

VICENTE CHIAVERINI

TECNOLOGIA MECÂNICA

Materiais de Construção Mecânica

VOL. III

2ª edição



McGraw-Hill



COMPRAR

TECNOLOGIA MECÂNICA

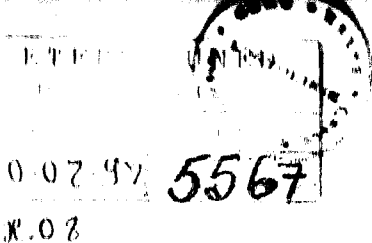
PROCESSOS DE FABRICAÇÃO E TRATAMENTO

VOLUME III

2ª edição



EDITORA AFILIADA



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

322-440
45325
revis
no 18

MAKRON Books do Brasil Editora Ltda.
Editora McGraw-Hill Ltda.
São Paulo
Rua Tubapuã, 1105, Itaim-Bibi
(011) 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

ESCOLA TECNICA FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE
Departamento de Administração
Divisão de Material e Patrimônio
SEÇÃO DE PATRIMÔNIO
Ficha 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
	VII

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 posição das linhas de transfor- mação 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. Boretção	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 grafiticos	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 resistentes 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 polifenílicos	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. Alfílicos	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.

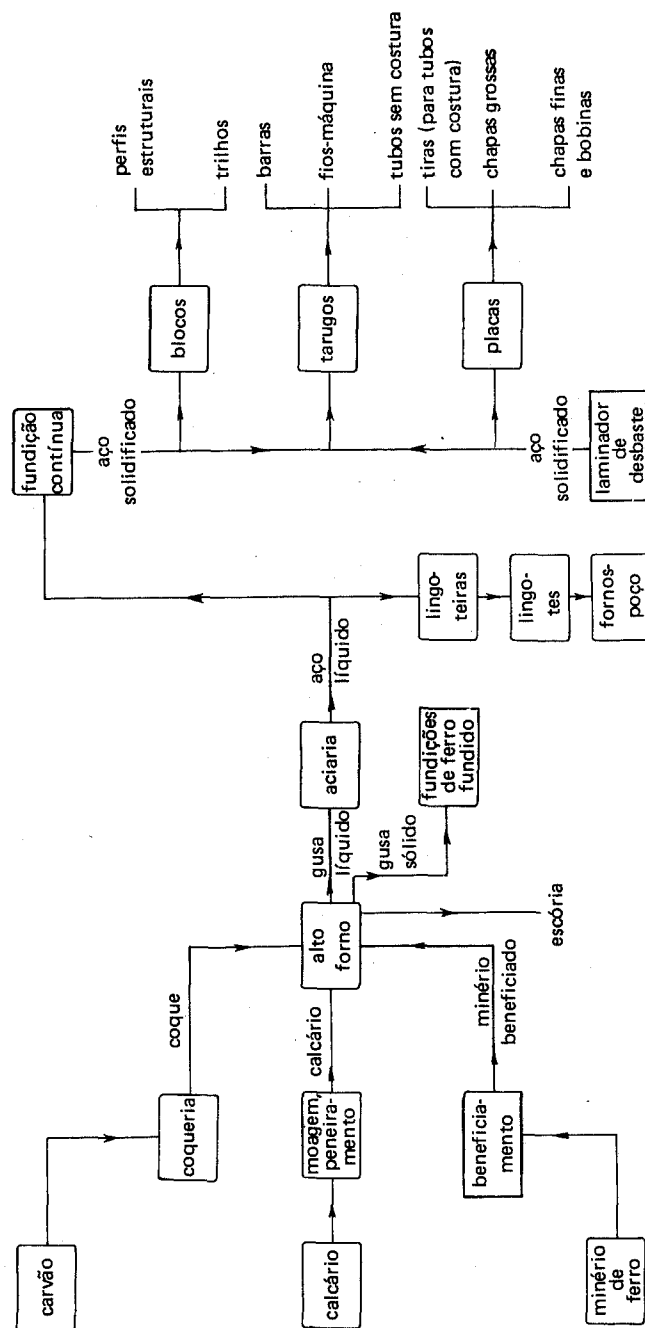
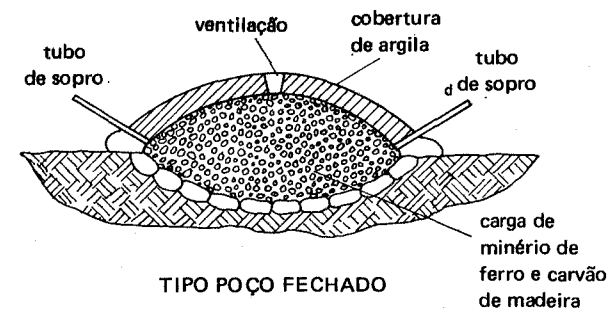
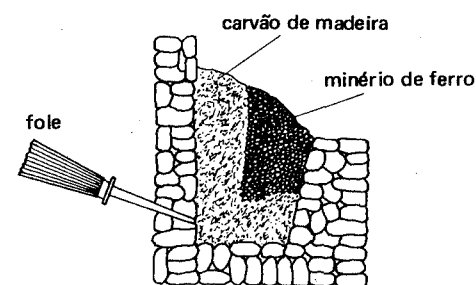


Figura 1 Representação esquemática das principais etapas de fabricação de aço pelo processo clássico de alto-forno, a partir do minério de ferro.



TIPO POÇO FECHADO



TIPO DE FORJA CATALÃ

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 Biraçoia, 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 $2\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$, 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 mato-grossenses 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 "sinter";
- 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 "sinter".

O "sinter" 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 "sinter" 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 "sinter" 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 consequência, 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 decompõe 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 (Pennsylvânico), 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 desenformadora" 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 ₂ H 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.

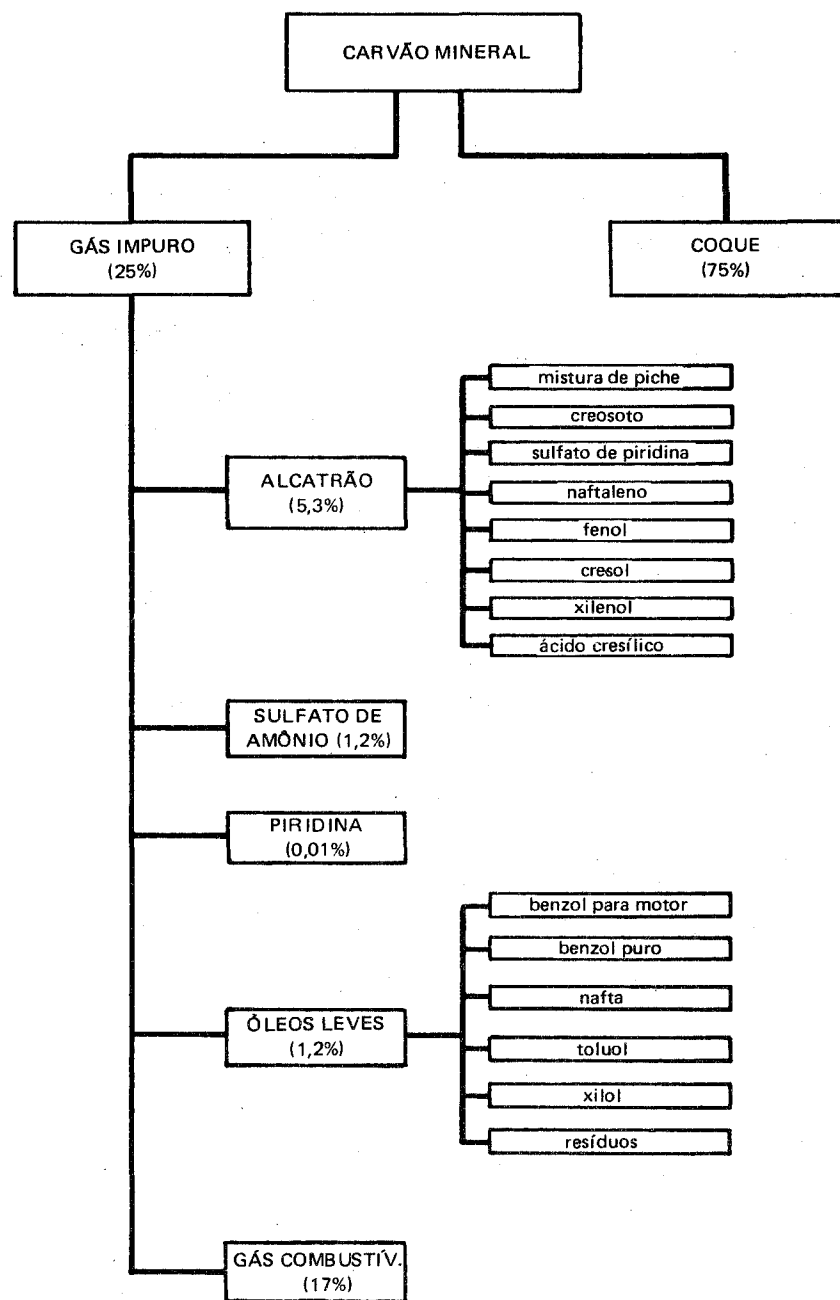


Figura 3 Principais produtos obtidos na destilação do carvão mineral.

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 $2,5 \text{ m}^3$ 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 ₂ O ₃	1,5% máx.
P	0,05% máx.
S	0,05% máx.
Fe ₂ O 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 MnO₂. 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

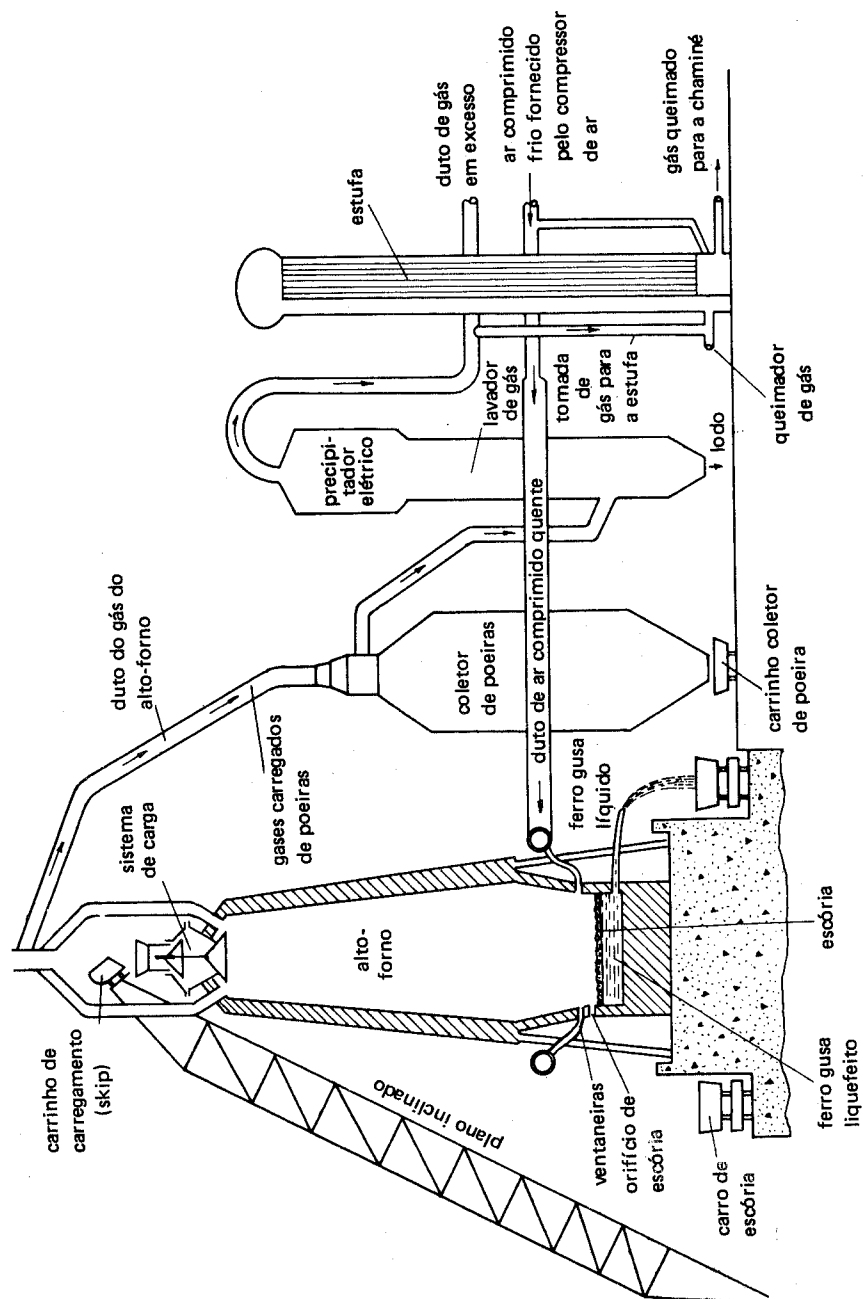


Figura 4 *Seção transversal de uma instalação de alto-formo, incluindo o equipamento auxiliar principal.*

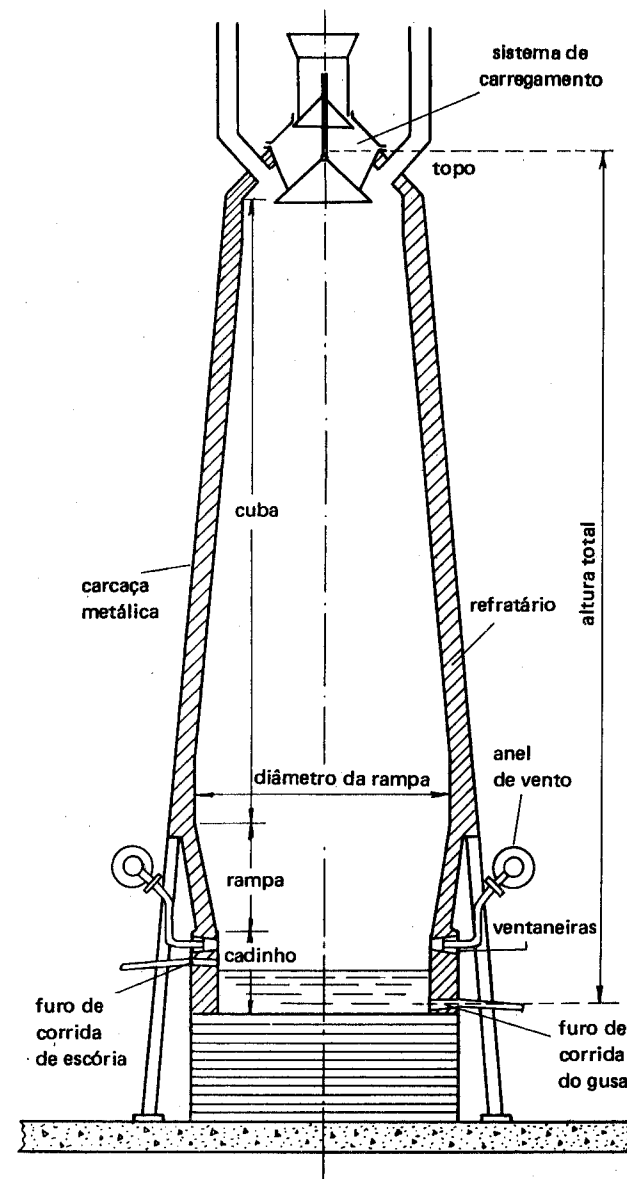


Figura 5 *Seção transversal típica de um alto-forno moderno.*

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.

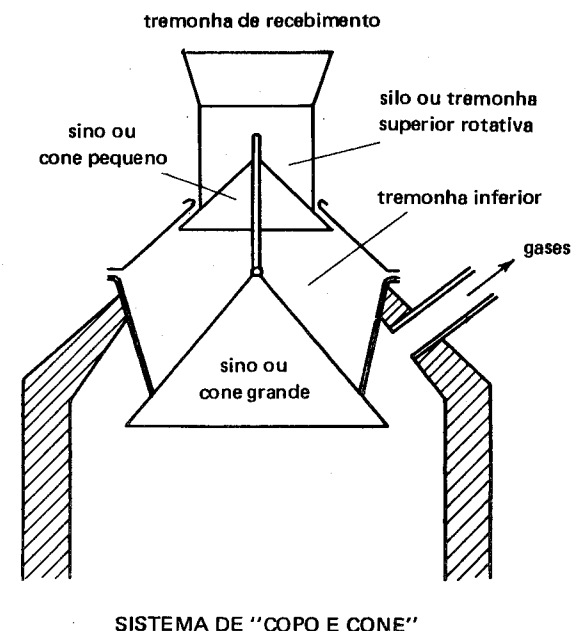
A rampa tem formato tronco-cônico; suas dimensões variam desde o diâmetro do cadinho até 10,5 m ou mais, com altura que pode superar 4 m. A rampa corresponde à zona, de certo modo, mais quente: aí a espessura do refratário é menor que a do cadinho, exigindo, em consequência, um resfriamento externo mediante 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 consequência, 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.



SISTEMA DE "COPO E CONE"

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 sinter 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.

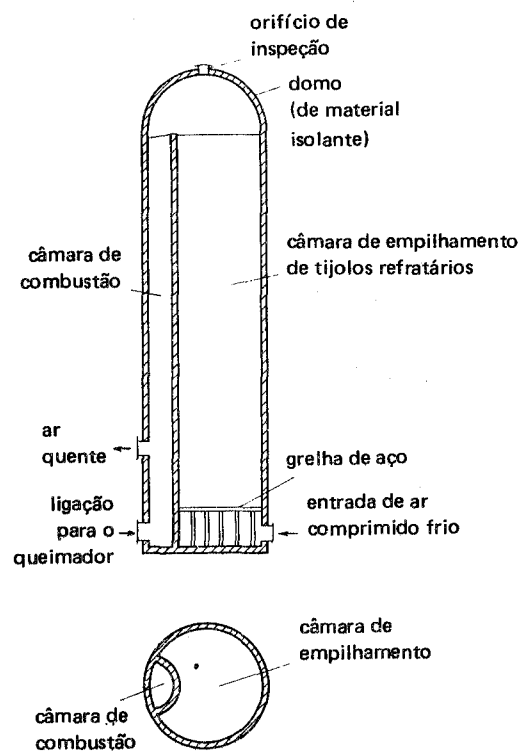


Figura 7 Representação esquemática de um regenerador de alto-forno.

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 termoeletricos, 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⁾

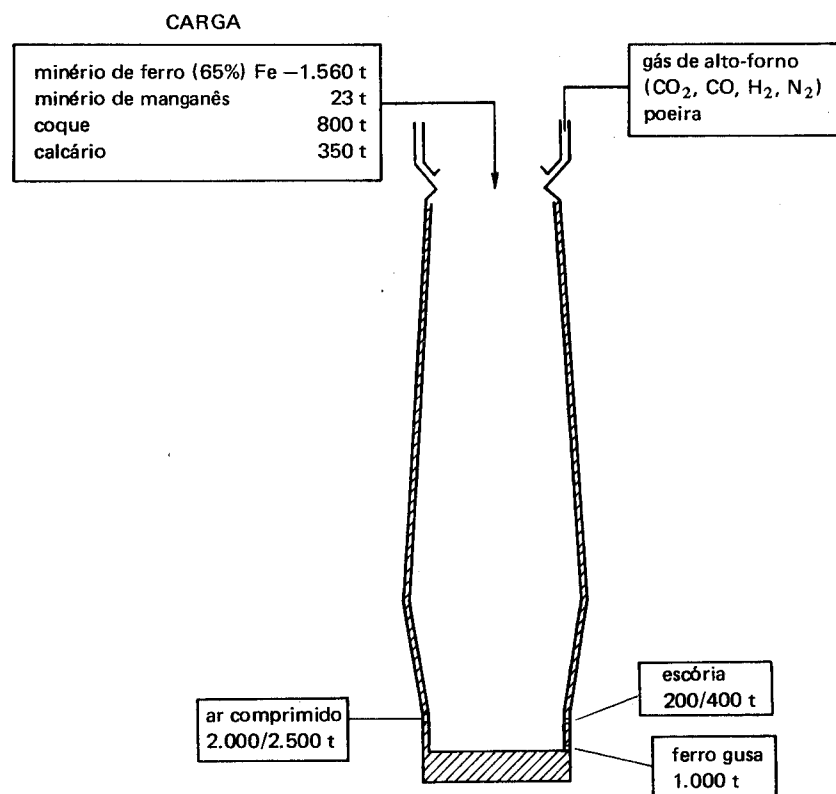


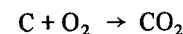
Figura 8 Carga e produtos resultantes de um alto-forno.

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 "sinter" 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 m³/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⁾

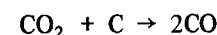
Num alto-forno, existem duas correntes de materiais responsáveis pelas reações que se verificam: uma corrente sólida, representada pela carga que desce paulatinamente e uma corrente gasosa que se origina pela reação do carbono do carvão com o oxigênio do ar soprado pelas ventaneiras, que sobe em contracorrente.

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



originando-se grande quantidade de calor.

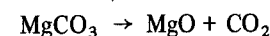
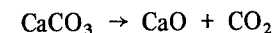
Esse CO₂, ao entrar em contato com o coque incandescente, decompõe-se:



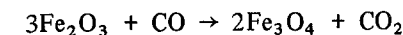
O CO originado é o elemento redutor.

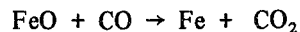
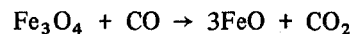
A carga introduzida pelo topo, ao entrar em contato com a corrente gasosa ascendente, sofre uma secagem, inicialmente, pela remoção da água higroscópica e, a seguir, remoção da água de hidratação, remoção essa que se completa somente por volta de 500°C.

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

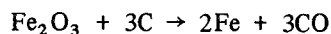


Além de CO como agente redutor, o próprio carbono do carvão atua nesse sentido. As reações são as seguintes:





ou



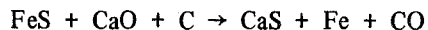
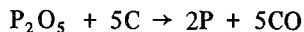
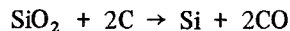
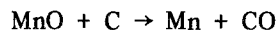
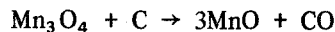
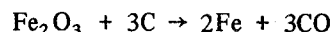
Uma parte do óxido de ferro chega à zona de fusão sem sofrer redução, incorporando-se à escória.

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

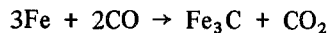
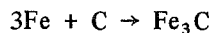
Na região que corresponde ao topo da rampa, inicia-se a formação da escória, pela combinação da cal (CaO) com a ganga (impurezas do minério de ferro) e uma certa quantidade de óxido de ferro e manganês.

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.



Finalmente, as últimas reações fundamentais são representadas pelas equações



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: $\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$, $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$, $\text{FeO} \cdot \text{SiO}_2$, $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$, $\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$, $\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ 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 ₂ O 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 “sinter” 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 H₂, 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 consequência, 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.

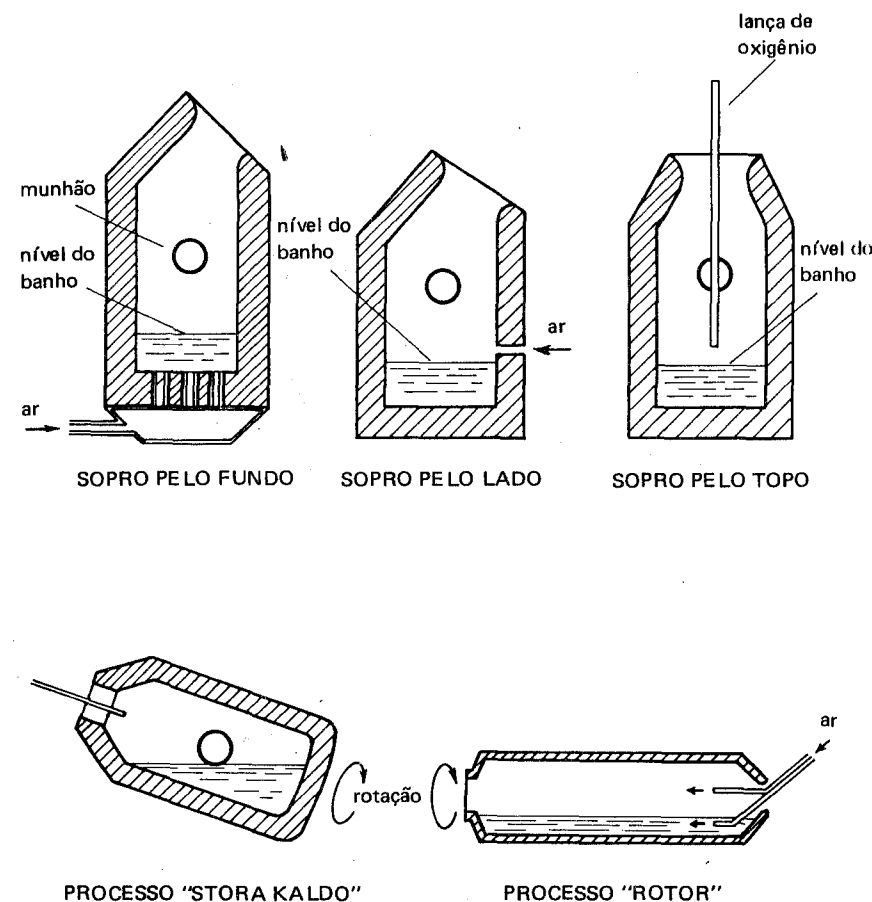


Figura 9 Processos pneumáticos para produção de aço, a partir de ferro gusa.

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;

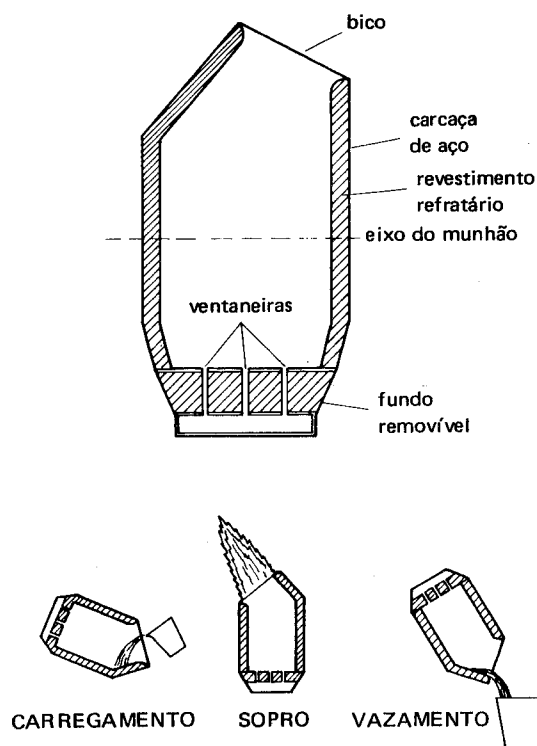


Figura 10 Seção transversal esquemática de um conversor Bessemer. A parte inferior da figura mostra as três posições típicas do conversor no decorrer da operação.

○ 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.

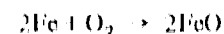
O teor de carbono do gusa se situa entre 4,0 e 4,5%.

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”.

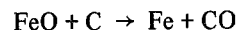
Inicia-se a entrada de ar, ao mesmo tempo em que o aparelho é colocado paulatinamente na posição vertical, posição em que permanece até que a operação de oxidação se complete.

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 do baixo ponto de fusão, à base de silicatos de Fe e Mn.

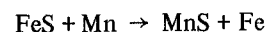
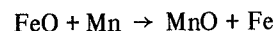
A rigor, as primeiras reações de oxidação verificadas são as seguintes:



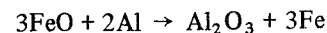
À medida que o sopro continua, depois de cerca de 4 minutos, a chama começa a alongar-se e tornar-se brilhante e se inicia o período de oxidação do carbono:



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:



ou



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

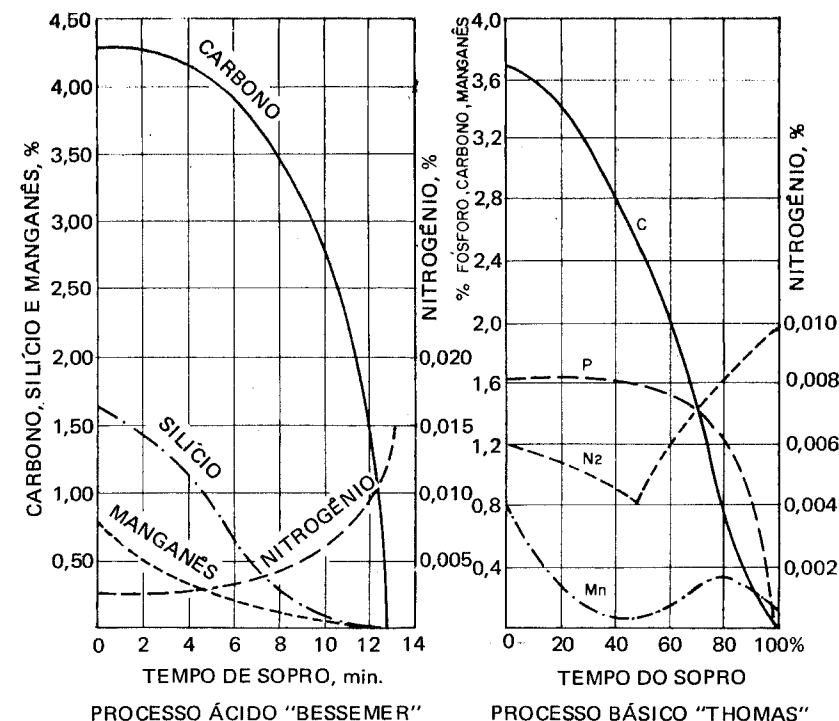


Figura 11 Representação gráfica das modificações de composição química do metal que ocorrem durante a operação dos conversores tipos Bessemer e Thomas.

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. Frequentemente, 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, frequentemente 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 oxygen process” ou “processo básico a oxigênio”.

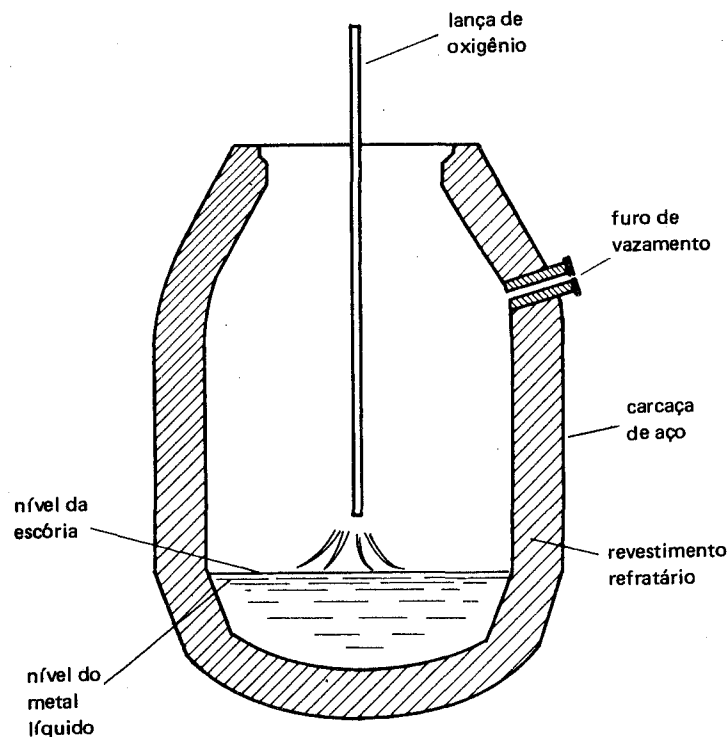


Figura 12 Seção transversal esquemática de um conversor utilizando insuflação de oxigênio pelo topo.

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/mm² e 0,13 kgf/mm².

O mecanismo de eliminação do carbono consiste na sua oxidação na forma de CO e CO₂.

O silício é oxidado na forma de SiO₂, 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 P₂O₅ 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 regulação 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.

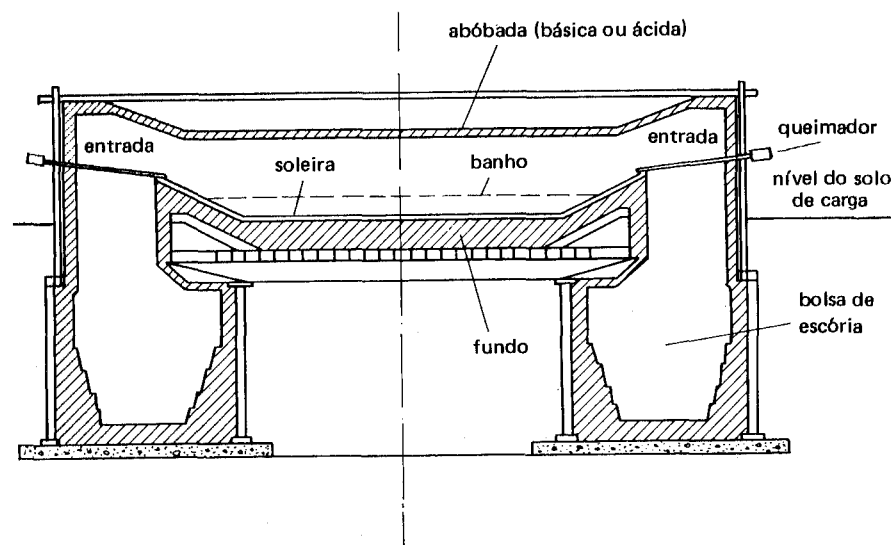


Figura 13 Seção longitudinal esquemática de um forno “Siemens-Martin” aquecido por combustível líquido.

— 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 respectiva-

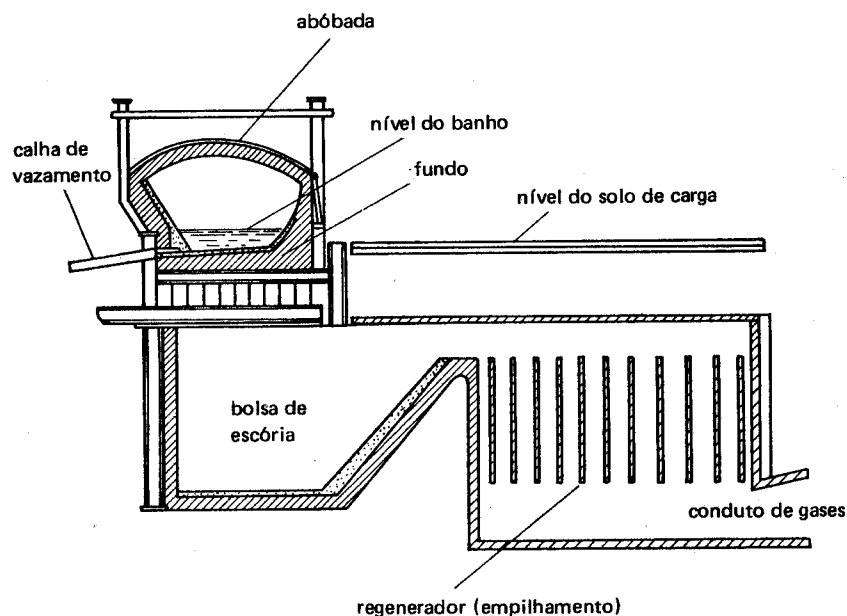


Figura 14 Seção transversal esquemática de um forno “Siemens-Martin”.

mente — 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.

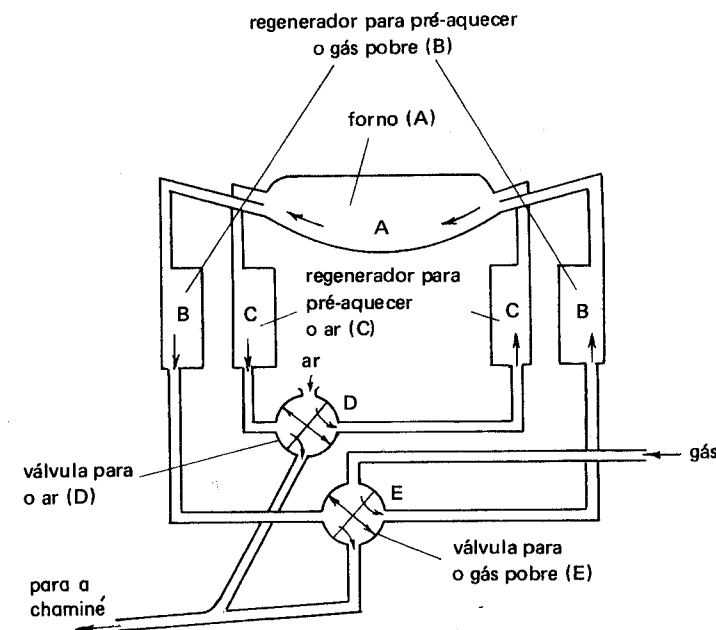


Figura 15 Representação em diagrama da circulação de gases num forno “Siemens-Martin”.

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.

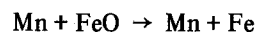
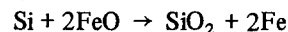
O carregamento da carga sólida é feito por máquinas de carregar de construção especial, que podem locomover-se paralelamente e perpendicularmente em relação à área de carga do forno. Essas máquinas são dotadas de um dispositivo, denominado “arfete”, que se desloca verticalmente e pode girar 360° e ao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

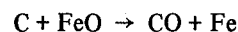
Logo após a adição do gusa líquido, iniciam-se as importantes reações de oxidação, pela ação dos óxidos de ferro do minério e da sucata.

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



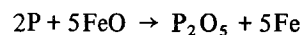
O SiO_2 e o MnO incorporam-se à escória. Os teores residuais de Si e Mn, no final da corrida, são respectivamente 0,01% Si e 0,10 a 0,25% Mn.

O carbono é oxidado a seguir:



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

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



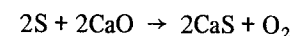
O P_2O_5 formado combina-se com a cal livre para formar fosfatos de cálcio, e se incorpora à escória.

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:



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 frequentemente 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.

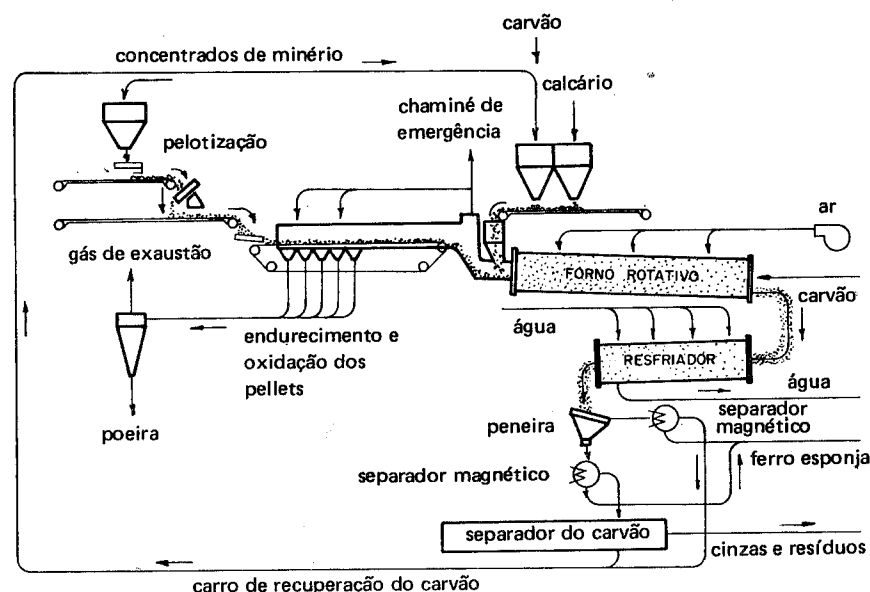


Figura 16 Representação esquemática do processo SL/RN de redução direta.

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, “sinter” ou “pelotas”.

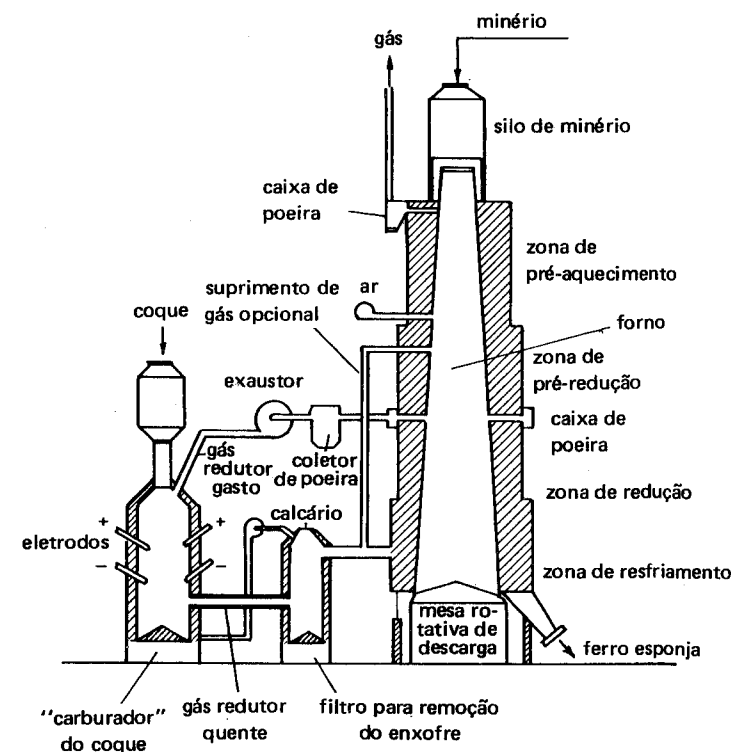


Figura 17 Seção transversal esquemática indicativa do princípio operacional do processo Wiberg-Soderfors.

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.

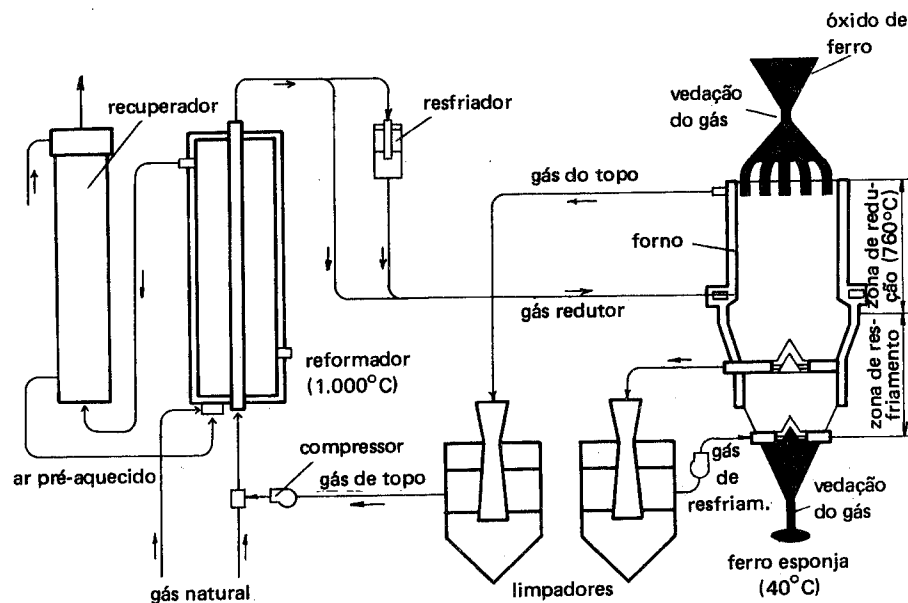


Figura 18 Representação esquemática do processo Midrex.

6 — Processo HyL Desenvolvido no México. O combustível resulta de gás natural misturado com vapor. A mistura é "re-formada", originando CO e H₂, 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.

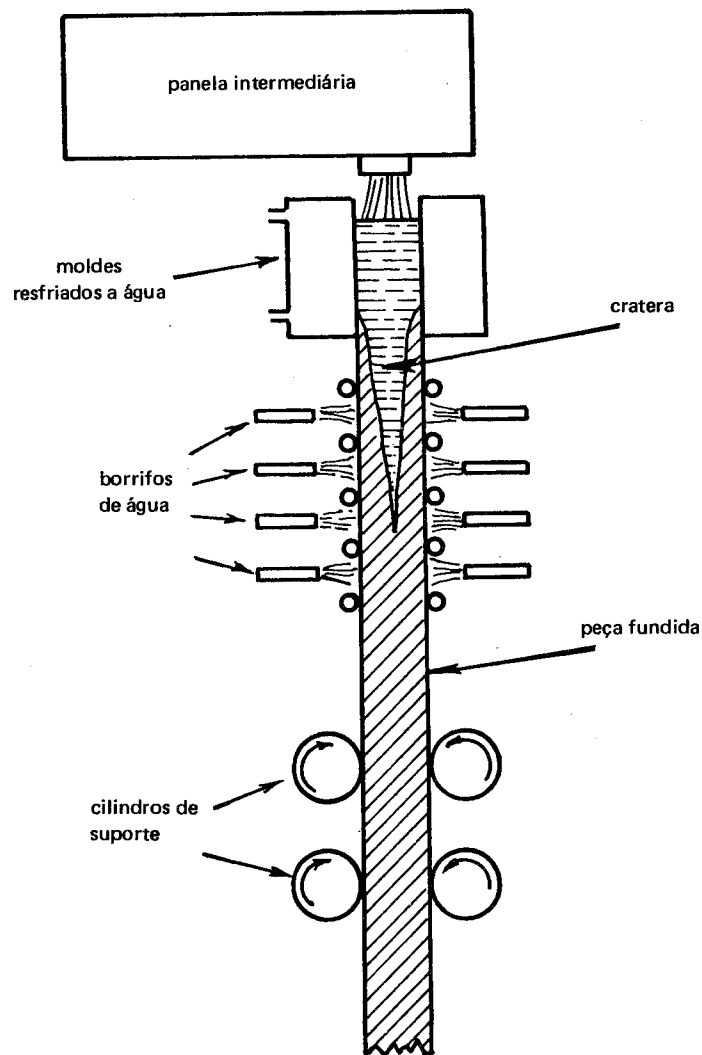


Figura 19 Representação esquemática da fundição contínua

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.