **Silicones** Esses materiais não são hidrocarbonetos, porque os polímeros são constituídos de monômeros em que átomos de oxigênio estão ligados a átomos de silício.

Sua estrutura é semelhante à do quartzo, de modo que as peças moldadas caracterizam-se por estabilidade térmica excepcional: a máxima temperatura para serviço contínuo é de aproximadamente 260°C para os tipos comuns e de 370° a 480°C para tipos especiais.

Outros característicos são:(103) resistência dielétrica elevada, absorção de umidade baixa, resistência ao ataque por ácidos e produtos de petróleo, boa e razoável resistência à tração e ao choque. Essas duas últimas propriedades podem ser muito melhoradas pela adição de substâncias de enchimento e de reforço.

Como são de custo elevado, suas aplicações são feitas para condições críticas de serviço, tais como: componentes de aviões para alta temperatura de serviço, na indústria aeroespacial e na indústria eletrônica.

5.2.8 **Uretanos** São materiais de uso limitado e mais conhecidos como "espuma plástica"; são empregados como material de isolamento e empacotamento.

A Tabela 65 apresenta as propriedades comparativas dos vários tipos de materiais plásticos descritos.

6 — Ligas plásticas Os materiais plásticos, do mesmo modo que os metais, podem ser ligados, resultando igualmente produtos de melhores qualidades.

Os tipos mais comuns combinam o cloreto de polivinil (PVC), o ABS e os policarbonatos, que se ligam entre si ou com outros tipos de polímeros.

O ABS pode ser igualmente ligado com poliuretanos, produzindo-se materiais de excelente tenacidade e resistência à abrasão. Aplicações típicas são: polias, engrenagens, vedações, conjuntos de pára-choques etc.

Outra liga resulta da combinação de ABS com PVC, a qual pode ser obtida na forma de chapa, passível de estampagem.

TABELA 65

PROPRIEDADES COMPARATIVAS DE MATERIAIS PLÁSTICOS

Propriedade	Baixa		Média		Alta	
	Termo-plásticos	Termo-estáveis	Termo-plásticos	Termo-estáveis	Termo-plásticos	Termo-estáveis
Densidade	Olefínicos ABS	Uretanos Poliéster	Náilon Óxidos polifenilenos Estirenos Carbonatos Acrílicos Celulósicos Sulfonas	Alílicos Aminos Silicones Epóxis	Fluoro-plásticos Vinílicos Acetais Polimídios	Alquidos Fenólicos
Resistência à tração	Olefínicos Fluoro-plásticos	Silicones Uretanos	Estirenos ABS Celulósicos Vinílicos	Fenólicos Aminos Alquidos	Náilons Polimidos Carbonatos Acrílicos Acetais Óxidos polifenilenos	Epóxis Poliésteres
Rigidez (módulo de elasticidade)	Olefínicos Fluoro-plásticos	Uretanos	Carbonatos Celulósicos Vinílicos ABS Óxidos polifenilenos Sulfonas	Poliésteres Aminos Alílicos Alquidos	Acrílicos Estirenos Acetais Polimidos Náilons	Fenólicos Silicones Epóxis

TABELA 65 (*continuação*)

PROPRIEDADES COMPARATIVAS DE MATERIAIS PLÁSTICOS

Propriedade	Baixa		Média		Alta	
	Termoplásticos	Termoestáveis	Termoplásticos	Termoestáveis	Termoplásticos	Termoestáveis
Resistência ao choque	Estirenos Sulfonas Acrílicos Óxidos polifenileno	Aminos	Celulósicos Polipropilenos ABS Estirenos Acetais Náilons	Alquidos Epóxis Silicones Poliésteres	Carbonatos Vinil (PVC) Polietilenos	Fenólicos
Resistividade elétrica	Acetais Celulósicos Náilons Vinílicos Acrílicos	Fenólicos Poliésteres	Óxidos polifenilenos Sulfonas Carbonatos ABS	Silicones Aminos Alquidos	Estirenos Fluoroplásticos Olefínicos	Epóxis Alílicos
Resistência dielétrica	ABS Carbonatos		Estirenos Fluoroplásticos Celulósicos Óxidos polifenilenos Acrílicos Náilons Acetais Polietilenos	Alílicos Fenólicos Silicones Aminos Alquidos	Vinílicos Propilenos	Uretanos Poliésteres Epóxis
Emprego a altas temperaturas	Celulósicos Vinílicos Estirenos Polietilenos Acetais ABS Acrílicos		Náilons Carbonatos Propilenos	Poliésteres Alquidos	Polimidos Fluoroplásticos Óxidos polifenilenos Sulfonas	Silicones Alílicos Aminos Epóxis

Existem cerca de meia dúzia de ligas plásticas disponíveis no mercado.[103]

7 – **Processos de fabricação de peças em material plástico** A matéria-prima para a fabricação de plásticos corresponde a polímeros, na forma líquida, pulverizada ou pelotizada.

Um dos processos mais utilizados na fabricação de peças é o da moldagem por injeção (Figura 83),[101] em que um êmbolo ou pistão, movimentando-se rapidamente para a frente e para trás, empurra o plástico aquecido e amolecido através de um espaço entre as paredes do cilindro e um "torpedo" aquecido, localizado no centro do cilindro. Sob pressão, o polímero torna-se suficientemente fluido para escorrer no interior do molde. A temperatura da câmara de injeção pode atingir 250°C e a pressão 2.100 kgf/cm^2.

Em tempo relativamente curto, a peça moldada solidifica e esfria o suficiente para ser retirada.

Esse processo possibilita a produção de uma peça cada 10 a 30 segundos, embora peças maiores possam exigir tempo mais longo.

Outro processo, um dos mais antigos e utilizados, é o de compressão. Neste processo, um volume predeterminado de pó do plástico é colocado na cavidade do molde, constituído de duas metades – macho e fêmea ambas aquecíveis e resfriáveis.

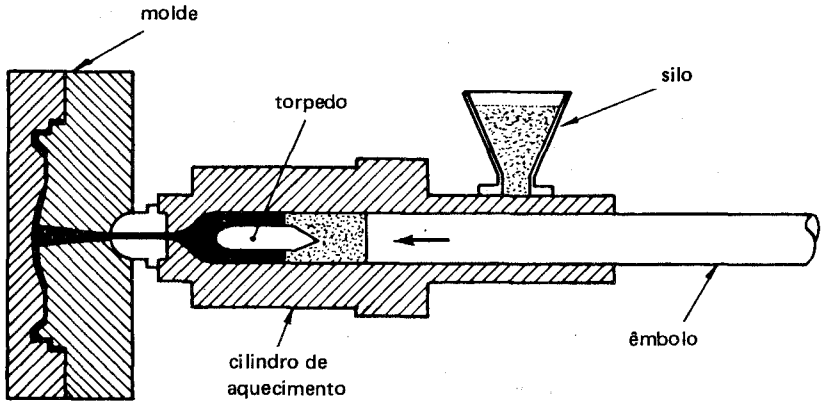


Figura 83 *Moldagem por injeção de plásticos.*

Fechado o molde, aplica-se a pressão através da parte "macho"; a pressão pode variar entre 100 e 500 kgf/cm^2. A operação é conduzida em prensas especiais.

A aplicação simultânea de calor e pressão amolece o pó que flui dentro da cavidade fêmea do molde, conformando-o de acordo com a forma desta.

Um exemplo de molde de compressão empregado no processo está representado na Figura 84.(101)

Um terceiro processo corresponde ao de extrusão, de certo modo semelhante ao de injeção. Um silo contém o material em grânulos ou pó. A câmara de moldagem é aquecida e o polímero amolecido pelo calor começa a escoar, mediante o emprego de um parafuso rotativo contínuo, sendo assim dirigido ao molde de extrusão.

Deste, ele sai ainda no estado pastoso, como uma pasta de dentes, e como o bocal da matriz de extrusão tem a mesma forma do produto desejado, a produção é contínua e as peças são cortadas no comprimento desejado.

O processo permite produzir peças de grande comprimento.

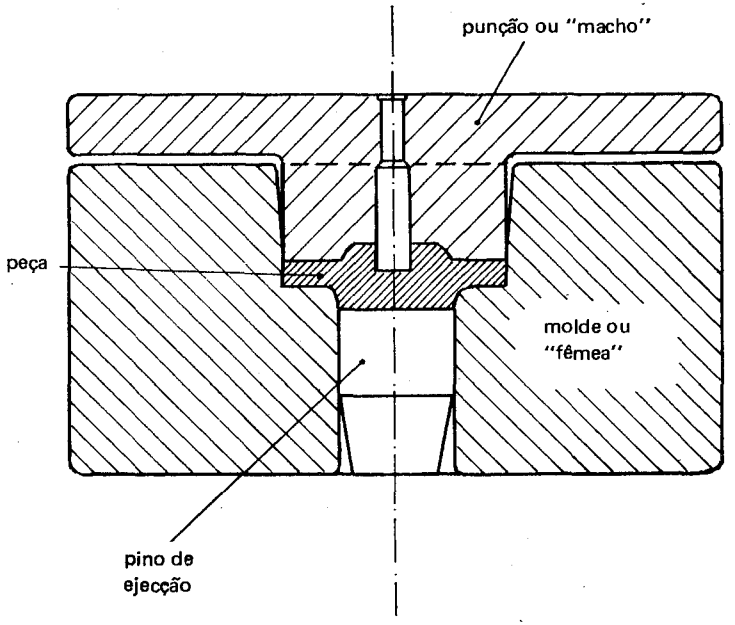


Figura 84 *Tipo de molde para moldagem de plástico por compressão.*

Outros processos incluem: moldagem rotativa, que permite produzir peças grandes e de forma complexa; moldagem por insuflação, para produzir peças ocas, como garrafas e recipientes; processos de revestimento de metal por plástico; processos de calandragem, semelhante à laminação, para produzir plásticos em chapas e folhas; processos de fusão, em que o material liquefeito é colocado no interior do molde onde solidifica; processos de conformação a partir de chapas de resina, amolecidas por aquecimento e forçadas de encontro a um molde fixo: a folha adquire a forma dos contornos do molde. Por esse processo, obtêm-se revestimentos para refrigeradores, armários e grandes seções de peças produzidas por estampagem profunda.

CAPÍTULO XXIII

MATERIAIS CERÂMICOS

1 – Introdução Os cerâmicos constituem um grupo muito extenso de materiais para fins de construção e industriais.

No decorrer desta obra, vários materiais cerâmicos já foram abordados e citados, entre os quais o cimento, abrasivos e ferritas.

De um modo geral, os principais característicos dos materiais cerâmicos são os seguintes:(104)

– são de natureza cristalina; contudo, como o número de elétrons livres é pequeno, sua condutibilidade elétrica é nula ou muito pequena;

– seu ponto de fusão é elevado, o que os torna refratários, ou seja, apresentam estabilidade a temperaturas elevadas;

– possuem grande resistência ao ataque químico;

– são muito duros, os mais duros entre os materiais industriais; são igualmente frágeis.

Os componentes dos materiais cerâmicos são elementos metálicos, como alumínio, silício, magnésio, berílio, titânio e boro e não-metálicos como oxigênio, carbono e nitrogênio.

Por outro lado, os cerâmicos podem ser constituídos de uma única fase; exemplos: alumina (Al_2O_3) e magnésia (MgO) ou são de fase múltipla, em que há mais de um componente.

Alguns outros componentes cerâmicos são boretos, nitretos, carbonetos e silicietos.

As técnicas de produção de materiais cerâmicos assemelham-se muito à técnica da metalurgia do pó.(*)

As principais etapas de fabricação são as seguintes:

a) preparação dos ingredientes para conformação. Esses ingredientes estão geralmente na forma de partículas ou pó. A mistura é feita seca ou úmida;

b) conformação, a qual pode ser feita no estado líquido, semilíquido ou úmido ou sólido, nas condições fria ou quente.

No caso líquido, prepara-se uma espécie de lama que é vasada em moldes porosos (de gesso geralmente), os quais absorvem o líquido, deixando uma camada de material sólido na superfície do molde. Como ocorre contração, mais lama é adicionada, até obter-se a forma desejada.

Por esse método, pode-se produzir peças circulares, mediante a rotação dos moldes, como na fundição por centrifugação.

Nos casos semilíquido ou sólido, utiliza-se conformação por pressão.

A conformação sólida (com teor de umidade até 5%) é empregada para a fabricação de isoladores elétricos, certos tipos de refratários e peças cerâmicas para a indústria eletrônica. A pressão utilizada é elevada e os moldes são metálicos.

Na conformação semilíquida ou úmida, com teores de água que podem chegar a 20%, as pressões são mais baixas e os moldes de menor custo.

Emprega-se ainda o processo de compressão isostática, para a produção de óxidos cerâmicos de alta qualidade, em peças como isoladores de velas de ignição.

Outro processo, relativamente recente, é a compressão a quente, que permite obter peças de alta densidade e de melhores propriedades mecânicas.

A conformação pode ser ainda feita por extrusão, processo que possibilita a fabricação de produtos cerâmicos de argila, como tijolos e telhas.

c) secagem e cozimento, para remoção de água e obtenção da resistência final necessária.

A secagem deve ser muito cuidadosa, porque excessiva secagem pode resultar em rápida contração que leva a empenamento e mesmo fissuração.

(*) Durante um certo tempo, a metalurgia do pó foi designada como "cerâmica dos metais".

As peças de cerâmica de baixo custo e menor responsabilidade são geralmente deixadas secar em ambiente normal, protegido contra as intempéries.

Esse problema de secagem não existe no caso de peças de qualidade, pois as mesmas são geralmente produzidas a partir de pós secos.

O cozimento ou sinterização é levado a efeito a temperaturas que variam de acordo com a composição do material e das propriedades finais desejadas.

A temperatura máxima do processo é chamada "temperatura de amadurecimento".

Para louças brancas, essa temperatura varia de 925° a 1.425°C, obtendo-se, no estágio final, uma vitrificação, com preenchimento dos poros por intermédio de uma fase vítrea que se forma, a qual, no resfriamento posterior, solidifica, originando-se uma matriz vidrosa que liga entre si as partículas inertes e não fundidas.

As peças refratárias e eletrônicas são cozidas a temperaturas que podem ultrapassar 1.650°C, para obter-se a vitrificação e as ligações finais necessárias.

As ligações obtidas em refratários de alta qualidade é de natureza cristalina, em vez de vidrosa.

2 – **Propriedades** Os materiais cerâmicos, como já foi mencionado, são frágeis e sua resistência à tração é baixa, raramente ultrapassando 17 kgf/mm^2. Sua resistência à compressão é, contudo, muito mais elevada, cinco a dez vezes maior que a resistência à tração.

Devido a sua fragilidade, não apresentam ductilidade e, por isso mesmo, sua resistência ao choque é baixa.

São extremamente rígidos. Seu módulo de elasticidade pode atingir valores da ordem de 45.500 kgf/mm^2, em comparação com cerca de 20.000 kgf/mm^2 para o aço.

Como são muito duros, são muito úteis para peças resistentes ao desgaste, para abrasivos e ferramentas de corte.

Seu ponto de fusão é muito elevado: a alumina, por exemplo, funde a temperaturas acima de 1.900°C.

A condutibilidade térmica varia muito entre os vários grupos, dependendo da composição, estrutura cristalina e textura. As estruturas cristalinas simples apresentam geralmente maior condutibilidade térmica.

A dilatação térmica varia igualmente conforme os tipos, mas é baixa quando comparada com metais e materiais plásticos.

Todos os materiais cerâmicos possuem excelente resistência à ação de agentes químicos. Assim são relativamente inertes a todas as substâncias químicas, exceto ácido hidrofluorídrico e algumas soluções cáusticas quentes. Não são afetados por solventes orgânicos.

Não são condutores de eletricidade.

A densidade é comparável à dos grupos de metais leves, variando de 2 a 3 g/cm^3.

3 – **Tipos de materiais cerâmicos** O número de materiais cerâmicos utilizados na indústria é muito grande, sobretudo como refratários e em aplicações de resistência ao desgaste, aplicações nas indústrias química e elétrica.

Recentemente, vários tipos mais sofisticados foram desenvolvidos para empregos em condições de temperaturas muito elevadas, como em turbinas a gás, motores a jato, reatores nucleares e aplicações semelhantes.

A maior diferença entre os tipos comuns de materiais cerâmicos e os tipos mais sofisticados consiste no fato que estes últimos não possuem uma matriz vidrosa. Neles, durante o processo de sinterização, as partículas finas de material cerâmico são ligadas por reações superficiais sólidas, que originam uma ligação cristalina entre as partículas individuais.

A seguir serão, resumidamente, enumerados, os principais tipos de materiais cerâmicos.

3.1 **Faiança e porcelana** São obtidas a partir de misturas de argila, quartzo, feldspato, caolin e outros materiais.

São produtos altamente vitrificados, a porcelana apresentando maior vitrificação que a faiança e é de cor branca.

São empregadas nas indústrias química e elétrica. Neste último caso, compreendem os tipos de baixa voltagem e de alta voltagem, estes últimos para voltagens acima de 500 volts e que resistem a condições climáticas muito severas.

Devido a sua resistência química, são muito empregadas nas indústrias químicas e de processamento, em tanques, condensadores, tubulações, bobinas de resfriamento, filtros, misturadores, bombas, câmaras de reatores etc.

3.2 **Refratários comuns** São obtidos a partir de argilas e os tipos mais comuns são alumina-sílica (óxido de alumínio e dióxido de silício). As composições variam desde quase sílica pura até quase alumina pura. Podem conter algumas impurezas como óxidos de ferro e magnésio e pequenas quantidades de óxidos metálicos alcalinos.

Outros refratários comerciais são: sílica, forsterita, magnesita, dolomita, carboneto de silício e zircônio.

3.3 **Óxidos** São do tipo simples, ou seja, que contêm apenas um único elemento metálico ou do tipo misto ou complexo, que contém dois ou mais elementos metálicos.

As Tabelas 66 e 67 indicam as propriedades desses materiais. Os valores apresentados são apenas típicos, pois cada um dos materiais pode ser obtido em condições diferentes de composição, porosidade e microestrutura.

O mais importante, porque o mais utilizado, é o óxido de alumínio – alumina. Custo relativamente baixo e propriedades mecânicas idênticas ou melhores do que o da maioria dos outros óxidos.

Possui ainda excelente resistividade elétrica e dielétrica e é resistente à ação de muitas substâncias químicas, do ar, vapor de água e atmosferas sulfurosas.

É empregado como isoladores elétricos, em aplicações químicas e aeroespaciais e em componentes resistentes à abrasão como guias de máquinas têxteis, varetas de êmbolos de bombas, revestimentos de calhas, furos de descargas, matrizes e mancais.

O óxido de berílio – berília – apresenta condutibilidade térmica elevada, além de alta resistência e boas propriedades dielétricas. É de custo elevado e difícil de trabalhar. Além disso, no seu manuseio são necessárias certas precauções, porque suas partículas de poeira são tóxicas. É utilizado devido a sua rigidez, resistência e estabilidade dimensional em giroscópios; em transistores, resistores e aplicações similares, devido a sua elevada condutibilidade térmica.

O óxido de magnésio – magnésia – tem aplicações limitadas, por não ser suficientemente resistente e por ser suscetível a choque térmico, devido a sua elevada dilatação térmica.

O óxido de zircônio – zircônia – apresenta-se em vários tipos: óxido puro monoclínico, forma estabilizada cúbica e outros.

A zircônia estabilizada possui alta temperatura de fusão (cerca de 2.760°C), baixa condutibilidade térmica e resiste bem à ação de atmosferas oxidantes e redutoras e de muitos agentes químicos. Algumas formas de zircônia estabilizada são utilizadas em recipientes e equipamentos em contato com metais líquidos.

A zircônia monoclínica, do tipo nuclear, é empregada em elementos combustíveis nucleares, componentes de reatores e aplicações similares.

O óxido de tório – tória – é o óxido cerâmico quimicamente mais estável e possui o mais elevado ponto de fusão dentre os óxidos cerâmicos – 3.315°C. Algumas aplicações são feitas em reatores nucleares.

Os óxidos mistos são constituídos de várias combinações de magnésia, alumina e sílica.

TABELA 66

PROPRIEDADES TÍPICAS DE ÓXIDOS CERÂMICOS

Propriedade	Alumina	Berila	Magnésia	Zircônia	Tória
Ponto de fusão °C	2037,7	2549	2799	2615	3315
Módulo de elasticidade sob tração, kgf/mm^2	45.500	24.500	28.000	21.000	14.000
Resistência à tração, kgf/mm^2	26,6	9,8	14	14,7	5,25
Resistência à compressão, kgf/mm^2	224	210	84	210	140
Microdureza Knoop	3.000	1.300	700	1.100	700
Máxima temperatura de serviço (em atmosfera oxidante), °C	1949	2399	2399	2499	2699

TABELA 67

PROPRIEDADES TÍPICAS DE ALGUNS ÓXIDOS CERÂMICOS MIXTOS

Propriedade	Cordierita	Forsterita	Steatita	Zircônio
Ponto de fusão, °C	1471	1910	1549	1549
Módulo de elasticidade, sob tração, kgf/mm²	4.900	—	10.150	14.700
Resistência à tração, kgf/mm²	2,8 a 5,6	6,3	3,5 a 7,0	3,5 a 7,7
Resistência à compressão, kgf/mm²	35 a 66,5	56 a 59,5	45,5 a 63	42 a 70
Dureza Mohs	7	7,5	7,5	8
Temperatura máxima de serviço, °C	999	999	999	1093

3.4 **Outros tipos de materiais cerâmicos** Entre eles, devem ser citados os "carbonetos", alguns dos quais já estudados, como o carboneto de tungstênio. O mais conhecido é o carboneto de silício, conhecido também com o nome de carborundum. Este carboneto caracteriza-se por condutibilidade térmica elevada, baixa dilatação térmica e baixo choque térmico. É um dos melhores materiais, sob o ponto de vista de resistência ao desgaste e à abrasão.

Boretos de háfnio, de tântalo, de tório, de titânio e de zircônio constituem outro grupo de materiais cerâmicos, caracterizados por alta dureza, elevada relação resistência/rigidez e boa retenção da resistência a elevadas temperaturas. Suas aplicações limitam-se, entretanto, a bocais de foguetes.

Finalmente, devem ser mencionados os nitretos de boros e de silício, sendo que o primeiro é mais conhecido como material do diamante sintético — borozon, com dureza equivalente à dos diamantes e com resistência ao calor até cerca de 1.926°C, sem apreciável oxidação.

4 — Vidro O vidro origina-se da fusão de sílica — SiO_2 — cristalina. Essa fusão forma um líquido viscoso cuja ligação não apresenta as características muito regulares dos sólidos cristalinos. Em resumo, ao contrário de outros materiais cerâmicos, o vidro é uma substância não-cristalina.

Para sua fabricação, parte-se de uma mistura de sílica e outros óxidos, a qual é fundida e resfriada de modo a resultar uma condição rígida.

De qualquer modo, a estrutura do vidro é tridimensional e os átomos ocupam posições definidas.

A produção de produtos de vidro compreende quatro etapas:

- fusão e refino
- conformação
- tratamento térmico
- acabamento

Além dos materiais básicos, emprega-se também sucata de vidro ou material rejeitado. Os fornos de fusão são de natureza contínua e a temperatura de fusão situa-se em torno de 1.500°C.

O vidro fundido é retirado continuamente do forno e levado à área de trabalho, onde é conformado a temperaturas em torno de 1.000°C.

Os métodos de conformação incluem:

— sopragem ou insuflação, para a fabricação de peças ôcas, como garrafas. Ar é utilizado como elemento de insuflação;

— compressão, que é o método de mais baixo custo. Utiliza-se uma prensa rotativa, dotada de moldes onde o vidro pastoso é colocado e sub-

metido a pressão para obter-se a forma desejada. Por esse processo, fabricam-se produtos de mesa e fogão, isoladores, lentes e refletores;

– estiramento, para a fabricação de peças tubulares ou barras de vidro. No primeiro caso, força-se o vidro líquido a passar em torno de um mandril cônico de metal ou material cerâmico e sopra-se ar através do centro do mandril. Por estiramento ou laminação, produz-se chapas de vidro;

– fundição, restrita a formas simples e de grandes dimensões. É o método mais difícil de conformação do vidro.

O tratamento térmico consiste em duas operações: recozimento e têmpera.

O recozimento tem por objetivo eliminar as tensões que se desenvolvem no resfriamento do vidro, após a conformação, até a temperatura ambiente e consiste em aquecer-se o vidro até a faixa de temperaturas de recozimento, manutenção nessa temperatura durante um determinado período de tempo e resfriamento lento até a temperatura ambiente.

A têmpera, no caso dos produtos de vidro, consiste no seu aquecimento a uma temperatura em torno do ponto de amolecimento, seguido de resfriamento rápido com jatos de ar ou mergulhando as peças em óleo.

Resulta um material com uma camada superficial rígida sob compressão e uma interior sob tração, com o que, quando em serviço, as tensões de compressão das camadas externas resistem às tensões de tração, resultando uma resistência geral maior.

Os vidros temperados são de três a cinco vezes mais resistentes que o vidro recozido, sem perder sua claridade inicial, nem sua dureza, nem o coeficiente de dilatação.

Finalmente, o acabamento consiste em operações de polimento, por exemplo, com ácido hidrofluorídrico; em coloração, pelo cobre ou compostos de prata; em metalização, para decoração ou conferir condutibilidade elétrica; acabamento mecânico, como esmerilhamento para eliminar cantos vivos etc.

4.1 **Tipos de vidros** Os principais tipos de vidros são os seguintes:[105]

– vidros da família soda-cal, que são os mais antigos, de menor custo, de mais fácil conformação e mais utilizados. São empregados em janelas comuns, garrafas, copos etc. Sua resistência à corrosão é razoável e podem ser utilizados até temperaturas de cerca de 460°C (no estado recozido) e 250°C (no estado temperado);

– vidros ao chumbo, com teores de chumbo de baixos a altos, de alta resistividade elétrica e custo relativamente baixo. Utilizados em diversos componentes óticos, em tubulações de sinalização de neônio e em hastes de lâmpadas elétricas etc.;

– vidros ao silicato de boro, de excelente durabilidade química, resistência ao calor e ao choque térmico e de baixo coeficiente de dilatação térmica. Um dos tipos mais comuns é conhecido com o nome de Pyrex, que possui o coeficiente de dilatação mais baixo. Há o tipo para vedação, empregado em vedações de vidro-metal; um dos produtos mais conhecidos denomina-se Kovar. Há, ainda, os tipos óticos, caracterizados por elevado coeficiente de transmissão da luz e boa resistência à corrosão. Seu emprego abrange diversos campos: vedações, visores, medidores, tubulações, espelhos de telescópios, tubos eletrônicos, vidros de laboratório, vidros de fornos etc.;

– vidros ao silicato aluminoso, de custo elevado, mas com boa resistência a temperaturas relativamente elevadas e boa resistência a choque térmico. Na condição recozida, a temperatura de serviço chega a 650°C. Apresentam ainda boa resistência às intempéries, à água e produtos químicos. São empregados em termômetros para altas temperaturas, tubos de combustão, utensílios para emprego em fornos de cozinhar etc.;

– vidros de sílica fundida – constituídos de 100% de dióxido de silício, são muito puros e estão entre os mais transparentes. São igualmente os mais resistentes ao calor, podendo ser usados a temperaturas até cerca de 900°C, sem serviço contínuo e até cerca de 1.260°C em serviço em que a exposição a essa temperatura é por um tempo curto. Possuem excelente resistência ao choque térmico e à ação de agentes químicos; caracteriza-se por máxima transmissão de luz ultravioleta. São de custo elevado e de conformação difícil, de modo que seu uso é limitado a aplicações muito especiais, como sistemas óticos de laboratório e instrumentos de laboratório para pesquisa.

Outros tipos de vidros incluem vidros boratados (não silicatados), vidros coloridos, vidros de segurança (compostos de duas ou mais camadas de vidro com uma ou mais camadas de plástico transparente, geralmente vinil), vidros fotossensíveis, vidros revestidos etc.

CAPÍTULO XXIV

MATERIAIS COMPÓSITOS

1 – Introdução São materiais constituídos por uma mistura de fases macrocomponentes compostas de materiais que estão num estado dividido e que, geralmente, são diferentes sob os pontos de vista de composição química e forma.(106)

Os principais macrocomponentes são fibras, partículas, lâminas, escamas e substâncias de enchimento, como está indicado na Figura 85.

Figura 85 *Os principais constituintes estruturais dos compósitos.*

O corpo do material é a "matriz", a qual envolve os componentes e compõe a forma do material.

Os componentes determinam a natureza da estrutura interna do "compósito".

A Figura 86 indica, com base na estrutura, os tipos básicos de "compósitos".

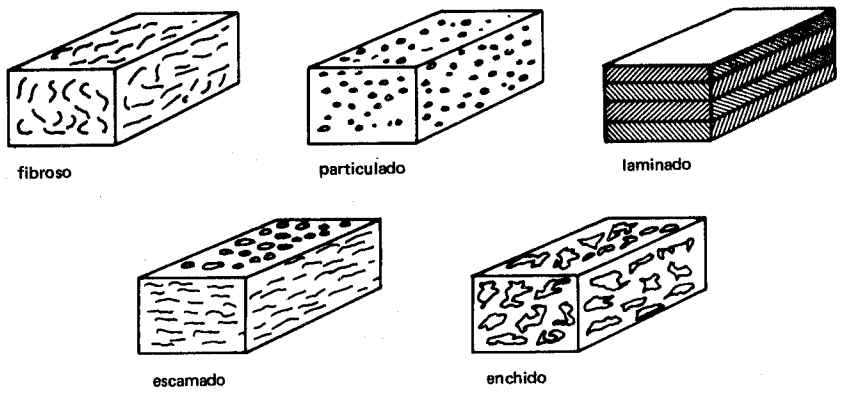


Figura 86 *Cinco tipos de compósitos baseados na estrutura.*

Como se vê, há, em princípio, cinco tipos:

– fibroso, composto de fibras, com ou sem matriz;

– particulado, composto de partículas, com ou sem matriz;

– lamelar, composto de camadas de constituintes laminados;

– escamado, composto de escamas achatadas, com ou sem matriz;

– enchido, composto de um esqueleto (matriz), preenchido com outro material.

As propriedades dos "compósitos" são dependentes da natureza e das propriedades dos componentes. Estes atuam geralmente como substâncias de reforço ou enchimento da matriz, proporcionando alta resistência mecânica, elevado módulo de elasticidade etc.

A matriz atua como uma base que confere ductilidade e mantém a estrutura coesa e que, em resumo, contribui para que o conjunto se caracterize por boas condições de fabricação e a necessária flexibilidade.

2 – Tipos de "compósitos" Serão considerados a seguir os principais tipos de "compósitos" e suas aplicações usuais.

2.1 **Compósitos fibrosos** Entre eles, devem ser mencionados os "plásticos reforçados com fibras", em que as resinas poliésteres são as mais usadas. Da combinação de fibras de vidro com uma matriz de poliéster, resultam um conjunto bem equilibrado de propriedades mecânicas e elétricas, resistência à corrosão, estabilidade dimensional e custo baixo.

Outros tipos de plásticos reforçados com vidro incluem as resinas fenólicas e os epóxis.

A técnica de reforçar plásticos com fibras de vidro evoluiu de tal maneira que se admite haver hoje, no mercado, mais de 1.000 produtos diferentes de termoplásticos reforçados, incluindo náilons, poliestirenos, policarbonatos, polipropilenos, acetais, ABS etc.

Como esse reforço aumenta apreciavelmente as propriedades mecânicas e melhora o comportamento do material à ação do calor, torna-se evidente que o campo de aplicações dos materiais plásticos, assim reforçados, se expandiu apreciavelmente.

Um segundo tipo de compósito fibroso é o que consiste numa combinação de fibras sintéticas, de boas propriedades mecânicas e boa resistência à corrosão, com fibras naturais, para formar produtos têxteis de várias naturezas.

Compósitos fibrosos mais sofisticados são constituídos de uma matriz de resina epóxi ou de alumínio, com fibras de boro e grafita.

As fibras de boro são obtidas por deposição a vapor de boro num substrato de tungstênio e as fibras de grafita são produzidas por carbonização de fibras acrílicas.

Um dos processos usuais de fabricação desses compósitos consiste em enrolamento dos filamentos num mandril de forma desejada, obtendo-se camadas sucessivas e intercaladas de fibras de grafita ou boro numa matriz de resina ou de folha de alumínio. Obtida a forma desejada, pressão e calor completam a operação de fabricação.

Na realidade, o produto final é um compósito laminado, em que as lâminas são compósitos fibrosos.

Finalmente, um último compósito fibroso de alto conteúdo tecnológico é o chamado "whisker", principalmente os whiskers de óxido de alumínio, em que os materiais constituintes estão na forma de cristais simples, muito finos (3 a 10 mícrons em diâmetro), resultando resistências mecânicas excepcionais, em razão exatamente da presença de cristais simples.

Os whiskers de alumina, por exemplo, podem atingir limites de resistência à tração da ordem de 2.100 kgf/mm^2 e módulos de elasticidade da ordem de 43.000 kgf/mm^2.

2.2 **Compósitos particulados** Neste grupo situam-se os "cermets" já estudados (Capítulo XVI).

Outros compósitos particulados incluem as "ligas endurecidas por dispersão", constituídas de partículas duras embebidas numa matriz mais mole.

Um exemplo conhecido e já citado é o produto da metalurgia do pó SAP (alumínio-óxido de alumínio).

Outro exemplo consiste na dispersão de óxido de tório em matriz de níquel, produzindo uma liga três a quatro vezes mais resistente que o níquel puro a temperaturas entre 870° e 1.315°C.

Finalmente, um último grupo de compósitos laminados compreende os tipos em que os materiais plásticos são enchidos com partículas metálicas. Por exemplo, o alumínio, como metal de enchimento, atua como decorativo e como elemento que melhora a condutibilidade térmica. Do mesmo modo, partículas de cobre são adicionadas em plásticos para melhorar a condutibilidade elétrica.

O chumbo atua no sentido de melhorar a capacidade de amortecimento dos plásticos, além de constituir uma barreira à radiação gama e conferir elevada densidade.

2.3 **Compósitos lamelares** A Figura 87 indica os dois principais tipos de compósitos lamelares.

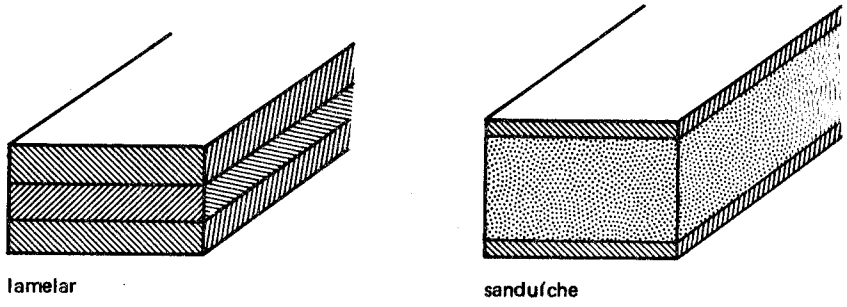


Figura 87 *Dois tipos principais de compósitos lamelares.*

O compósito lamelar consiste em duas ou mais camadas superimpostas e ligadas entre si, enquanto o compósito sanduíche consiste em um núcleo espesso de baixa densidade (espuma, por exemplo), coberto nas duas faces por camadas finas de material de densidade maior.

Os compósitos lamelares são empregados quando se deseja resistência à corrosão e oxidação a elevadas temperaturas, impermeabilidade, aspecto

decorativo, diminuição de custo, modificação das propriedades elétricas e magnéticas etc.

Os compósitos sanduíches caracterizam-se por uma combinação de camadas superficiais de alta densidade com núcleos menos densos, o que resulta em elevado módulo de seção por densidade unitária.

Os materiais mais freqüentemente empregados nas camadas superficiais são alumínio, aço inoxidável, plásticos reforçados com vidro, madeira, plásticos vinílicos e acrílicos etc.

Os materiais do núcleo caracterizam-se, geralmente, por serem leves. Eles podem ser do tipo celular e compreendem, entre outros, papel, plásticos reforçados, tecidos de algodão impregnados; do tipo sólido, incluindo madeira compensada, gesso, asbestos-cimento, silicato de cálcio; do tipo de espuma, como espuma plástica, principalmente de poliestireno, de uretana, de acetato de celulose, fenólica, epóxi e silicone.

Os núcleos espumosos são aconselhados quando se deseja material isolante.

Os núcleos celulares são os que possibilitam as melhores aplicações estruturais. Eles podem ser de três tipos: em forma de favos, corrugados ou em forma de "waffle".

Quanto aos depósitos lamelares, eles podem ser divididos nas seguintes combinações: metal com metal; metal e substância orgânica; metal e substância inorgânica; substância orgânica com substância orgânica; substância orgânica com substância inorgânica; substância inorgânica com substância inorgânica.

No caso de combinação de metal com metal, os objetivos ou são decorativos, ou propiciar alguma outra propriedade superficial ou propiciar alguma reação entre as faces e o núcleo, de modo a resultarem característicos novos.

Esses objetivos são alcançados mediante revestimentos superficiais, já estudados, inclusive o processo de cladização.

A combinação do metal com substância orgânica tem como principal exemplo a pintura prévia de um metal, mediante a aplicação de revestimentos dos tipos de resinas alquidas, acrílicas, vinílicas, epóxis etc. sobre a superfície de aços, ligas de alumínio etc.

A combinação de metal com substância inorgânica tem como principais exemplos a esmaltação e o revestimento cerâmico de metais. Por exemplo, aço revestido de vidro, empregado em tanques, silos de fazendas etc., ou ligas metálicas revestidas de cerâmica para reatores químicos.

A combinação de substância orgânica com outra substância orgânica tem como principal exemplo o contraplacado.

Os mais importantes compósitos desse grupo são os constituídos de papel, algodão ou tecidos plásticos, impregnados de resinas.

Outros exemplos incluem plásticos-madeira, correias de tecido-borracha etc.

A combinação de substância orgânica com substância inorgânica inclui a produção de laminados que devem suportar pressões elevadas. Esses laminados são obtidos pela impregnação de um material de reforço com resina termoestável, formando-se camadas múltiplas que são curadas por calor e pressão elevada, de modo a obter-se um sólido com boa resistência mecânica.

O material de reforço é geralmente vidro ou asbestos e as resinas empregadas são do tipo fenólico, silicone, epóxi, melamina e poliéster.

Outro exemplo importante, dentro desse grupo de laminados, é o vidro de segurança que consiste em duas camadas externas de folha de vidro ligada a uma camada mais fina de resina polivinil-butiral.

Finalmente, a combinação de substância inorgânica com outra substância inorgânica tem como principal exemplo os laminados de vidro com vidro, empregados em divisórias e aplicações semelhantes.

2.4 **Compósitos escamados** Consistem em escamas mantidas juntas por um aglomerante ou incorporadas na matriz.

O metal mais empregado na forma de escama é o alumínio, seguindo-se a prata. Outros materiais, não-metálicos, incluem a mica e o vidro.

Plásticos reforçados com escamas de vidro apresentam uma excelente combinação de resistência mecânica e propriedades elétricas, de modo que são empregados em circuitos impressos, isoladores moldados, painéis de luz polarizada etc.

Os compósitos de escama de mica são muito importantes. Geralmente são aglomerados com 5% de goma-laca, resina epóxi, alquida etc., e seu emprego é feito como material isolante de motores elétricos.

2.5 **Compósitos enchidos** Consistem em uma matriz contínua, tridimensional de base, infiltrada ou impregnada com um material de enchimento.

A matriz deve ter preferencialmente uma estrutura esquelética, para melhor impregnação do material de enchimento.

Esse tipo de estrutura é, por exemplo, característica de certas peças produzidas por metalurgia do pó: esqueleto metálico de tungstênio de ou molibdênio impregnado com cobre ou prata.

Plásticos também são empregados como materiais impregnantes de metais, para eliminar a porosidade ou conferir-lhes característicos de mancais.

APÊNDICE

ANEXO 1

SISTEMAS SAE e AISI DE CLASSIFICAÇÃO DOS AÇOS

Designação		Tipo de aço
SAE	AISI	
10XX	C10XX	Aços-carbono comum
11XX	C11XX	Aços de usinagem fácil, com alto S
13XX	13XX	Aços-Mn com 1,75%Mn médio
23XX	23XX	Aços-Ni com 3,5%Ni
25XX	25XX	Aços-Ni com 5,0%Ni
31XX	31XX	Aços-Ni-Cr com 1,25%Ni e 0,65%Cr e 0,80Cr
33XX	E33XX	Aços-Ni-Cr com 3,50%Ni, 1,50 e 1,57%Cr
303XX	–	Aços resistentes à corrosão e ao calor Ni-Cr
40XX	40XX	Aços-Mo com 0,25%Mo médio
41XX	41XX	Aços-Cr-Mo com 0,50% ou 0,95%Cr e 0,12%, 0,20%, 0,25% e 0,30 Mo
43XX	43XX	Aços-Ni-Cr-Mo com 1,82%Ni, 0,50% ou 0,80%Cr, 0,25%Mo
46XX	46XX	Aços-Ni-Mo com 0,85% ou 1,82%Ni e 0,20% ou 0,25%Mo
47XX	47XX	Aços-Ni-Cr-Mo com 1,05%Ni, 0,45%Cr, 0,20% e 0,35% mo

ANEXO 1 (*continuação*)

Designação		Tipo de aço
SAE	AISI	
48XX	48XX	Aços-Ni-Mo com 3,50%Ni e 0,25%Mo
50XX	50XX	Aços-Cr com 0,27%, 0,40%, 0,50%Cr e 0,65%Cr
51XX	51XX	Aços-Cr com 0,80% a 1,05%Cr
501XX	–	Aços para rolamentos de baixo cromo, com 0,50%Cr
511XX	E511XX	Aços para rolamentos de médio cromo, com 1,02%Cr
521XX	E521XX	Aços para rolamentos de alto cromo, com 1,45%Cr
514XX	–	Aços resistentes à corrosão e ao calor ao Cr
515XX	–	Aços resistentes à corrosão e ao calor ao Cr
61XX	61XX	Aços-Cr-V com 0,60%, 0,80% e 0,95%Cr e 0,10% ou 0,15%V (mín.)
86XX	86XX	Aços-Ni-Cr-Mo com 0,55%Ni, 0,50% ou 0,65%Cr, 0,20%Mo
87XX	87XX	Aços-Ni-Cr-Mo com 0,55%Ni, 050%, 0,25% Mo
92XX	92XX	Aços-Si-Mn com 0,65%, 082%, 0,85% ou 0,87%Mn, 1,40% ou 2,00%%Si e 0%, 0,17%, 0,32% ou 0,65%Cr
93XX	93XX	Aços-Ni-Cr-Mo com 3,25%Ni, 1,20%Cr e 0,12%Mo
98XX	98XX	Aços-Ni-Cr-Mo com 1,00%Ni, 0,80%Cr e 0,25%Mo
950	–	Aços de baixo teor em liga e alta resistência
XXBXX	XXBXX	Aços-boro com 0,0005% de B mín.
XXLXX	CXXLXX	Aços-chumbo com 0,15% a 0,35% de chumbo

ANEXO 2

CLASSIFICAÇÃO ABNT DE AÇOS-CARBONO PARA PRODUTOS SEMI-ACABADOS DESTINADOS A FORJAMENTO, TARUGOS, BARRAS, FIOS-MÁQUINA E TUBOS SEM COSTURA

Designação	Carbono, %	Manganês, %
1006 A	0,08 máx.	0,25 – 0,40
1008 A	0,10 máx.	0,25 – 0,50
1010 A	0,08 – 0,13	0,30 – 0,60
1015 A	0,13 – 0,18	0,30 – 0,60
1020 A	0,18 – 0,23	0,30 – 0,60
1025 A	0,22 – 0,28	0,30 – 0,60
1026 A	0,22 – 0,28	0,60 – 0,90
1030 A	0,28 – 0,34	0,60 – 0,90
1035 A	0,32 – 0,38	0,60 – 0,90
1038 A	0,35 – 0,42	0,60 – 0,90
1040 A	0,37 – 0,44	0,60 – 0,90
1041 A	0,36 – 0,44	1,35 – 1,65
1043 A	0,40 – 0,47	0,70 – 1,00
1045 A	0,43 – 0,50	0,60 – 0,90
1046 A	0,43 – 0,50	0,70 – 1,00
1050 A	0,48 – 0,55	0,60 – 0,90
1060 A	0,55 – 0,65	0,60 – 0,90
1070 A	0,65 – 0,75	0,60 – 0,90
1080 A	0,75 – 0,88	0,60 – 0,90
1095 A	0,90 – 1,03	0,30 – 0,50

ANEXO 3

CLASSIFICAÇÃO ABNT DE AÇOS-LIGA

Designação	C, %	Mn, %	Si, %	Cr, %	Ni, %	Mo, %
1340	0,38–0,43	1,60–1,90	0,20–0,35	–	–	–
4130	0,28–0,33	0,40–0,60	0,20–0,35	0,80–1,10	–	0,15–0,25
4135	0,33–0,38	0,70–0,90	0,20–0,35	0,80–1,10	–	0,15–0,25
4140	0,38–0,43	0,75–1,00	0,20–0,35	0,80–1,10	–	0,15–0,25
4320	0,17–0,22	0,45–0,65	0,20–0,35	0,40–0,60	1,65–2,00	0,20–0,30
4340	0,38–0,43	0,60–0,80	0,20–0,35	0,70–0,90	1,65–2,00	0,20–0,30
5115	0,13–0,18	0,70–0,90	0,20–0,35	0,70–0,90	–	–
5120	0,17–0,22	0,70–0,90	0,20–0,35	0,70–0,90	–	–
5130	0,28–0,33	0,70–0,90	0,20–0,35	0,80–1,10	–	–
5135	0,33–0,38	0,60–0,80	0,20–0,35	0,80–1,05	–	–
5140	0,38–0,43	0,70–0,90	0,20–0,35	0,70–0,90	–	–
5160	0,55–0,65	0,75–1,00	0,20–0,35	0,70–0,90	–	–
E52100	0,95–1,00	0,25–0,45	0,20–0,35	1,30–1,60	–	–
6150	0,48–0,53	0,70–0,90	0,20–0,35	0,80–1,10	–	–
8615	0,13–0,18	0,70–0,90	0,20–0,35	0,40–0,60	0,40–0,70	0,15–0,25
8620	0,18–0,23	0,70–0,90	0,20–0,35	0,40–0,60	0,40–0,70	0,15–0,25
8630	0,28–0,33	0,70–0,90	0,20–0,35	0,40–0,60	0,40–0,70	0,15–0,25
8640	0,38–0,43	0,75–1,00	0,20–0,35	0,40–0,60	0,40–0,70	0,15–0,25
8645	0,43–0,48	0,75–1,00	0,20–0,35	0,40–0,60	0,40–0,70	0,15–0,25
8650	0,48–0,53	0,75–1,00	0,20–0,35	0,40–0,60	0,40–0,70	0,15–0,25
8660	0,55–0,65	0,75–1,00	0,20–0,35	0,40–0,60	0,40–0,70	0,15–0,25
E9315	0,13–0,18	0,45–0,65	0,20–0,35	1,00–1,40	3,00–3,50	0,08–0,15

O tipo 6150 tem 0,15% mín. de vanádio.

QUESTÕES E EXERCÍCIOS

CAPÍTULOS I a VI

1. Quais as vantagens da utilização do carvão coque em lugar do carvão de madeira nos altos-fornos?
2. Quais as vantagens de utilizar-se "pelotas" na carga metálica do alto-forno?
3. Explicar por que o minério de manganês constitui matéria-prima importante na indústria siderúrgica.
4. Qual o papel desempenhado pela "sucata" na indústria siderúrgica?
5. Qual a função do calcário na carga do alto-forno?
6. É possível sustentar um grande parque siderúrgico baseado apenas no carvão de madeira como combustível? Calcular, baseado no exemplo brasileiro, qual deveria ser a área reflorestada para garantir o abastecimento regular de carvão para altos-fornos com 2 milhões de capacidade de gusa por ano.
7. Qual o objetivo de aplicar-se pressão no topo dos altos-fornos?
8. Qual o princípio de funcionamento dos regeneradores das instalações de altos-fornos?
9. Explicar quais são os subprodutos obtidos durante a coqueificação do carvão mineral. Qual a sua utilidade na indústria em geral?
10. Por que, na prática siderúrgica brasileira, é necessário misturar carvão importado com carvão nacional, para o abastecimento dos altos-fornos locais?

11. Quais são as reações fundamentais que ocorrem num alto-forno? Quais os produtos resultantes?
12. Para produzir 2.500 toneladas de ferro gusa, calcular a composição da carga total, utilizando elementos relacionados com a qualidade das matérias-primas brasileiras.
13. Descrever o processo de produção do ferro pudlado.
14. Qual a distinção básica, no que se refere às reações químicas, entre o princípio de produção de ferro gusa e o de produção de aço?
15. Quais as diferenças essenciais entre o processo clássico do alto-forno e os processos de redução direta?
16. Comparar os processos Bessemer e L.D. para fabricação do aço. Por que nesses aparelhos não se usa combustível?
17. Por que se procura desoxidar o aço fundido durante seu vazamento nas lingoteiras?
18. Explicar o princípio de operação dos processos de fundição contínua.
19. Por que o processo Bessemer não pode ser empregado para a fabricação de aços especiais?
20. Quais são os processos recomendados para a fabricação de aços especiais? Elucidar a resposta.
21. Quais são as etapas fundamentais para a obtenção do alumínio a partir da bauxita?
22. O que vem a ser "mate" no processo de produção do cobre, a partir de seus minérios?
23. Discutir a eletrólise na metalurgia dos metais não-ferrosos como: a) processo de fabricação; b) processo de refinação.
24. Quais são os outros elementos químicos que podem ser obtidos na metalurgia do chumbo?
25. Descrever, em linhas gerais, o processo de obtenção do estanho a partir da cassiterita.

CAPÍTULOS VII a IX

1. Determinar, pela "regra da alavanca", a composição estrutural de um aço eutetóide, de um aço com 0,38% de carbono e de um aço com 1,22% de carbono.
2. Explicar a constituição da cementita e sua influência sobre as propriedades do aço.

3. Explicar a estrutura da austenita e o papel que representa no diagrama de equilíbrio Fe-C.
4. Explicar a estrutura da perlita e sua influência sobre as propriedades do aço.
5. Explicar a estrutura da ledeburita e sua infuência sobre as propriedades dos ferros fundidos.
6. Explicar a formação da grafita em veios e a influência desse constituinte sobre os característicos gerais dos ferros fundidos.
7. Explicar a influência do tamanho de grão nas propriedades dos aços.
8. Por que a determinação da temperabilidade de um aço é importante?
9. Quais são os fatores que influem na posição das linhas em C no diagrama TTT?
10. Explicar a formação e os característicos da estrutura martensita.
11. Explicar a formação e os característicos da estrutura esferoidita.
12. Quais são os tratamentos térmicos a que se submetem os aços cementados?
13. Quais são as diferenças essenciais dos vários processos de cementação?
14. Qual a diferença entre cianetação e carbonitretação?
15. Quais são os tratamentos térmicos a que usualmente se submetem os ferros fundidos?
16. Quando é recomendável o tratamento de alívio de tensões em peças de ligas ferrosas?
17. Em que condições de composição química um aço pode ser temperado?
18. Quais são as estruturas que resultam do revenido de um aço temperado?
19. Quais as diferenças essenciais entre recozimento e normalização sob o ponto de vista de efeito na estrutura e nas propriedades de um aço?
20. O que é steadita? Em que ligas ferro-carbono aparece?
21. Quais as diferenças essenciais entre os tratamentos de austêmpera e martêmpera?
22. Para endurecer superficialmente um aço, quais são os processos que podem ser utilizados?
23. Admitindo-se um aço com uma curva TTT a seguir indicada e que tenha sido esfriado em água de modo a apresentar as curvas de esfriamento da superfície e do centro indicadas na figura, pergunta-se: a) Qual a estrutura resultante na superfície? b) Qual a estrutura resultante no centro? Se o resfriamento em água se revelasse muito drástico, a ponto de poder provocar excessivo e indesejável empenamento da peça, quais seriam os meios recomendados para evitar-se esse inconveniente, sem alterar a tendência de formação das mesmas estruturas?

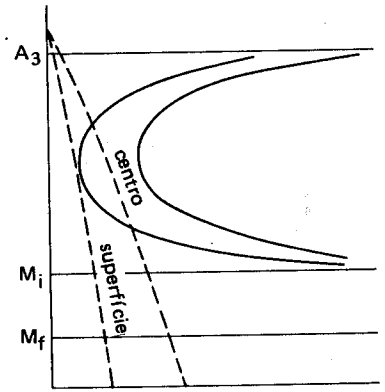


Figura A

24. Como se obtém a estrutura bainita nos aços?
25. Qual o efeito dos elementos de liga sobre as linhas M_i e M_f do diagrama TTT7?

CAPÍTULOS X e XI

1. Quais são as vantagens da adição de elementos de liga nos aços e nos ferros fundidos?
2. Quais os efeitos dos elementos de liga sobre a temperabilidade dos aços? Elucidar a resposta.
3. Por que os elementos fósforo e enxofre devem ser mantidos em teores baixos nos aços?
4. Quais são os efeitos que um projeto mal feito pode provocar na qualidade das peças de aço fundido?
5. Quais são os característicos fundamentais que se exigem dos aços utilizados em molas? Como atingi-los?
6. Como se consegue, por intermédio da estrutura, conferir-se maior usinabilidade aos aços?
7. Explicar o princípio de conferir-se alta resistência mecânica aos aços pela adição de vários elementos de liga em baixos teores.

8. Explicar o princípio dos sistemas de classificação dos aços da ABNT e da SAE.
9. Por que para a nitretação clássica é sempre preciso a presença de elementos de liga nos aços correspondentes?
10. O que se exige num aço para chapas? Qual o teor de carbono recomendado para chapas de aço a serem submetidas ao processo de estampagem profunda?
11. Como aparecem os defeitos "linhas de distensão" e "casca de laranja"? Como evitá-los?
12. Quando é recomendável o emprego de aços com carbono elevado ou com elementos de liga em peças de aço fundido? Elucidar a resposta.
13. Qual a estrutura predominante num ferro fundido branco? Por que esses materiais têm aplicação limitada?
14. Como são melhoradas as propriedades do ferro fundido cinzento?
15. Quais as diferenças fundamentais entre os processos de maleabilização e nodulização? Como se apresenta a grafita em ambos os casos?
16. Qual a estrutura que caracteriza o ferro fundido cinzento perlítico? Quais suas propriedades, em comparação com outros tipos de ferros fundidos cinzentos?
17. Explicar por que nos chamados "aços criogênicos", a temperatura de transição é um fator importante a considerar.
18. Explicar por que o ferro fundido cinzento é pouco resistente e muito frágil, quando comparado ao aço.
19. Explicar o processo de patenteamento e indicar os principais casos práticos em que o mesmo é aplicado.
20. Explicar por que os chamados aços Hadfield são os melhores tipos de aços para aplicações de resistência ao desgaste. Explicar as diversas transformações estr urais que podem ocorrer nesses aços.

CAPÍTULOS XII a XV

1. Explicar por que o alumínio tem sido utilizado como substituto do cobre em linhas de transmissão de força.
2. Indicar quais as principais ligas metálicas utilizadas em mancais.
3. Por que o titânio tem sido chamado o "metal do futuro"?
4. Quais são os principais empregos do níquel?

5. Quais são os característicos básicos do magnésio que tornam esse metal importante para a indústria de transporte?
6. Por que certas ligas de alumínio são submetidas a um revestimento superficial de modo a torná-las do tipo Alclad? Em que consiste esse revestimento?
7. Qual o procedimento a ser empregado para endurecer por precipitação uma liga Al-Cu, contendo 4% de cobre?
8. Quais são os métodos recomendados para aumentar a usinabilidade dos latões?
9. Comparar as ligas à base de alumínio e as ligas à base de zinco para peças fundidas sob pressão. Quais as vantagens e as desvantagens de cada?
10. Quais são as formas usuais em que se encontra o cobre?
11. Indicar os principais tipos de ligas utilizadas em materiais de soldagem fraca.
12. Quais são os característicos principais que tornam o cobre um metal de grande importância industrial?
13. Por que o bronze é preferível ao aço como material para mancais?
14. Quais as diferenças essenciais entre as ligas de alumínio trabalhadas e as tratadas termicamente?
15. Explicar por que o alumínio comercialmente puro tem limitações na sua aplicação em componentes mecânicos. Explicar como podem ser melhoradas as propriedades do alumínio.

CAPÍTULO XVI

1. Explicar o significado da expressão "dureza a quente".
2. Quais são os principais pontos de distinção entre o aço rápido e o aço-carbono para ferramentas?
3. Explicar o fenômeno de formação de cratera em ferramentas de metal duro, como evitá-lo e quais as classes de metal duro menos sensíveis a ele.
4. Explicar como ocorre o endurecimento secundário de um aço rápido.
5. O que caracteriza fundamentalmente um aço indeformável? Quais são as suas principais aplicações?
6. Num aço resistente ao choque, qual o característico mais importante: tenacidade ou dureza? Por quê? Caracteriza-se esse aço por grande profundidade de endurecimento?

7. O que caracteriza a estrutura de um aço rápido temperado?
8. Por que nos aços para ferramentas e matrizes com altos teores de elementos de liga, é recomendável submetê-los a pré-aquecimento, na operação de têmpera?
9. Qual a ação do cobalto nos diferentes tipos de metal duro? Qual o efeito do aumento da quantidade de cobalto sobre as propriedades do metal duro?
10. Na usinagem de metais e ligas que produzem cavacos longos, quais as classes de metal duro recomendadas? Por quê?
11. Explicar por que na utilização de ferramentas de material cerâmico é necessário o emprego de máquinas operatrizes de grande potência e grande rigidez.
12. É o diamante um material comum para ferramentas e matrizes? Elucidar a resposta.
13. Além das aplicações em ferramentas de usinagem, quais são as outras possíveis aplicações do metal duro? Elucidar a resposta.
14. Explicar a natureza e o campo de aplicação das "ligas fundidas".

CAPÍTULO XVII

1. Como se evita a corrosão intergranular nos aços inoxidáveis?
2. Como se origina a "passividade" nos aços inoxidáveis?
3. Qual a probabilidade de corrosão intergranular de um aço inoxidável Cr-Ni, contendo 19% de Cr e 0,05% de C?
4. Quais são os característicos principais do metal Monel?
5. Explicar o efeito do cromo sobre a resistência à oxidação dos aços.
6. Qual é a propriedade mecânica fundamental que se procura num aço resistente ao calor?
7. Os aços inoxidáveis ferríticos são passíveis de endurecimento por têmpera? Por quê?
8. Quais são as principais ligas não-ferrosas resistentes ao calor?
9. Quais são as propriedades notáveis e aplicações das ligas contendo 80% de Ni e 20% de Cr?
10. Quais são as principais ligas não-ferrosas resistentes à corrosão?

BIBLIOTECA

CAPÍTULO XVIII

1. Distinguir materiais magneticamente duros de materiais magneticamente moles.
2. Explicar a composição dos metais Alnico, suas propriedades e quais os processos empregados na sua fabricação.
3. Quais são os característicos básicos que tornam as ligas Fe-Si recomendáveis para aplicações na indústria elétrica?
4. Explicar o que vem a ser magnetismo residual e força coerciva.
5. Explicar por que o tratamento de têmpera confere, a determinados aços, característicos que os tornam indicados em aplicações magnéticas.
6. Além das ligas Fe-Si, quais são as outras ligas importantes sob o ponto de vista de aplicação na indústria elétrica?

CAPÍTULO XIX

1. Explicar o princípio de autolubrificação das buchas porosas sinterizadas.
2. Por que os metais chamados refratários só podem ser obtidos por metalurgia do pó? Quais são esses metais? Quais são suas principais aplicações?
3. Explicar quando peças de ferro e aço sinterizado se tornam competitivas em relação às mesmas peças produzidas pelos processos metalúrgicos convencionais.
4. Explicar por que é necessário utilizar anéis de aço para suportar os materiais de fricção sinterizados.
5. Por que os filtros metálicos feitos por metalurgia do pó são mais recomendáveis para determinadas aplicações que os fabricados a partir dos materiais convencionais?
6. Quais são as técnicas que permitem aumentar a resistência e melhorar a ductilidade do ferro e aço sinterizado?
7. Quais são as propriedades que se procuram nas chamadas "pseudo-ligas"?
8. O que caracteriza basicamente as chamadas "ligas pesadas"? Quais são suas principais aplicações?
9. Explicar as vantagens que a metalurgia do pó oferece sobre os processos metalúrgicos convencionais.
10. Quais são os objetivos da operação de calibragem em peças de ferro e aço sinterizado?

11. Descrever o processo básico para a produção de fios de tungstênio.
12. Entre os metais e ligas não-ferrosos, quais são os mais comumente transformados em peças por metalurgia do pó? Exemplificar, justificando a resposta.

CAPÍTULOS XX a XXII

1. Por que se "arma" o concreto com barras de aço?
2. Por que é importante a relação água/cimento no estudo do comportamento de um concreto?
3. Explicar o significado da expressão "cura" do concreto.
4. Explicar o que é dosagem racional do concreto.
5. Por que o pedregulho é preferível à pedra britada no preparo do concreto?
6. Quais são as aplicações indiretas do concreto no setor mecânico?
7. O que caracteriza fundamentalmente um concreto que deverá ser compactado "por vibração"?
8. Qual a diferença entre "plasticidade" e "consistência" de um concreto?
9. Em que setores da indústria mecânica as madeiras são empregadas?
10. Por que se pode admitir que o mundo está na "nova era da madeira"?
11. Quais são as enfermidades usuais das madeiras? Como combatê-las?
12. Explicar a natureza do "contraplacado".
13. Quais são as espécies brasileiras comumente utilizadas para cabos de ferramentas e aplicações semelhantes?
14. Como varia, de um modo geral, a densidade das madeiras?
15. Quais são as propriedades que comumente se determinam na madeira?
16. Explicar os defeitos que podem inutilizar o emprego da madeira.
17. Diferenciar "plasticidade" de um material plástico sintético de "plasticidade" de materiais metálicos.
18. Qual a diferença entre "plástico termoplástico" e "plástico termofixo"?
19. Em que setores da indústria mecânica os materiais plásticos podem ser empregados? Quais as vantagens?
20. Explicar o significado da expressão "cristalinidade" em relação aos materiais plásticos.

21. Quais são os característicos gerais que se procuram nos materiais plásticos?
22. Explicar os objetivos da utilização de "aditivos" nos materiais plásticos.
23. O que significa "cura" do plástico?
24. Descrever as principais matérias-primas empregadas na fabricação dos materiais plásticos.
25. Relacionar os plásticos seguintes pela ordem crescente de resistência ao calor:

- polietileno
- ABS
- náilon
- poliestireno
- fenólico (enchido)
- epóxi

CAPÍTULOS XXIII e XXIV

1. Qual a diferença de comportamento de um material cerâmico, em relação aos esforços de tração e de compressão?
2. Quais são os materiais cerâmicos mais recomendados para rebolos de retificação?
3. Quais as propriedades mais importantes dos materiais cerâmicos?
4. Quais os tratamentos térmicos a que são comumente submetidos os vidros? Por quê?
5. Quais são os principais grupos de materiais compósitos e como se distinguem entre si?
6. Qual o papel da matriz num material compósito?
7. Indicar alguns materiais compósitos de uso comum na indústria.
8. Explicar a estrutura de um compósito tipo sanduíche.

BIBLIOGRAFIA

1. CONSIDER. Conselho de não-ferrosos e de siderurgia. Anuário Estatístico, 1985.
2. McGANNON, H. E. *The Making, Shaping and Treating of Steel.* 9ª ed., United States Steel, 1971. p. 2 e seguintes.
3. USIMINAS. "O Ferro na História do Brasil e de Minas Gerais. Revista, ano 7, nº 14, outubro, 1976.
4. FELICÍSSIMO Jr, J. *História da Siderurgia de São Paulo, seus Personagens, seus Feitos.* Associação Brasileira de Metais ABM, 1969.
5. MACEDO SOARES E SILVA, E. *O Ferro na História e na Economia do Brasil.* Biblioteca do Sesquicentenário, 1972.
6. ARAÚJO, L. A. de. *Siderurgia.* Editora F.T.D., 1967.
7. REF. 2. p. 182.
8. ABREU, S. F. *Recursos Minerais do Brasil*, vol. II. Ministério da Indústria e do Comércio, Instituto Nacional de Tecnologia, 1962. p. 269 e seguintes.
9. REF. 6. p. 19 e seguintes.
10. REF. 2. p. 218 e seguintes.
11. REF. 2. p. 104 e seguintes.
12. REF. 2. p. 79.
13. ABM. *Siderurgia Brasileira a Carvão de Madeira*, 1976. p. 119.

14. BARBOSA, A. F., MARQUES DE ALMEIDA, F. F., NOGUEIRA FILHO, J. do VALLE, SOUZA SANTOS, T. D. e MAZZARELLA, V. "Manganês". *Geologia e Metalurgia*, nº 19, 1959.
15. REF. 2. p. 439.
16. REF. 2. p. 470 e seguintes.
17. REF. 2. p. 403 e seguintes.
18. REF. 2. p. 707.
19. OFFEN, K. *Metalurgia do Cobre: do Mate ao Cobre Comercial.* Centro Brasileiro de Fomento do Uso do Cobre. CEBRACO, 1966.
20. CHAUSSIN, C. e HILLY, G. *Métallurgie*, Tome II, *Elaborations des matériaux*. Dunod, 1972. p. 193 e seguintes.
21. BUDGEN, N. F. *Aluminum and its Alloys.* Sir Isaac Pitman & Sons, 1947. p. 42 e seguintes.
22. CHIAVERINI, V. *Aços e Ferros Fundidos.* 5ª ed. ABM, 1984. p. 21.
23. REF. 22. p. 425.
24. HAWKINS, D. T. e HULTGREEN, R. *Constitution of Binary Alloys.* Metals Handbook. 8ª ed. ASM, 1973. p. 275.
25. REF. 22. p. 435.
26. DAVENPORT, E. S. e BAIN, E. C. *Transformations of Austenite at Constant Subcritical Temperatures.* Trans. AIMME. Vol. 3, 1930.
27. REF. 22. p. 54.
28. REF. 22. p. 58.
29. REF. 22. p. 65.
30. REF. 22. p. 81.
31. REF. 22. p. 87.
32. REF. 22. p. 91 e seguintes.
33. REF. 22. p. 120.
34. REF. 22. p. 127 e seguintes.
35. DOELKER, W. J. *Vacuum Carburizing – Metal Progress.* Vol. III, nº 5, 1977.
36. REF. 22. p. 161 e seguintes.
37. CLAUSER, H. R. *Industrial and Engineering Materials.* McGraw-Hill Kogakusha Ltd., 1975. p. 116 e seguintes.
38. REF. 22. p. 214.

39. REF. 22. p. 234.

40. REF. 22. p. 242 e seguintes.

41. BENBOW, W. E. *Steels in Modern Industry*. Iliffe & Sons, 1951. p. 168 e seguintes.

42. ASM COMMITTEE ON SELECTION OF STEEL FOR MACHINABILITY. *The Selection for Economy in Machining*. Metals Handbook. 8ª ed. Vol. 1, 1961. p. 302 e seguintes.

43. REF. 22. p. 261.

44. HOMERBERG, V. O. *Nitralloy and the Nitriding Process*. The Nitralloy Corp., 1948.

45. HANSON, A. e PARR, J. G. *The Engineer's Guide to Steel*. Addison-Wesley Publishing Co., 1965. p. 230 e seguintes.

46. GUZZONI, G. *Gli Acciai Comuni e Speciali*. Editore Ulrico Hoepli, 1966. Vol. I. p. 231 e seguintes.

47. REF. 22. p. 434 e seguintes.

48. ASM COMMITTEE ON CHILLED AND WHITE CAST IRON. *Abrasion-resistant chilled and white cast iron*. Metals Handbook. 8ª ed. ASM. p. 394 e seguintes.

49. REF. 22. p. 455.

50. FRIEND, W. Z. *Corrosion Resistance of Cast Iron*. Cast Metals Handbook. 4ª ed. American Foundrymen's Society, 1957. p. 121 e seguintes.

51. CULLING, J. H. *Heat Resistant Cast Irons*. Metals Handbook. 8ª ed. Vol. 1. ASM, 1961. p. 404 e seguintes.

52. BURGESS, C. O. *Heat Treatment of Gray Iron*. Cast Metals Handbook. 4ª ed. AFS, 1957. p. 146 e seguintes.

53. REF. 22. p. 476.

54. REF. 22. p. 481 e seguintes.

55. BRESCIANI FILHO, E. e RENNÓ GOMES, M. *Propriedades e Usos de Metais Não-Ferrosos*. ABM, 1985.

56. HAWKINS, D. T. e HULTGREN, R. *Constitution of Binary Alloys*. Metals Handbook. Vol. 8. 8ª ed. ASM, 1973. p. 301.

57. REF. 56. p. 294.

58. ASM COMMITTEE ON HEAT TREATING OF COPPER ALLOYS. *Heat Treating of Copper and Copper Alloys*. Metals Handbook. Vol. 2. 8ª ed. ASM, 1964. p. 284 e seguintes.

59. REF. 56. p. 259.

60. SINGH, G. H. e FLEMING, A. G. *Superstrong Aluminum Alloys Extend Range of Castings*. Metals Progress. Vol. 107, nº 4, abril, 1975. p. 79.

61. ASM COMMITTEE ON SLEEVE BEARING MATERIALS. *Sleeve Bearing Materials*. Metals Handbook. Vol. 1. 8ª ed. ASM, 1961. p. 843 e seguintes.

62. METALS HANDBOOK. Vol. 1. 8ª ed. 1961. p. 1118.

63. ASM COMMITTEE ON MAGNESIUM. *Magnesium and Magnesium Alloys*. Metals Handbook. Vol. 1. 8ª ed. 1961. p. 1067 e seguintes.

64. INSTITUTO DE PESQUISAS E DESENVOLVIMENTO. Centro Técnico da Aeronáutica. *Titânio*. 1968.

65. ASM COMMITTEE ON TITANIUM. *Properties of Titanium and Titanium Alloys*. Metals Handbook. Vol. 1. 8ª ed., 1961. p. 1153 e seguintes.

66. CHIAVERINI, V. "Materiais para Ferramentas" *in* Dino Ferraresi. *Fundamentos da Usinagem dos Metais*. Ed. E. Blucher e USP. Vol. 1, 1970. p. 333.

67. CHIAVERINI, V. *Contribuição para o Estudo dos Fatores Determinantes da Vida de Ferramentas de Metal Duro*. Tese para Concurso de Cátedra da Escola Politécnica da USP. 1967.

68. SUB-COMMITTEE ASTME. *Cemented Carbides*. Tool Enginners Handbook. 2ª ed. McGraw-Hill, 1959. p. 14-12.

69. DAWIHL, W. *A Handbook of Hard Metals*. Philosophical Library, 1956. p. 90 e seguintes.

70. SCHWARZKOPF, F. e KIEFFER, R. *Cemented Carbide*. MacMillan, 1960. p. 154.

71. CLIMAX MOLYBDENUM CO. *The Use of Molybdenum in Ti-C base Cermets*, 1967.

72. FRITZLEN, G. A. e ELBAUM, J. K. *Cobalt-Chromium-Tungsten-Molybdenum Wear-Resistant Alloys*. Metals Handbook. Vol. 1. 8ª ed., 1961. p. 669 e seguintes.

73. REF. 22. p. 328 e seguintes.

74. DOUTHETT, J. A. *Nitronic Family of Nitrogen-Bearing Stainless Steels*. Metal Progress. Agosto, 1975. Vol. 108, nº 3. p. 50.

75. FRIEND, W. Z. *The Resistance of Nickel and Nickel Alloys to Corrosion*. Metals Handbook. Vol. 1. 8ª ed., 1961. p. 1115.

76. REF. 22. p. 359 e seguintes.

77. ASM COMMITTEE ON HEAT-RESISTANT CASTINGS. *Heat-Resistant Alloy Castings*. Metals Handbook. Vol. 1. 8ª ed., 1961. p. 443 e seguintes.

78. WATERS, W. J. e FRECHE, J.C. *Nasa vae alloys boasts high temperature strenght*. Metals Progress. Vol. 107, nº 3. Março, 1975. p. 57.

79. REF. 22. p. 375 e seguintes.

80. ASM COMMITTEE ON MAGNETICALLY SOFT MATERIALS. *Magnetically soft materials*. Metals Handbook. Vol. 1. 8ª ed., 1961. p. 785 e seguintes.

81. SCHWARZKOPF, P. *Powder Metallurgy, Its Physics and Production*. MacMillan, 1947. p. 170 e seguintes.

82. HIRSCHOORN, J. S. *Introduction to Powder Metallurgy*. The Colonial Press Inc., 1969. p. 237.

83. TRACEY, V. A. *Porous Materials, Current and Future Trends*. The International Journal of Powder Metallurgy & Powder Technology. Vol. 12, nº 1. Janeiro, 1976. p. 25.

84. MORGAN, V. T. *Bearing Materials by Powder Metallurgy*. Conference Preprint. Outubro, 1977. The Metals Society. Powder Metallurgy Group Meeting.

85. HAUSNER, H. H. *Handbook of Powder Metallurgy*. Chemical Publishing Co. 1973.

86. CHIAVERINI, V. e NOGUEIRA, E. F. *A Metalurgia do Pó na Fabricação de Materiais de Fricção*. Boletim ABM. Vol. 17, nº 66, Setembro, 1961.

87. REF. 85. p. 443.

88. CHIAVERINI, V. *Metalurgia do Pó, Técnica e Produtos*. ABM, 1982. p. 242.

89. REF. 88. p. 102.

90. METAL PROGRESS. *1977 Databook*. 1977. p. 67 e seguintes.

91. STORCHHEIM, S. *Aluminum Powder Metallurgy Air Sintering*. 1973.

92. REF. 90. p. 70.

93. MOLERA, P. *Introducción a la Pulvimetalurgía*. Ediciones Bellaterra, 1977.

94. TORRES, A. *Materiais de Construção*. Notas de Aula. Associação Brasileira de Cimento Portland, 1955.

95. TORRES, A. F. *Introdução ao Estudo da Dosagem Racional do Concreto*. Associação Brasileira de Cimento Portland, 1955.

96. BAUER, L. A. FALCÃO. *Materiais de Construção*. Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 1979. p. 95 e seguintes.

97. GLESINGER, E. *A Próxima Era da Madeira*. Grijalbo, 1968.

98. BROTERO, F. A. *Métodos de ensaios adotados no IPT para o Estudo das Madeiras Nacionais*. Boletim nº 31 do IPT, junho, 1945.

99. REF. 98. *Apêndice*.

100. REDFARN, C. A. *Tecnologia das Matérias Plásticas*. Polígono, 1962.

101. MILES, D. C. e BRISTON, J. H. *Tecnologia dos Polímeros*. USP/Polígono, 1975.

102. AMERICAN SOCIETY FOR METALS. *Fundamentals of Plastics*, 1974.

103. REF. 37. p. 221 e seguintes.

104. REF. 37. p. 345 e seguintes.

105. REF. 37. p. 366 e seguintes.

106. REF. 37. p. 381 e seguintes.

ÍNDICE ANALÍTICO

Abóbada (de forno), 41
ABS, 336
Acalmado (aço), 46, 130
Acetais, 335
Aciaria, 1
Aço(s), 66
  acalmado, 46, 130
  austenítico, 141, 257
  carbono, 66, 124
  carbono-cromo, 141
  classificação, 115
  composição química, 116
  criogênico(s), 143
  curvas TTT, 83
  de usinagem fácil, 136
  efervescente, 46, 130
  estruturais, 125
  eutetóide, 68
  fabricação, 30
  ferrítico(s), 257
  grafítico(s), 140, 143
  Hadfield, 140
  hipereutetóide(s), 68
  hipoeutetóide(s), 68
  indeformáveis, 221
  inoxidável, 251
    austenítico, 257
    ferrítico, 257
    martensítico, 256
  liga, 66, 124
  maraging, 143
  martensítico(s), 256
  Nitralloy, 140
  nitrônico(s), 259
  para arames e fios, 131
  para cementação, 138
  para chapas, 128
  para construção mecânica, 115
  para ferramentas e matrizes, 218
  para fins especiais, 140
  para fundição, 123
  para matrizes, 216
  para molas, 134
  para nitretação, 138
  para trabalho a frio, 221
  para trabalho a quente, 222
  para tubos, 130
  propriedades, 116
  rápido(s), 224
  refratário(s), 261
  resistente(s) à corrosão, 251
  resistente(s) à oxidação, 261
  resistente(s) ao calor, 261
  resistente(s) ao choque, 222
  resistente(s) ao desgaste, 140
  semiacalmado, 46
  semi-rápido, 229
  sinterizado(s), 292
  super-rápido, 225
  temperáveis em água, 220
  ultraduros, 225
  ultra-resistente(s), 141
Acrílicos, 333
Aditivos, 330

  estabilizadores, 330
  materiais de enchimento, 330, 331
  para concreto, 313
  plastificantes, 330, 331
Aglomeração, 9
Aglomerante, 306
Agregados, 306
Alclad, 191, 199
Alfa (estrutura), 69
Alílicos, 339
Alívio de tensões, 101, 158, 188
Alnico(s), 276
Alpacas, 186
Alquidos, 339
Alto-forno, 1, 17
    construção, 17
    operação (ou marcha), 23
Alumina, 57, 352
  eletrólise, 58
  obtenção, 58
Alumínio, 57, 190
  aplicações, 190
  ligas de, 191, 301
  metálico, 190
  obtenção, 57
  sinterizado, 301
Amadurecimento (temperatura), 348
Aminos, 340
Anomalias (da madeira), 321
Apodrecimento (da madeira), 321
Arames
  aços, 131
Atática (estrutura), 327
Austêmpera, 105
Austenita, 70
  homogeneidade, 91
  retida, 227
Austenítico (aço), 257
Austenítico (ferro fundido), 157
Babbitt (metais), 206, 207
Banho(s) de sal, 110
  nitretação em, 113
Bainita, 81, 105
Bayer (processo), 58
Beneficiamento (minério de ferro), 9
Berila (refratário), 352
Bessemer
  conversor, 32, 33, 37
  processo, 31
Blister (cobre), 56
Boretação, 114
Bronze(s), 181
  comercial, 176
  fosforoso, 183
  para mancais, 184
Buchas autolubrificantes, 284
Cadinho (alto-forno), 17
Calcário, 15, 306
Câmara
  de combustão, 23
  de empilhamento, 23
  de escória, 41
  de regeneração, 13
Canga, 8
Carbonetos duros sinterizados, 231
Carbono, 116
  equivalente, 147
Carbonitretação, 114
Carburizante (mistura), 108
Carga
  do alto forno, 24
  do Bessemer, 33
  do Siemens-Martin, 40, 44
Carregamento
  período de, 43
  portas de, 41
Carvão, 10
  coque, 11
  mineral, 11
  vegetal (ou de madeira), 13
"Casca de laranja" (defeito), 130
Cementação, 106
  a gás, 109
  aços para, 138
  em caixa (ou sólida), 108
  líquida, 110
  sob vácuo, 111
  tratamentos térmicos da, 112
Cementita, 70
Cerâmicos (materiais), 247, 340
Cermets, 245
Chama (têmpera por), 103
Chapas, 128
  aços para, 128
  galvanizadas, 128, 208
Choque (aços resistentes ao), 222
Chumbo, 204
  aços ao, 137
  aplicações, 205
  ligas de, 205
  produção do, 63
  tipos, 205
Cianetação, 114
Ciclo de histerese, 269

ESCOLA DE ENGENHARIA BIBLIOTECA

Ciclo de maleabilização, 160
Cimento, 306
  aluminoso, 308
  argamassa de, 309
  de pega lenta, 308
  de pega rápida, 308
  metalúrgico, 28, 308
  pasta de, 308
  portland, 306
Classificação dos aços, 115
Clinquer, 307
Coalescimento, 102
Cobalto, 231
Cobre, 53, 169
  anodos de, 56
  blister, 56
  desoxidado com fósforo, 171
  eletrolítico tenaz, 170
  isento de oxigênio, 171
  ligas de, 173, 301
  minérios de, 53
  produção, 53
  refinado a fogo, 170
  refundido, 171
  sinterizado, 301
  tratamento térmico, 188
Coletor de poeira, 23
Compensados (contraplacados), 322
Compósitos, 356
  enchidos, 361
  escamados, 361
  fibrosos, 358
  laminados (ou lamelares), 359
  particulados, 359
Concreto, 309
  consistência, 311
  cura, 310
  dosagens, 309, 312
  trabalhabilidade, 311
Conpernick, 272
Constantan (liga Cu-Ni), 186
Contatos elétricos (materiais), 287
Contraplacados, 322
Conversor
  Bessemer, 32
  BPO, 37
  de sopro lateral, 37
  LD, 37
  Thomas, 35
Copo e cone, 21
Copolímero, 325
Coque, 11
Coqueificação, 11
Coquilhas, 150
Coquilhadas (seções), 148
Corda de piano (aço), 131
Corrosão, 250
  intergranular, 253
  localizada, 253
  materiais resistentes, 250
Criogênicos (aços), 143
Criolita, 59
Cuba (de alto forno), 20
Cunha de coquilhamento, 148
Cupro-níquel (ligas), 184
Cura (do concreto), 310
Curva(s)
  de magnetização, 269
  em C ou TTT, 78, 81
  isotérmica, 78
para resfriamento contínuo, 84
Delta (estrutura), 69
Desgaste
  aços resistentes ao, 140
Destilação fracionária, 62
Diagrama(s)
  de equilíbrio alumínio-cobre, 192
  de equilíbrio cobre-níquel, 185
  de equilíbrio cobre-estanho, 181
  de equilíbrio cobre-zinco, 175
  de equilíbrio ferro-carbono, 67
  de transformação isotérmica, 78, 81
  para resfriamento contínuo, 84
Diamante, 248, 353
Digestão, 58
Dispersantes (no concreto), 314
Dosagem (do concreto), 309, 312
Duplex (processo), 45
Duralumínio, 199
Dureza a quente, 219
Efervescente(s) (aços), 46, 130
Elastômero, 326
Elementos de liga, 76, 120
Elétricos (materiais para fins), 268
Eletrólise
  da alumina, 58
  do zinco, 62
Enchidos (compósitos), 361
Endurecibilidade, 91
  curvas de, 92
  determinação, 92
  faixas, 92
Endurecimento
  por precipitação, 143, 189, 192

  profundidade de, 92
  secundário, 219, 227
  superficial, 103, 106
Envelhecimento artificial, 99, 158
Enxofre, 116
Epóxis, 339
Escamados (comósitos), 361
Escória, 6, 15, 27
Escovas coletoras de corrente, 287
Esferoidita, 102, 103
Esferoidização, 103
Esponja (ferro), 47
Espuma plástica, 340
Estanho, 206
  aplicações, 207
  ligas, 207
  produção, 62
Estruturas sorbíticas, 102
Estufas, 23
Eutético, 68
  ferro fundido, 68
  hipereutético, 68
  hipoeutético, 68
Eutetóide, 68
  aço, 68
  hiper, 68
  hipo, 68
Expansibilidade (do cimento), 308
Faiança, 349
Faixas de endurecibilidade, 92
Fenólicos, 338
Ferramentas (materiais), 71
Ferrita (estrutura), 71
Ferritas, 299
Ferro, 1
  comercialmente puro, 70
  dúctil, 67, 163
  gusa, 1, 17
  nodular, 67, 163
  pudlado, 4
  sinterizado, 292
Ferro-carbono (liga), 68
Ferro-gusa, 17, 27
Ferro fundido, 66
  branco, 67, 149
  cinzento, 66, 151
  dúctil, 63
  mesclado, 67
  resistente à corrosão, 157
  resistente ao calor, 158
Ferro-ligas, 16
Fibra, 326
Fibroso (compósito), 358
Filtração, 58
Filtros metálicos, 282
Finos (de minério de ferro), 9
Fio de música (aço), 131
Fios (aço para), 131
Flotação, 53, 63
Fluência, 251
Fluorocarbônicos, 336
Fluoroplásticos, 336
Folha de flandres, 128, 207
Força coerciva, 268
Forja catalã, 4
Forjado-sinterizado, 295
Forno(s),
  alto, 17
  Bessemer, 32
  LD, 37
  Siemens-Martin, 40
  fósforo, 116
  fundente, 6, 15
Gama (estrutura), 69
Ganga (de minério), 27
Gás de coqueificação, 13
Grafita, 66
  nódulos de, 161, 163
  veios de, 66
Grafíticos (aços), 140, 143
Goela (alto-forno), 20
Grão (tamanho), 91
Hadfield (aço), 140
Hastelloy, 260, 265
Hematita, 7, 8
Hiperco, 272
Hipereutético, 68
Hipernik, 273
Hipoeutético, 68
Homogeneidade da austenita, 91
Homogeneização, 188
Ílio, 261
Ímãs permanentes (materiais), 272
Inconel, 265
Incorporadores de ar (no concreto), 314
Indução (têmpera por), 103
Indução residual, 269
Infiltração metálica, 289, 295
Inoculação, 149
Inoculantes, 149
Isotática (estrutura), 327
Isotérmico (tratamento), 105
Itabirito, 8
Jato-percussão, 135

Jacutinga, 8
Jominy (ensaio), 92
Laminados (ou lamelares) (compósitos), 359
Latões, 175
  alfa, 176
  comuns, 175
  especiais, 178
  para fundição, 178
  para cartuchos, 176
  vermelho, 176
Ledeburita, 73
Ligas de alumínio, 191
  fundidas, 200
  super-resistentes, 202
  trabalhadas, 194
  tratadas termicamente, 197
  tratamento térmico das, 192
Ligas de chumbo, 205
Ligas de cobre, 173, 175
  cobre-alumínio, 187
  cobre-berílio, 187
  cobre-níquel-zinco, 186
  cobre-silício, 188
  cupro-níquel, 184
Ligas de estanho, 207
Ligas de magnésio, 213
Ligas de níquel, 260
Ligas de soldagem fraca, 207
Ligas de titânio, 215
Ligas de zinco, 209
  zamac, 209
Ligas endurecíveis por precipitação, 272
Ligas ferro-carbono, 68
Ligas ferro-carbono-silício, 74
Ligas ferro-cobalto, 272
Ligas ferro-níquel, 272
Ligas ferro-silício, 270
Ligas fundidas, 245
Ligas não-ferrosas
  resistentes à corrosão, 259
  resistentes ao calor, 263
Ligas para elementos de resistência, 266
Ligas para fundição sob pressão, 209
Ligas para mancais, 184, 206
Ligas pesadas, 281
Limonita, 7
Linhas de Luder (defeito), 130
Linhas de transformação, 70, 89
Liquação, 62
Lixiviação, 62
Madeira, 315
  anomalias, 321
  aplicações, 322
  apodrecimento, 321
  característicos físicos, 317
  característicos mecânicos, 317
  classificação, 317
  constituição, 316
  defeitos, 321
  enfermidades, 321
  preservação, 321
Magnésia (refratário), 352
Magnésio, 213
  aplicações, 214
  ligas, 213
Magnetita, 7
Magnético(s) (materiais), 268
Magnetização (curva), 269
Maleabilização, 160
  por descarbonetação, 160
  por grafitização, 161
  rápida, 162
Maleável, 160
  de núcleo branco, 160
  de núcleo preto, 161
  perlítico, 162
Mancais
  ligas para, 184, 206
  porosos autolubrificantes, 282, 283
Manganês, 116
Maraging (aços), 143
Martêmpera, 106
Martensita, 82, 100
Mate, 55
Materiais
  cerâmicos, 247, 346
  com permeabilidade constante, 272,
  compósitos, 356
  compostos, 288
  de fricção sinterizados, 290
  diamagnéticos, 268
  ferromagnéticos, 268
  magneticamente duros, 272
  magneticamente moles, 270
  magnéticos, 298
  metal-grafita, 287
  paramagnéticos, 268
  para contatos elétricos, 287
  para ferramentas e matrizes, 216
  para fins elétricos e magnéticos, 268
  plásticos, 324
  porosos, 282
  resistentes à corrosão, 250
  resistentes à oxidação, 250
  resistentes ao calor, 250
Matérias primas (da indústria siderúrgica, 1, 6
Matrizes (materiais para), 216
Metal
  Babbitt, 206
  Monel, 213, 260
  Muntz, 178
  refratário, 278
Metal duro, 231
Método de Grossmann, 92
Método de Jominy, 92
Mistura carburizante, 108
Molas (aços para), 134
Molibdênio, 280
Mumetal, 273
Muntz (metal), 178
Náilon, 335
Nióbio, 281
Níquel, 212
  aplicações, 212
  ligas, 213
  tipos, 212
Ni-resist, 157
Nitralloy (aços), 140
Nitretação, 113
  a gás, 113
  aços para, 138
  líquida, 113
Nodulização, 165
Nodular, 168
Normalização, 99, 159
Olefínicos, 331
Oxidação, 250
  materiais resistentes à, 250
Óxidos (refratários), 352
Óxidos polifenilenos, 337
Particulados (compósitos), 359
Passividade, 250
Patenteamento, 131, 134
Pega (do cimento), 306, 308
Pelota(s), 10
Pelotização, 10
Perlita, 71
  fina, 81
  grossa, 81
Permalloy, 273
Permeabilidade, 268
Permendur, 272
Perminvar, 272
Plásticos, 324
  aplicações, 331
  grupos, 328
  materiais, 324
  termoestáveis, 328, 337
  termofixos, 328, 337
  termoplásticos, 328, 331
  tipos, 331
Poeiras (coletor), 23
Policarbonatos, 335
Poliésteres, 338
Poliestirenos, 332
Polietilenos, 331
Polimerização, 325
  grau, 326
Polímero(s), 325
  propriedades, 329
Porcelana, 349
Precipitação (endurecimento por), 143
Preservativos (das madeiras), 322
Processo(s)
  ácido, 30
  básico, 30
  de fundição contínua, 51
  de redução direta, 47
  Bayer, 58
  Bessemer, 31
  duplex, 46
  elétrico, 46
  hidrometalúrgico, 60
  pirometalúrgico, 60
  pneumático, 31
  Siemens-Martin, 40
  Thomas, 35
Produtos da destilação do carvão mineral, 13
Produtos da metalurgia do pó, 277
Produtos do alto forno, 24, 27
Profundiadade de endurecimento, 92
Pseudoligas, 288
PVC, 333
Pyrex, 355
Quadrilátero ferrífero, 8
Queimadores de gás, 42
Rampa (alto-forno), 20
Rápidos (aços), 224
Reação peritética, 69
Recozimento, 96, 159, 188
  cíclico ou isotérmico, 97
  em caixa, 98
  para alívio de tensões, 97, 99
Recuperadores de calor, 42
Redução direta (processo), 47
Refinação

a fogo, 56
eletrolítica, 56
Refino (período), 40
Refratário(s)
aços, 261
comuns, 349
materiais, 250
metais, 278
Regenerador (de calor), 23, 42
Remanência, 269
Reservas de ferro, 7
Resfriamento (velocidade crítica), 91
Resina(s), 325
Retardadores (no concreto), 314
Revenido, 100
Secção (efeito da), 86
Secções coquilhadas, 148
Siemens-Martin
forno, 40
processo, 40, 43
Silício, 74, 116
ligas ferro-silício, 270
nos aços, 116
nos ferros fundidos, 74
Silicones, 340
Sindiotáticas (estruturas), 327
Sino (alto-forno), 21
Sinter, 9
Sinterização, 9, 63
Sinterizado(s)
forjado, 295
materiais, 277
Sistema(s)
de classificação dos aços, 115
Soldagem fraca (ligas), 207, 211
Solubilização, 189, 192
Sopro, 33
lateral, 37
pelo topo, 37
Sorbita, 102
Speisse, 65
Steadita, 147
Sucata, 16
Superaquecimento, 149
Supermalloy, 273
Superpolímeros, 337
Tamanho de grão, 91
Tântalo, 280
Têmpera, 100
por chama, 103
por indução, 103
superficial, 103
Temperabilidade, 91
Temperatura de transição, 143
Thomas (conversor), 35
Titânio, 214
aplicações, 214
ligas, 215
tipos, 215
Tória (refratário), 351
Trabalhabilidade (do concreto), 311
Traço (do concreto), 309
Transição (temperatura), 143
Tratamento(s)
a vapor, 293
isotérmico(s), 105
térmico(s), 96
termoquímico(s), 96, 106
Troostita, 102
Tropenas (conversor), 37
Tubos
aços para, 130
Tungstênio, 279
Ultra-resistentes (aços), 141
Uretanos, 340
Usinagem fácil (aços), 136
Ustulação, 60, 63
Vácuo (cementação sob),111
Veios de grafita, 66
Velocidade crítica de resfriamento, 91
Ventaneiras, 20
Vidro(s), 353
tipos, 354
tratamentos térmicos, 354
Vinílicos, 333
Vitrificação, 348
Wisker, 358
Zamac, 209
Zinco, 60, 208
aplicações, 208
ligas, 209
obtenção, 60
Zircônio (refratário), 352
Zona crítica, 70

DOBRE AQUI COLE

CADASTRO PARA MALA DIRETA

Favor preencher todos os campos

★ Devolvendo-nos este cadastro preenchido, você passará a receber informações dos nossos lançamentos, nas áreas que determinar. **INVISTA EM SEU FUTURO PROFISSIONAL**

NOME (não abreviar):

END. RESIDENCIAL:

CIDADE: UF: CEP: FONE:

EMPRESA: SEXO: NASCIMENTO:

F ☐ M ☐ DIA ☐☐ MÊS ☐☐

1. Cargo:
☐ 1. Digitador ☐ 2. Programador ☐ 3. Analista
☐ 4. Supervisor ☐ 5. Gerente ☐ 6. Diretor
☐ 7. Outros (especificar): _____

2. Escolaridade:
☐ 1. 1º grau ☐ 2. 2º grau ☐ 3. 3º grau

3. Eu geralmente, compro livros:
☐ 1. Em livrarias ☐ 2. Por telefone
☐ 3. Em feiras ☐ 4. Por Reembolso Postal
☐ 5. Outros (especificar): _____

4. Costumo comprar em média, a seguinte quantidade de livros por ano:
☐ 1. um ☐ 2. dois ☐ 3. cinco ☐ 4. mais

5. Estou interessado em livros das seguintes áreas:
☐ 1. Informática ☐ 2. Negócios ☐ 3. Controle da Qualidade
☐ 4. Psicologia ☐ 5. Ensino Inglês ☐ 6. Informática na Educação
☐ 7. Sociologia ☐ 8. Metodologia ☐ 9. Medicina
☐ 10. Eng. Civil ☐ 11. Eng. Mecânica ☐ 12. Eng. Elétrica/Eletrônica
☐ 13. Eng. Química ☐ 14. Física ☐ 15. Matemática
☐ 16. Outras (especificar): _____

6. Utiliza microcomputador:
☐ 1. Sim ☐ 2. Não

7. Qual?
☐ 1. PC ☐ 2. Apple ☐ 3. MSX
☐ 4. Outros (especificar): _____

8. Softwares mais utilizados:
☐ 1. Banco de Dados ☐ 2. Planilha ☐ 3. Processador Texto
☐ 4. Outros (especificar): _____

9. Linguagens:
☐ 1. C ☐ 2. Cobol ☐ 3. Assembler ☐ 4. Clipper/dBase
☐ 5. Outros(especificar): _____

Obra: Tecnologia Mecânica
Autoria: Vicente Chiaverini

Makron Books

MAKRON *Books* do Brasil Editora Ltda.
Nova denominação da
Editora McGraw-Hill Ltda.
"Padrão de Qualidade em Livros"
Rua Tabapuã, 1105 – Itaim Bibi – SP
04533-905 – Tels.: 820-6622 / 820-8528

McGraw-Hill