

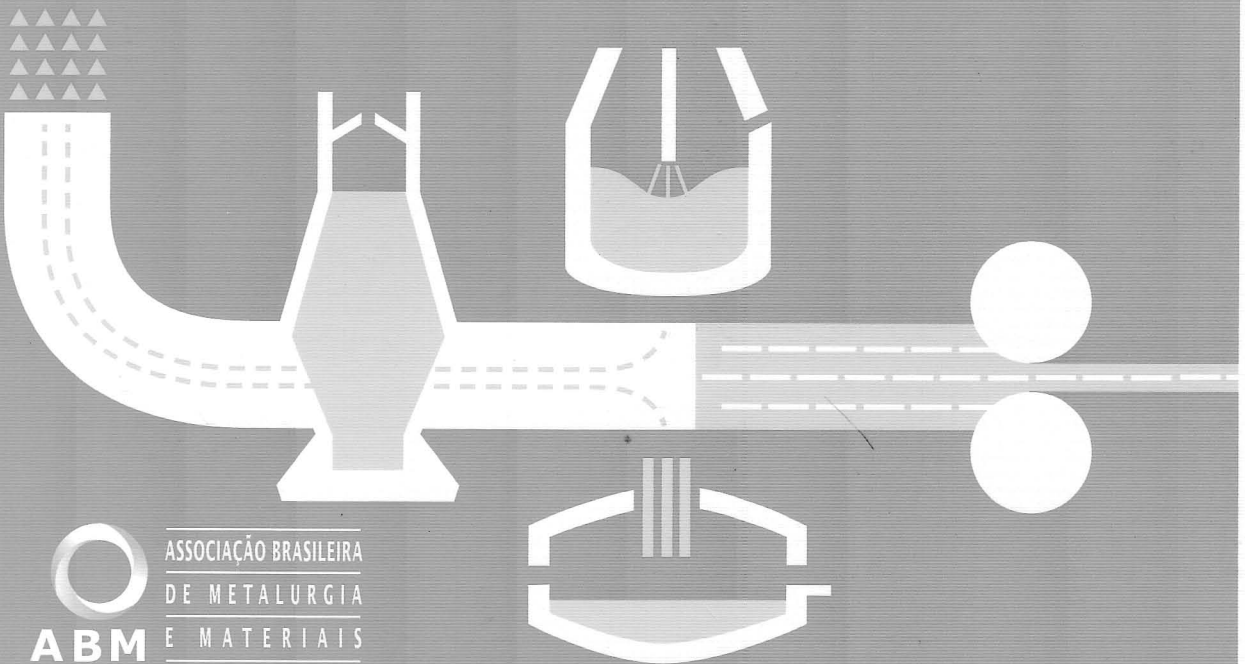
02

COLEÇÃO METALURGIA E MATERIAIS
OBRA DE DIFUSÃO



Marcelo Breda Mourão | Akira Yokoji | Antonio Malynowsky | César Alves da Silva Leandro
Cyro Takano | Eduardo Emery Cunha Quites | Erberto Francisco Gentile | Guilherme F. B. Lenz e Silva
José Roberto Bolota | Marcelo Gonçalves | Rubens José Faco

Introdução à Siderurgia



ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA
DE METALURGIA
E MATERIAIS

Introdução a Siderurgia

Marcelo Breda Mourão (Coordenador)
Akira Yokoji
Antonio Malynowskyj
César Alves da Silva Leandro
Cyro Takano
Eduardo Emery Cunha Quites
Erberto Francisco Gentile
Guilherme F. B. Lenz e Silva
José Roberto Bolota
Marcelo Gonçalves
Rubens José Faco

São Paulo
2007

Ficha Catalográfica/ Cataloguing Card

Mourão, Marcelo Breda (coord.)

Introdução a siderurgia / Marcelo Breda Mourão (coordenador). / São paulo:
Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2007.

428 p.

Vários autores

ISBN 85-7737-015-1

1. Siderurgia. 2. Metalurgia. I Título

CDD 669.142

índice para Catálogo Sistemático

1.. Siderurgia	669.142
2.. Metalurgia : Processos	669

Direitos exclusivos desta edição reservados a

Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais

Rua Antonio Comparato, 218 – Campo Belo

04605-030 – São Paulo – SP

[http:// www.abmbrasil.com.br](http://www.abmbrasil.com.br)

Proibida a reprodução, mesmo que parcial e por qualquer processo, sem autorização
Expressa da Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais – **ABM**



Apresentação

O presente livro dá seqüência a projeto da Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais – ABM intitulado "Coleção de Livros Metalurgia e Materiais" cujo intuito é o de divulgar o conhecimento científico e tecnológico na área, missão precípua da associação. A "Coleção" se desdobra em quatro frentes distintas, a saber: "Livros de Atualização", "Livros de Referência", "Obras de Difusão" e "Livros-Textos". A intenção, sem dúvida, é o de estimular a produção de textos técnicos atendendo a demanda de nosso meio e da sociedade, de um modo geral, por livros na língua Portuguesa e com qualidade comparável ao existente nos melhores centros metalúrgicos do exterior. A edição desses volumes fica a cargo de um corpo editorial em que se mesclam experiências advindas dos setores industrial e acadêmico, ressonando o espírito de associação característico da ABM, nesses mais de sessenta anos de existência. O processo de seleção dos livros a serem editados se inicia com o atendimento a editais públicos divulgados pela ABM anualmente, seguindo-se, então, o estudo técnico das propostas. Trata-se de procedimento já estabelecido em várias instâncias do mundo editorial e que vem se consolidando ano a ano dentro da associação.

O presente livro, intitulado *Introdução a Siderurgia* é o segundo lançado dentro da iniciativa descrita. Trata-se de um texto que traduz anseios de larga parte da comunidade mínero-mecânica-metalúrgica, de contar com um trabalho que apresentasse os processos dessa indústria. Os capítulos varrem todos os processos relevantes a indústria do aço, desde a matéria-prima até o processamento de resíduos, passando, é claro, pelos processos de fabricação do aço líquido e da conformação do aço sólido. Os capítulos seguem uma ordem similar a encontrada na linha de produção, mesmo processos complexos e termos e conceitos relativamente intrincados são expostos de uma maneira simples e de fácil leitura, sem, é claro, perder a precisão e o rigor exigidos.

Ademais, a obra tem, na opinião desta Editoria, a virtude de reunir, num único exemplar, um grupo amplo de especialistas, o que o torna ainda mais interessante, pois esta resulta do trabalho de equipe multidisciplinar.

A ABM e o Conselho Editorial da "Coleção de Livros Metalurgia e Materiais" trazem a público, portanto, a presente obra, agradecendo a todos que direta ou indiretamente participaram desta iniciativa e, sem dúvida alguma, ao empenho, zelo e dedicação dos diversos autores e ao coordenador do projeto. Temos a certeza de que os leitores apreciarão o texto, tendo, ainda, uma leitura agradável, interessante e sobretudo prazerosa.

Professor Ronaldo A N M Barbosa
Editor da Série Obras de Difusão

Prefácio

Os últimos anos têm sido especialmente interessantes para a siderurgia mundial, que atravessa um ciclo de grande expansão e consolidação, previsto para durar ainda bom tempo. No Brasil, a situação não é diferente: novos projetos estão se tornando realidade, a expansão de plantas existentes continua, e a internacionalização se acelera.

O que torna o processo siderúrgico único entre aqueles de extração e obtenção de metais é o fato de seu sucesso ser extremamente dependente do processo em si, ao contrário daqueles em que o valor intrínseco do metal é mais determinante. Assim, todas as diversas etapas do processo de obtenção de ferro e aço devem ser realizadas em condições otimizadas sob risco de inviabilizar todo o negócio. Neste contexto, existe um grande interesse de estudantes e profissionais em obter uma visão geral do processo siderúrgico em todas as suas etapas, de como cada uma destas relaciona-se com o resultado final, e de seus impactos econômicos, sociais e ambientais.

Atenta a esta necessidade, a Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais oferece semestralmente um curso de curta duração, *Siderurgia para não Siderurgistas*, que apresenta de forma sucinta porém completa as etapas do processo siderúrgico desde as matérias primas até os produtos finais. A grande aceitação deste curso estimulou a equipe de professores a transformar o conteúdo do mesmo em livro, disponibilizando assim o conjunto de informações para um público mais amplo, dentro do espírito de nossa Associação.

Os autores agradecem a Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais na pessoa de seu diretor executivo Horacídio Leal Barbosa; aos editores Nelson Guedes de Alcântara e Ronaldo Barbosa; aos responsáveis pelos cursos, na pessoa de Bruno Luiz Sigolo; e ao staff da ABM, em especial a Vera Rodrigues e Cristina Fleury P. Leitão. Agradecem ainda ao Prof. Eduardo C.O. Pinto por valiosas sugestões e aos diversos alunos que cursaram Siderurgia para não Siderurgistas e deram o tom desta publicação.

Marcelo Breda Mourão

Março de 2007

Sumário

Capítulo 1 – Visão Geral do Processo Siderúrgico	1
1.1 Histórico dos Processos de Obtenção de Ferro e Aço	1
1.2 O Processo Siderúrgico	14
Referências	19
Bibliografia	20
Capítulo 2 – Processos de Preparação de Matérias-primas Siderúrgicas	21
2.1 As Matérias-Primas nos Processos Siderúrgicos Integrados e Semi-Integrados	21
2.2 Principais Impurezas Provenientes das Matérias-primas e Insumo	22
2.2.1 Minérios, aglomerados, combustíveis e redutores	22
2.2.2 Fluxantes, escorificantes e fundentes	23
2.2.3 Sucatas	24
2.2.4 Desoxidantes, dessulfurantes, ferros-liga e outras adições finais	25
2.2.5 Impurezas provenientes de outros insumos	26
2.3 Características Físicas Desejáveis das Matérias-primas	27
2.3.1 Granulometria	27
2.3.2 Densidades aparente e real	28
2.3.3 Área superficial	29
2.3.4 Tensão superficial / Molhabilidade	29
2.4 Características Estruturais	29
2.5 Características Químicas e Mineralógicas	30
2.6 As Propriedades Desejadas das Matérias-primas e os seus Ensaios	30
2.6.1 Propriedades a frio	30
2.6.2 Propriedades a quente	31
2.7 Os Processos de Preparação das Matérias-primas	33
2.7.1 Os tratamentos de minérios	33
2.7.2 Secagem	33
2.7.3 Calcinação	35
2.7.4 Aglomeração	38
2.7.5 Coqueificação	50
2.8 Resumo	53
Referências	53

Capítulo 3 _ Redução de Minério de Ferro em Altos-Fornos	55
3.1 Descrição do Processo	55
3.1.1 Descrição do equipamento	56
3.1.2 O corpo principal do alto-forno	59
3.1.3 Descrição das zonas internas do alto-forno	63
3.1.4 Avaliação da performance do alto-forno	66
3.2 Princípio de Funcionamento do Alto-Forno	69
3.2.1 Carregamento do alto-forno	69
3.2.2 Distribuição de carga no alto-forno	71
3.2.3 Perfil térmico do alto-forno	73
3.2.4 A refrigeração do alto-forno	74
3.2.5 Os regeneradores do alto-forno	76
3.2.6 A limpeza de gases do alto-forno	78
3.2.7 A operação do alto-forno	79
3.2.8 A drenagem dos produtos do alto-forno	82
3.3 Principais Reações no Interior do Alto-Forno	85
3.3.1 Zona de combustão	85
3.3.2 Reações de redução	87
3.3.3 Reações de Incorporação dos elementos de liga	91
3.4 Injeção de Carvão Pulverizado em Altos-Fornos	94
3.4.1 Efeito da injeção de carvão pulverizado na operação do alto-forno	94
3.4.2 Vantagens da injeção de carvão pulverizado no alto-forno	96
3.5 A Produtividade dos Altos-Fornos	99
Referências	101
Bibliografia	101

Capítulo 4 _ Redução de Minérios de Ferro por Radiação Direta e Processos Alternativos

4.1 Processos de Redução Direta de Minérios de Ferro	104
4.1.1 Conceituação	104
4.1.2 Processos a carvão	105
4.1.3 Processos a reductor gasoso	107

4.2	Processos de Fusão-Redução (<i>Smelting-Reduction Processes</i>)	112
4.2.1	Conceituação	112
4.2.2	Processo Corex	112
4.2.3	Processos de fusão-redução em banho líquido	114
4.3	Processos de Auto-Redução	117
4.3.1	Conceituação	117
4.3.2	Processos de auto-redução em fornos de cuba	118
4.3.3	Processos de auto-redução em fornos de soleira rotativa	119
4.3.4	Processos que empregam misturas não aglomeradas de carvão e minério de ferro	121
4.4	Comparação entre os Diversos Processos	122
	Referências	123
	Bibliografia	124

Capítulo 5 – Fabricação de Aço Líquido em Conversar a Oxigenio 125

5.1	O que é o Aço?	125
5.2	Processo de Obtenção do Aço Líquido	125
5.2.1	Um pouco de história	125
5.2.2	Produção de aço líquido por tipo de processo	128
5.2.3	Tipos de aço	129
5.3	Fabricação de Aços Planos ao Carbono	130
5.3.1	O processo LD e suas variantes	130
5.3.2	O Processo LD e suas matérias-primas	133
5.4	Processo LD - A Operação do Conversor	137
5.4.1	A macro visão de uma aciaria LD	137
5.4.2	O ciclo operacional de um conversor LD	137
5.5	Processo LD - Capacidade Produtiva de uma Aciaria LD	141
5.6	Processo LD - Controle Operacional	144
5.7	Tipos de Aços Produzidos	145
5.8	Equipamentos Principais	146
5.8.1	Carcaça do conversor	148
5.8.2	Lança de oxigênio	149
5.8.3	Refratários	150

5.9	Processo de Refino Primário: Teoria do processo LD	150
5.9.1	Reações de refino	150
5.9.2	Processos mecânicos ligados ao sopro	155
5.9.3	Formação da escória e evolução de sua composição	156
5.10	Processo de Metalurgia de Panela Primário - A Desoxidação	157
5.11	Pré-tratamento do Gusa	158
5.11.1	Dessiliciação do gusa líquido	158
5.11.2	Desfosforação do gusa líquido	158
5.11.3	Dessulfuração do gusa	159
	Referências	160
	Bibliografia	161

Capítulo 6 – Fabricação de Aço em Fornos Elétricos a Arco

6.1	Alguns Aspectos sobre Fornos Elétricos a Arco	169
6.1.1	Histórico	169
6.1.2	Crescimento do forno a arco na siderurgia	169
6.1.3	Produção via forno elétrico a arco	170
6.2	Componentes dos Fornos Elétricos a Arco	171
6.2.1	A carcaça	171
6.2.2	Abóbada	171
6.2.3	Sistema de basculamento	172
6.2.4	Painéis refrigerados	173
6.2.5	Transformadores e eletrodos	174
6.2.6	Sistema hidráulico dos fornos	175
6.3	Custos Relativos na Operação dos Fornos Elétricos a Arco	176
6.4	Ciclo de Operação de um Forno Elétrico a Arco	176
6.5	Produtividade	178
6.5.1	Principais fatores que afetam a produtividade	173
6.5.2	Energia química	181
6.5.3	Redução no consumo de energia	182
6.6	Processo de Fabricação de Aço nos Fornos Elétricos	183
6.7	Projetos de Fornos Elétricos de Alta Produtividade	185
	Referências	187

Capítulo 7 – Refino Secundário de Aços	189
7.1 A Panela	190
7.1.1 Refratário de panela	190
7.1.2 Agitação do aço na panela	190
7.1.3 Saída do aço da Panela	193
7.2 A Escória	193
7.3 Controle de Temperatura Durante o Refino Secundário	194
7.4 Equilíbrio Químico Escória x Aço Líquido	494
7.5 Ferro Ligas e Acerto de Composição Química	196
7.6 Desoxidação	198
7.7 Descarburagem	199
7.8 Desfosforagem	199
7.9 Dessulfuração	200
7.10 Desgaseificação	201
7.11 Controle de Morfologia de Inclusões	202
7.12 Instalações para Refino Secundário do Aço	203
7.12.1 Forno panela	203
7.12.2 Tanque de vácuo	203
7.12.3 SEA-SKF	205
7.12.4 VAD	206
7.12.5 VOD	208
7.12.6 AOD	209
7.12.7 DH	210
7.12.8 RH	211
7.12.9 CAS-OB	213
7.12.10 IR-UT	214
Referências	215
Capítulo 8 – Lingotamento Contínuo do Aço	217
8.1 Tipos de Máquina de Lingotamento Contínuo	219
8.2 Descrição do Processo de Lingotamento Contínuo	221
8.3 Principais Componentes que Integram uma Máquina de Lingotamento Contínuo	223

8.3.1	Torre de panela	223
8.3.2	Panela	224
8.3.3	Distribuidor	225
8.3.4	Dispositivos de proteção do aço líquido	228
8.3.5	Molde	230
8.3.6	Sistema suporte do veio	237
8.3.7	Sistema de resfriamento secundário	239
8.3.8	Pontos de empeno e desempenho da máquina	241
8.3.9	Máquina de corte	242
8.3.10	Barra falsa	243
8.3.11	Equipamentos complementares de uma máquina de lingotamento contínuo	243
8.4	Iniciando a Operação de uma Máquina de Lingotamento Contínuo	244
8.4.1	Introdução da barra falsa	244
8.4.2	Selando a cabeça da barra falsa	244
8.4.3	Iniciando o lingotamento	245
8.4.4	A extração do veio	246
8.5	Lingotamento de Aços Diferentes	247
8.6	Qualidade dos Produtos Gerados no Lingotamento Contínuo	248
8.7	Tecnologias Emergentes no Lingotamento Contínuo	251
8.7.1	<i>Thin-slabcasting</i>	251
8.7.2	<i>Strip-Casting</i>	251
	Referências	253
Capítulo 9 – Refratários para Siderurgia		257
9.1	Evolução Tecnológica	258
9.2	Classificações dos Produtos Refratários	259
9.3	Sistemas Refratários e suas Principais Matérias-Primas	261
9.4	Processamento dos Materiais Refratários	262
9.5	Propriedades Gerais	264
9.5.1	Densidade	264
9.5.2	Porosidade	265
9.5.3	Módulo de elasticidade (Módulo de Young)	265
9.5.4	Refratariedade	266
9.5.5	Resistência a abrasão e a erosão	267

9.5.6	Resistência mecânica (compressão e flexão)	267
9.5.7	Resistência mecânica sob carga em elevada temperatura – (Creep)	268
9.5.8	Resistência a oxidação (refratários contendo carbono)	269
9.5.9	Resistência a corrosão por fundentes e escórias	270
9.5.10	Resistência ao choque térmico	271
9.5.11	Expansão térmica e dilatação térmica reversível	272
9.5.12	Condutividade térmica	273
9.5.13	Outras propriedades	274
9.6	Classes de Refratários	275
9.6.1	Refratários ácidos a base de sílica	275
9.6.2	Refratários sílico-aluminosos, aluminosos e de alta alumina	276
9.6.3	Refratários a base de aluminatos de cálcio (calcium aluminate Cements – CAC's)	278
9.6.4	Refratários magnesianos	282
9.6.5	Refratários dolomíticos	285
9.6.6	Refratários cromíticos, magnesianos-cromíticos, cromíticos-magnesianos e espinélios	287
9.6.7	Refratários contendo carbono (sistemas: óxido + grafite + metal)	290
9.6.8	Refratários especiais	294
9.7	Engenharia e Aplicação de Refratários	295
9.7.1	Principais ferramentas utilizadas no desenvolvimento e no aprimoramento dos produtos refratários	296
9.7.2	Estudo post-mortem dos produtos refratários	296
9.7.3	Exemplos de aplicações e principais usos dos materiais refratários em Siderurgia	297
	Referências	301
Capítulo 10 – Laminação de Produtos Planos e Não-Planos		309
10.1	Conceitos Básicos de Laminação	309
10.1.1	Laminação a quente	310
10.1.2	Laminação a frio	311
10.2	Laminadores	311
10.3	Cilindros de Laminação	315
10.4	Descrição do Processo de Laminação	318
10.4.1	Laminação a quente de blocos e placas	318

10.4.2	Laminação a quente de chapas finas	321
10.4.3	Laminação a frio de chapas finas	324
10.4.4	Controle do processo de laminação	328
10.4.5	Esquema de passes de laminação	329
10.5	Produtos Laminados	331
10.5.1	Classificação dos produtos laminados	331
10.5.2	Propriedades de produtos laminados	333
10.6	Manipulação e Acabamento de Produtos Planos	334
10.6.1	Manuseio de bobinas	334
10.6.2	Acabamento de chapas finas	335
10.6.3	Linhas de tesouras	339
10.6.4	Linhas de tesouras para corte transversal	341
10.6.5	Aplainamento	345
10.7	Tratamentos Térmicos dos Produtos Planos	347
10.7.1	Normalização	347
10.7.2	Recozimento: generalidades	348
10.7.3	Recozimento em caixa ou batelada	349
10.7.4	Recozimento contínuo	352
10.8	Laminação de Encruamento (<i>Skin Pass</i>)	355
10.8.1	Generalidades	355
10.8.2	Laminadores de encruamento de chapas finas	357
	Referências	358
Capítulo 11 – Siderurgia e Meio Ambiente		359
11.1	Meio Ambiente: Conceitos Básicos. Biodiversidade e Qualidade de Vida	361
11.1.1	Meio ambiente	361
11.1.2	Biodiversidade	361
11.1.3	Ciclo biogeoquímico	362
11.1.4	Conceito de qualidade de vida	362
11.1.5	O trabalho da natureza para a sustentabilidade da vida na Terra	363
11.2	Questões Globais	363
11.2.1	O efeito estufa	364
11.2.2	Chuvas ácidas	368
11.2.3	Poluição hídrica e o ciclo da água	370
11.2.4	Poluição do solo e resíduos industriais	372
11.2.5	Energia e desenvolvimento	373

11.3	Gestão Ambiental e Desenvolvimento Sustentado	375
11.3.1	Cronologia da conscientização ambiental	376
11.3.2	Desenvolvimento sustentável	377
11.3.3	Gestão ambiental	377
11.3.4	Série ISO 14000	378
11.3.5	Análise do Ciclo de Vida – LCA	379
11.3.6	Tecnologias limpas	380
11.4	A Siderurgia em Foco	381
11.4.1	Aço, um produto ecológico?	383
11.5	Resíduos Siderúrgicos – Geração e Tratamento: A Busca de Alternativas	383
11.5.1	Resíduos siderúrgicos e reciclagem	383
11.5.2	Escórias siderúrgicas: alto-fornos e aciarias	385
11.5.3	Refratários	386
11.5.4	Sucatas	387
-11.6	Introdução ao Direito e Legislação Ambiental	388
11.6.1	Legislação ambiental e a constituição brasileira	388
11.6.2	A política nacional de meio ambiente	390
11.6.3	Recursos hídricos	390
11.6.4	Águas subterrâneas	391
11.6.5	Poluição do ar	391
11.6.6	Resíduos sólidos	392
11.6.7	Poluição das águas	393
11.6.8	Licenciamento ambiental	393
	Referências	395
	Bibliografia	398
 Capítulo 12 – Produtos Siderúrgicos		401
12.1	Produtos Plano	403
12.2	Produtos Não-Plano	406
12.3	Aço e suas Aplicações	409
12.3.1	Aços planos	409
12.3.2	Aços para produtos longos	412
12.4	Influência dos Elementos de Liga nas Propriedades do	413
12.5	Composição Química e Propriedades dos Diversos Tipos de Aço	415
	Referências	417
	Bibliografia	418

Visão Geral do Processo Siderúrgico

1.1 Histórico dos Processos de Obtenção de Ferro e Aço

Capítulo 01

Marcelo Breda Mourão
Erberto Francisco Gentile

Os primeiros contatos do homem com o metal ferro foram a partir do ferro meteorítico; em torno de um terço dos meteoritos que atingem a superfície da Terra é de ferro, com teores variáveis de níquel. Desde tempos remotos o homem os utilizava na fabricação de ferramentas, adornos e armas. Em diversas línguas a palavra que designa o metal ferro tem significado equivalente a "metal que veio do céu".

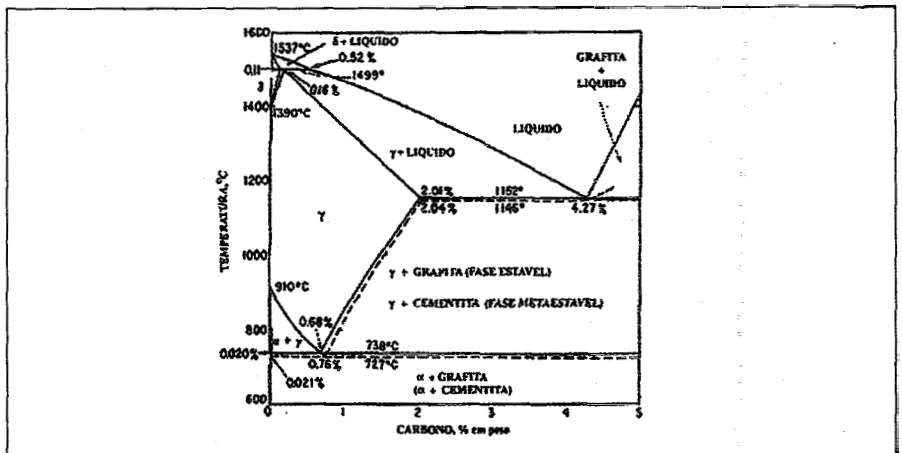
A metalurgia é o conjunto de tratamentos físicos e químicos a que são submetidos os minerais para a extração dos metais; surgiu há mais de 6 mil anos no Oriente Próximo, e o bronze foi o material metálico dominante no início. De acordo com antigos relatos, o primeiro povo a usar o ferro, sistematicamente, na fabricação de ferramentas e armas foram os chalibas, uma tribo hitita da região onde hoje é a Armênia, que entre 1200 a.C. e 1400 a.C. tinham o monopólio do segredo da fabricação do ferro; com isso, o Império Hitita foi capaz de estender seus domínios pela Mesopotâmia. A história oficial fixa, aproximadamente, em 1000 a.C. o início da Idade do Ferro, posterior à Idade do Bronze. Esse início não ocorreu de forma uniforme nas diferentes regiões; com origem no Oriente e depois disseminando-se pela Europa, provavelmente a metalurgia do ferro também surgiu de forma independente na China, na Índia e na África (que não teve uma Idade do Bronze), ao passo que na Oceania e nas Américas a metalurgia do ferro só chegou com o conquistador europeu.

Nos seus 3.000 anos "oficiais" de existência, o processo siderúrgico de transformação do minério de ferro em produtos de aço evoluiu junto com a civilização, mas sua essência ainda é a mesma: usa-se uma fonte de carbono (carvão vegetal ou coque) reagindo com um sopro de ar para extrair o ferro do minério e para fornecer a energia necessária ao processo, e o ferro obtido é trabalhado térmica e mecanicamente para obtenção do produto final.

Visão Geral do Processo Siderúrgico

O ferro é um metal de propriedades que apresentam grandes variações, em função de sua composição química e histórico de tratamento termo-mecânico. Em particular, o carbono, sempre presente no ferro devido ao processo de obtenção com o uso de carvão, afeta muitas das propriedades importantes no processo de obtenção e nas características do produto final. A Figura 1.1 mostra o diagrama de equilíbrio ferro-carbono, no qual se pode observar, entre outras importantes características, que o aumento do teor de carbono diminui a temperatura *liquidus*, isto é, a temperatura na qual o metal está totalmente fundido. Ferro puro funde a 1.537° C, e o aumento do teor de carbono reduz progressivamente a temperatura de fusão até que, para 4,27% de carbono, atinge-se o mínimo de 1.152° C. Para comparação, o cobre funde a 1.083° C, e ligas de cobre com estanho (os bronzes) fundem a temperaturas ainda menores, o que facilitou muito o desenvolvimento de artefatos de bronze obtidos por fundição.

FIGURA 1.1- Diagrama de equilíbrio ferro-carbono (MCGANNON, 1971).1



A Figura 1.2 mostra o efeito do teor de carbono e do tratamento térmico na dureza e resistência do ferro. Observa-se que ferro puro é um material de baixa dureza e resistência, e o aumento do teor de carbono melhora estas propriedades. Ferro contendo acima de 0,35% de carbono, quando aquecido e depois resfriado bruscamente, adquire propriedades mecânicas excepcionais. A descoberta deste fenômeno, e do material assim produzido, que os antigos chamaram de aço, foi decisiva na difusão do ferro como o principal metal para fabricação de ferramentas e armas.

Para se reduzir um óxido de ferro por carbono, são necessárias altas temperaturas e ambiente com pouco oxigênio. Isto pode ser conseguido através de sopro de ar em uma mistura de minério e carvão contida em local isolado da atmosfera, que pode ser um buraco no chão.

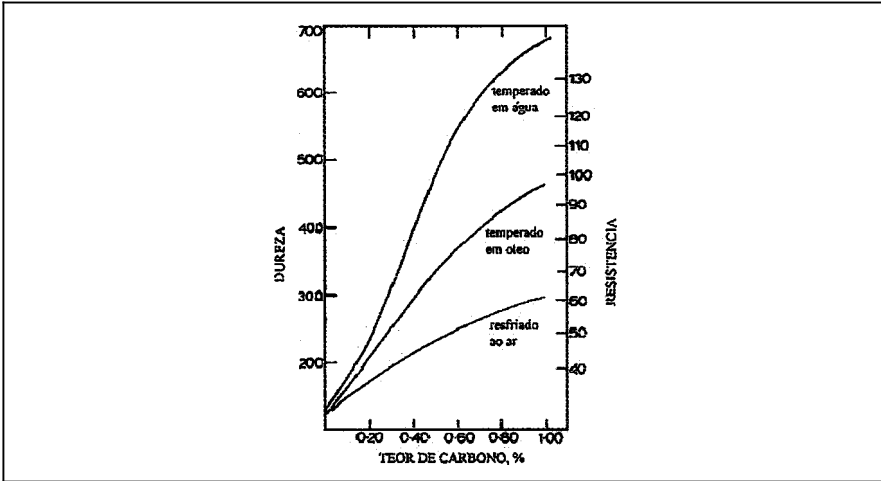


FIGURA 1.2 - Efeito do teor de carbono e do tratamento térmico nas propriedades do aço (unidades arbitrárias) (BARRACLOUGH, 1984).²

Descobertas arqueológicas permitiram que fossem identificados diversos tipos de fornos usados na redução de minério de ferro. A Figura 1.3 ilustra um dos mais primitivos, que consiste de um buraco revestido com pedras provido de tubos, para injeção de ar na carga, constituída de minério de ferro e carvão vegetal. Dificilmente era possível atingir as temperaturas de fusão do ferro nestes tipos de fornos, e obtinha-se ao fundo do poço, após o fim do processo, uma massa de ferro sólido, de baixo teor de carbono, e com a ganga ainda presa na massa metálica. Este material deveria ser re-aquecido e, então, trabalhado nas forjas, para expulsão parcial da escória e para a obtenção do produto final.

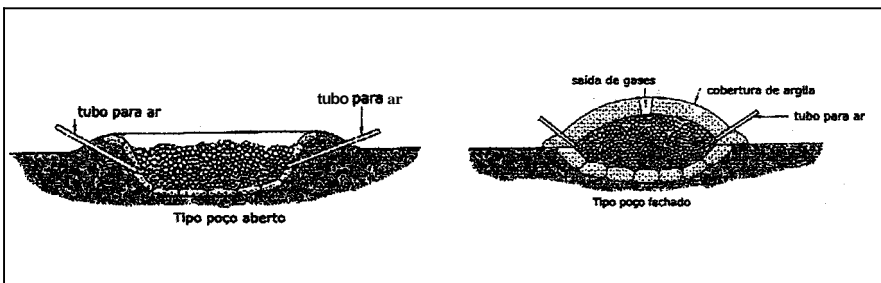
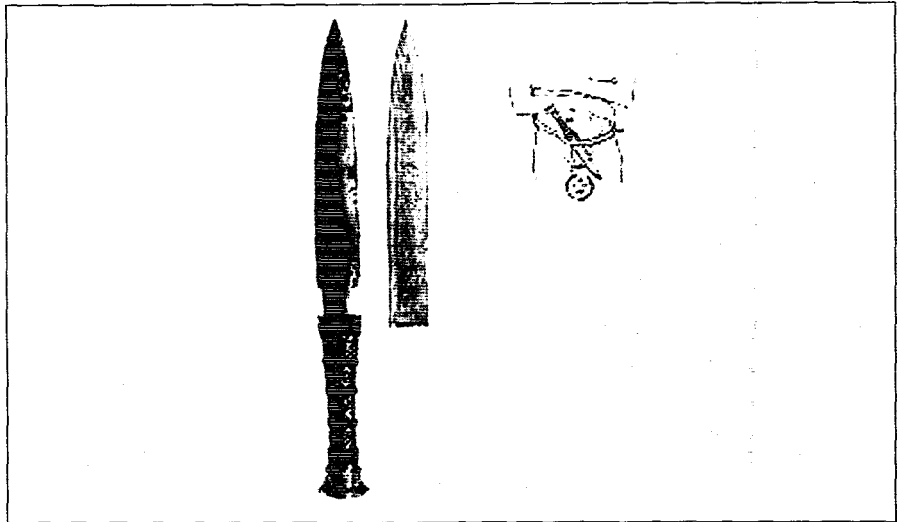


FIGURA 1.3 - Fornos antigos de extração de ferro (MCGANNON, 1971).¹

Visão Geral do Processo Siderúrgico

Este tipo de operação era, então, sujeita a inúmeras variações, com reflexo no produto obtido. O teor de carbono de artefatos de ferro, que a arqueologia datou como tendo sido fabricados entre o XI e o VI séculos antes da era cristã, foi determinado na faixa de zero a 0,8 %. De maneira geral, o ferro obtido neste período era ferro doce de baixo carbono e baixa dureza, obtido em pequenas quantidades nos fornos-poço e usados mais como objeto de decoração e utensílios que não requeriam resistência mecânica. Um exemplo notável de objeto decorativo é a adaga com lâmina de ferro encontrada na tumba de Tutancamon, atada ao cinto da múmia, em lugar de destaque, indicando o grande valor que era dado a estes objetos.

FIGURA 1.4 - Adaga com lâmina de ferro encontrada no cinto da múmia de Tutancamon, de 1350 a.C. (SHERBY, 1993).³



O rei indiano Puru, derrotado por Alexandre, o Grande, apresentou seus respeitos ao vencedor oferecendo-lhe sua espada e uma caixa de ouro contendo um botão de ferro indiano de alto teor de carbono (*wootz*), à época mais valioso que ouro.

Ao longo dos séculos, o forno de redução foi sendo aperfeiçoado, conforme ilustrado na Figura 1.5.

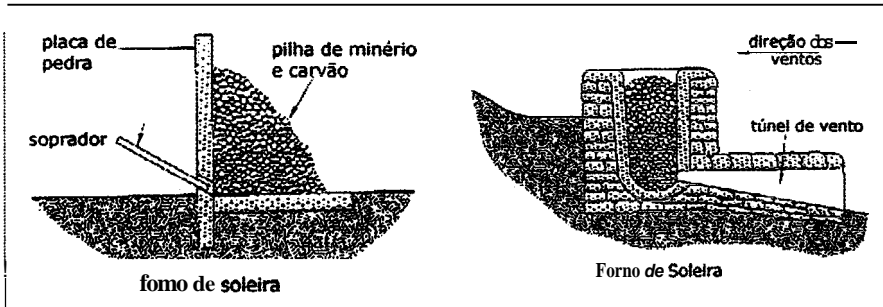


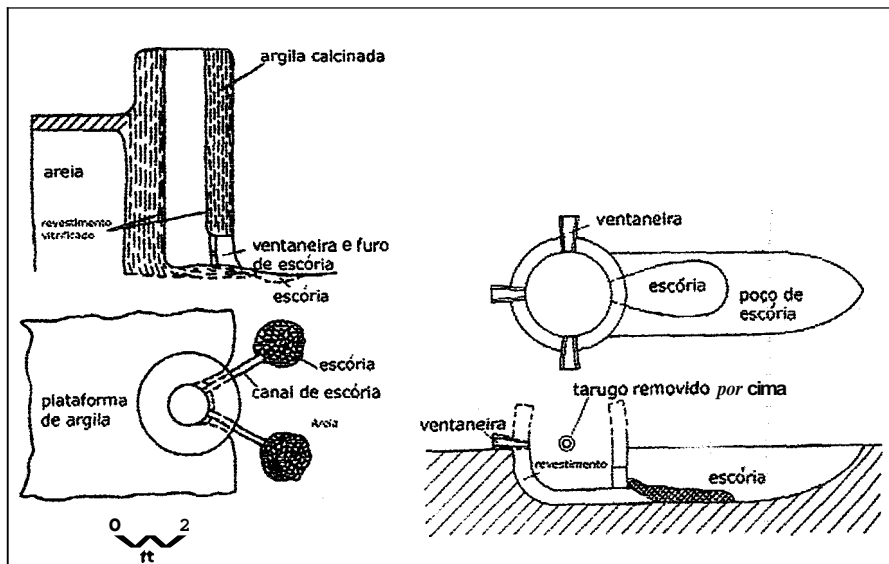
FIGURA 1.5 - Versões de fornos de extração de ferro usados na Antiguidade (MCGANNON, 1971).¹

Nestes fornos de soleira, com sopro de ar intensificado em relação aos fornos-poço, era possível atingir temperaturas um pouco maiores, permitindo eventualmente a fusão da escória, que era vazada de tempos em tempos, obtendo-se um produto mais limpo. A fabricação de aço por *têmpera* de ferro com teor de carbono acima de aproximadamente 0,3%, também, passa a ser mais regular a partir do VI século a.C., após a difusão da metalurgia do ferro na Europa, desde o Oriente Médio e do estabelecimento de centros produtores de armas e ferramentas. Primeiramente, na região onde hoje é a Áustria, posteriormente, deslocando-se para as terras celtas e para a Espanha, a metalurgia do ferro começou a especializar-se e a crescer em escala. Existem evidências de obtenção de ferro fundido na Antiguidade, com certa regularidade, na China; assim como descobertas esporádicas, na África e Índia, de ruínas de fornos com os quais teria sido possível obter-se ferro-carbono líquido.

A grande contribuição do Império Romano à metalurgia do ferro foi sua organização e o enorme aumento de escala; descobertas arqueológicas indicam que locais de armazenamento de escória deste período podem conter centenas de toneladas, indicando produção em quantidades muito maiores que no período pré-romano. A tecnologia de redução permaneceu sem grandes desenvolvimentos, com fornos tipo cuba ou tipo poço (Figura 1.6).

Visão Geral do Processo Siderúrgico

FIGURA 1.6 - Fornos de extração do ferro no período romano: a esquerda, tipo cuba; a direita, tipo poço (TYLECOTE, 1976).⁴



Com o tempo foi surgindo uma divisão da indústria em setores: a redução do minério para obtenção dos tarugos de ferro era feita próxima às minas, e o produto intermediário era encaminhado para diferentes forjarias, algumas especializadas (espadas, pontas de lança, pregos), outras generalistas.

O maior exemplo de especialização na fabricação de artefatos de ferro e aço é o da legendária espada de Damasco. Famosas por seu corte afiado e flexibilidade, e, especialmente, por sua beleza em razão dos desenhos formados na superfície por carbonetos (mais tarde denominados *Escada de Maomé*) o segredo de sua fabricação perdeu-se no tempo. Estudos recentes propõem que a espada de Damasco, na verdade, era fabricada por ferreiros persas a partir de ferro com alto teor de carbono importado da Índia, o chamado *wootz*, e comercializadas em Damasco. O *wootz* continha entre 1% e 2% de carbono, e não há certeza sobre o método usado em sua obtenção, mas se especula que possa ter sido pelo método do cadinho a partir de ferro-carbono líquido. O aço de Damasco sempre fascinou os metalurgistas, e seu estudo foi importante no desenvolvimento da metalurgia. Michael Faraday, na tentativa de duplicar o famoso aço, adicionou diferentes metais ao ferro, de certo modo inventando os aços ligados.

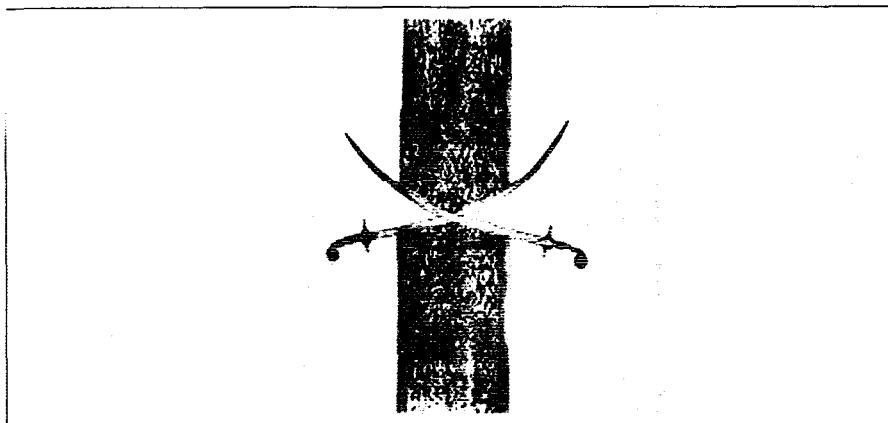


FIGURA 1.7 - Exemplo de estrutura da superfície de espadas de Damasco (SHERBY, 1999).³

No período medieval após a queda do Império Romano e até o século X da nossa era, houve uma grande diminuição da atividade de mineração e da metalurgia em geral, na Europa e no Oriente Médio, com muito pouco comércio de metais e produção essencialmente local. Surgiram alguns outros centros de produção, como aqueles dos celtas, dos francos, dos nórdicos e dos saxões. Na Índia, a metalurgia do ferro estava bem estabelecida, como testemunha ainda hoje o Pilar de Ferro, datado do ano 300 da era cristã, medindo mais de 7 metros de altura, ilustrado na Figura 1.8.

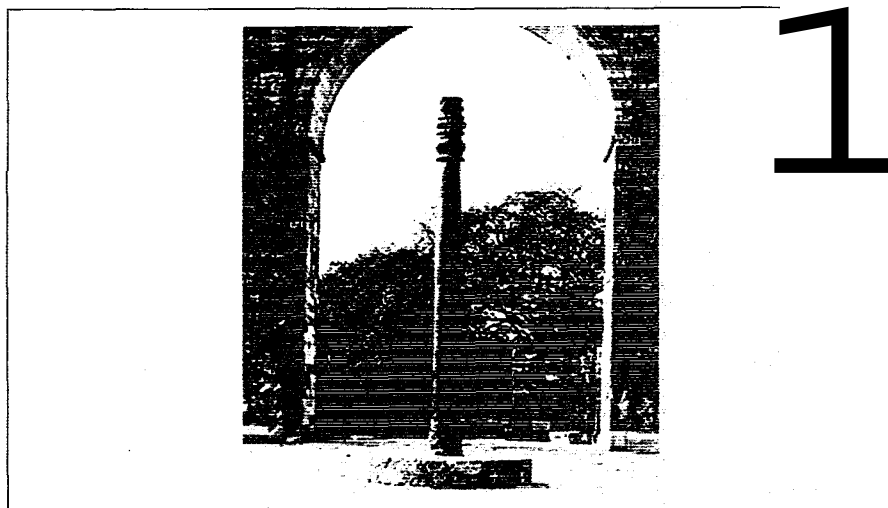
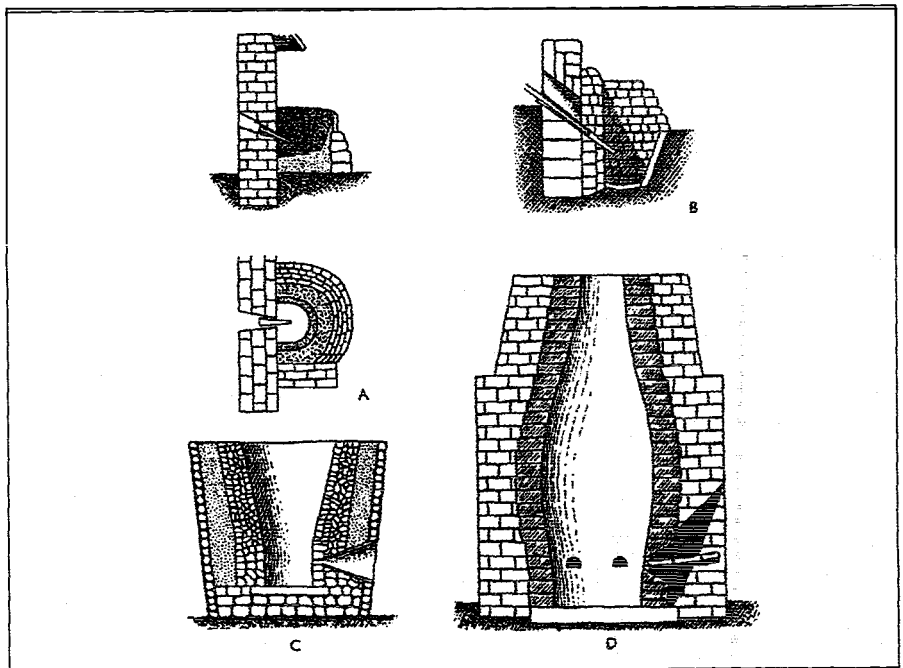


FIGURA 1.8 - O Pilar de Ferro de 1.700 anos em Delhi, Índia (SRINIVASAN e RANGANATHAN, 2006).⁵

Visão Geral do Processo Siderúrgico

Processos de produção começaram a se diferenciar entre as regiões produtoras, e a partir do século X, a quantidade de ferro produzida começou a aumentar. Novas tecnologias surgiram, em geral motivadas pela própria necessidade das forjarias. A principal delas foi o uso de foles asionados por rodas d'água, o que aumentou muito a capacidade de sopro e, assim, a possibilidade de temperaturas maiores serem atingidas. A evolução dos fornos de redução pode ser representada pelos diferentes tipos de fornos surgidos na Idade Média, como a forja Corsa, a forja êatalã, o forno *Osmund* e o *Stückoven* (Figura 1.9).

FIGURA 1.9 - A: Forja Corsa; B: Forja Catalã; C: Forno *Osmund*; D: *Stückoven* (SINGER et al., 1956).⁶



Estes processos medievais eram enormes consumidores de carvão e minério, para produções modestas em cada operação. Um forno tipo poço antigo podia produzir botões de 60 quilogramas consumindo, para isto, em torno de 500 kg de minério (com 25% de ferro) e 4.500 kg de carvão, o que corresponde a um *fuel rate* assustador de 75.000 kg C/ton Fe, enquanto para os fornos medievais os valores correspondentes eram:

- *forja Corsa*: botões de 125 kg, consumindo 330 kg de minério e 2.850 kg de carvão (*fuel rate*: 22.800 kg Carvão/ton Fe);

- forja *Catalã*: botões de 150 kg de ferro consumindo 480 kg de minério e 1.730 kg de carvão (*fuel rate*: 11.500 kg Carvão/ton Fe);
- *Stückoven*: botões de 300 a 900 kg, consumindo 2.500 kg por tonelada de ferro e 6.000 kg de carvão por tonelada de ferro (*fuel rate*: 6.000kg C/ton Fe).

O carvão empregado era obtido por carbonização da madeira em pilhas em fornos de meda, e as quantidades envolvidas já prenunciavam os sérios problemas de abastecimento que diversas regiões da Europa iriam enfrentar. A Figura 1.10 reproduzida de *De La Pirotechnia* ilustra a fabricação de carvão no século XVI.

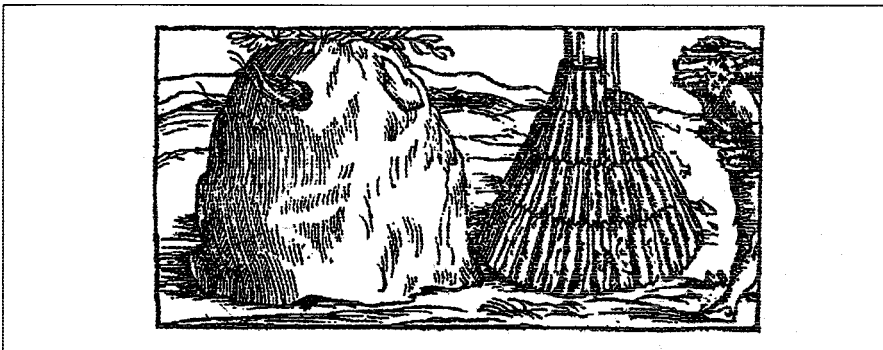


FIGURA 1.10 - Fabricação de carvão vegetal no século XVI (BIRINGUCCIO, 1943).⁷

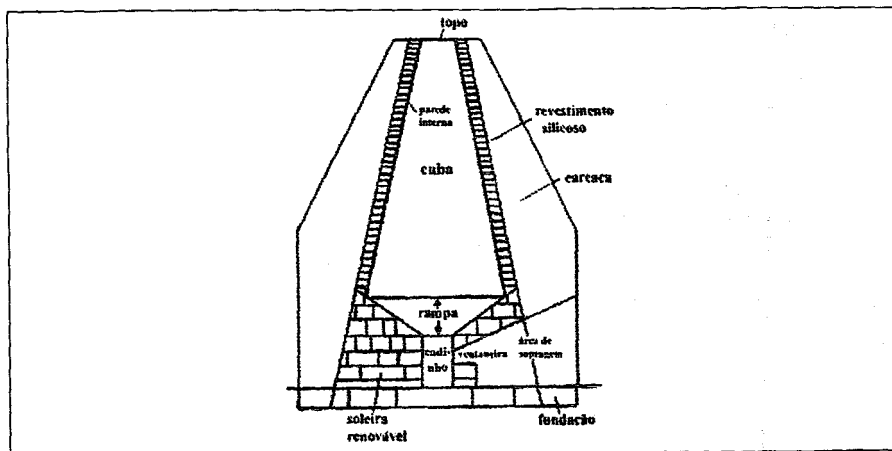
O produto obtido por estes processos ainda é um botão de ferro sólido, apesar de ser possível, principalmente com o *Stückoven*, a obtenção de ferro líquido com alto carbono. Ocorre que o ferro fundido assim obtido, contendo em torno de 4 % de carbono, é um material duro, frágil e quebradiço, impossível de ser trabalhado nas forjas, e de pouca utilidade à época.

A frequência de guerras requeria melhores armas, e o ferro fundido ganhou, assim, uma aplicação que requeria grandes quantidades de material: canhões e suas respectivas balas. No cerco da cidade de Magdeburg, eram lançadas de 12.000 a 16.000 balas de canhão de ferro fundido a cada dia, e a produção de ferro atingiu cerca de 60.000 toneladas em 1500.

O desenvolvimento do alto-forno veio quase naturalmente, motivado principalmente pela necessidade do produto, ferro fundido. O primeiro alto-forno europeu foi o de Brescia, em 1450 (Figura 1.11). No fim da Idade Média, o comércio de ferro e aço estava plenamente difundido, e diferentes tecnologias coexistiam, tanto para a extração do ferro como para a obtenção de aço.

Visão Geral do Processo Siderúrgico

FIGURA 1.11 -
Representação
esquemática do alto-
forno de Brescia
(SINGER et al., 1956).⁶



No entanto, a escassez de madeira para fabricação de **carvão vegetal**, o combustível e redutor empregado nos altos-fornos, **impedia** uma expansão maior. Madeira era o mais importante material tanto para **construção** de casas e navios como para **uso industrial**, e leis restritivas a seu uso foram editadas em localidades que **já sofriam** grande devastação, o que fez que **houvesse declínio** na atividade siderúrgica inglesa, enquanto a Suécia **surgia** como grande produtora.

Entre 1500 e 1700, a produção dos *Strückoven* cresceu de 1.200-1.300 kg/dia para 1800-2100 kg/dia, com um consumo de carvão de, aproximadamente, o dobro da produção de ferro, e no fim do século XVIII, já se produziam 2.000-2.500 kg/dia, com consumo de carvão bem menor; esta **melhoria** foi conseguida basicamente pela adoção de processo contínuo. A fabricação de aço entre 1500 e 1700 era feita ou por **cementação** em caixa de ferro doce obtido nas forjas, ou também, por **imersão** de barras de ferro doce em ferro fundido, de modo a aumentar o teor de carbono. Estes processos conviveram por **muito** tempo. No período **entre** os séculos XVI e XVIII, não houve nenhum desenvolvimento **revolucionário**, mas **houve uma** melhora significativa dos processos existentes e uma **difusão** da indústria para diferentes regiões, inclusive, para as colônias inglesas no Novo **Mundo**.

Em 1708, o **cervejeiro** Abraham Darby fez experiências com carvão fóssil no intuito de **substituir** o carvão vegetal, como combustível, e **obteve um** produto de boa resistência mecânica e que não liberava **alcatrão**, o coque. A difusão do coque como combustível e redutor siderúrgico foi lenta, tendo

coque, carvão vegetal e antracito convivido durante os séculos XVIII e XIX, na **alimentação** dos alto-fornos, apesar das grandes vantagens da operação com coque. O maior problema foi que o ferro gusa obtido nos fornos a coque era considerado desfavorável para conversão em ferro doce, em razão das impurezas introduzidas pelo coque. Ferro doce forjado era, ainda no início do século XIX, o principal produto de ferro. O problema foi resolvido com o desenvolvimento, por Henry Cort, do processo de **pudlagem**, que consiste basicamente em agitar o ferro gusa líquido na soleira de um forno revérbero, adicionando minério de ferro, de modo a oxidar carbono do gusa pelo oxigênio do ar ou do minério, até este se tornar ferro maleável. O processo difundiu-se rapidamente, aumentando muito a demanda por gusa de alto-fornos. Também o processo de **cadinho** para produção de aço no estado líquido para fundição, a partir de ferro doce, portanto, de maior homogeneidade e pureza, desenvolvido por Huntsman no fim do século XVIII, foi de grande importância na difusão do aço como material superior ao ferro forjado.

Durante o século XVIII, os equipamentos de sopro evoluíram bastante; tubos de madeira foram substituídos por tubos de ferro, e em 1769 as rodas d'água foram substituídas por motores a vapor. Com estas melhorias, os fornos que produziam em média 1 tonelada/dia, no início do século, passaram a produzir entre 3 e 5 toneladas/dia, no fim do século. O primeiro uso de máquinas a vapor, para sopro de ar para a produção de ferro, deu-se em 1776, quando J. Wilkinson produziu os primeiros cilindros de ferro fundido com precisão suficiente para impedir vazamentos de vapor.

Outra tecnologia importante que se tornou disponível no século XIX foi o preaquecimento do ar injetado no forno. O primeiro equipamento de preaquecimento do ar, desenvolvido em 1828 por Neilson, na Escócia, era uma caixa de ferro aquecida externamente. Esta tecnologia difundiu-se com rapidez, e diferentes tipos de preaquecedores foram desenvolvidos. Paralelamente, as ventaneiras tiveram de ser adaptadas ao ar quente, e foram desenvolvidas as ventaneiras de cobre refrigeradas a água. O uso de ar quente resultou em grande aumento na produção dos alto-fornos e uma grande diminuição no consumo de combustível.

Com a descoberta de minérios de ferro de alta qualidade na Pensilvânia, Estados Unidos, a siderurgia começou a expandir-se rapidamente

na região. Inicialmente ainda baseados em carvão vegetal, os alto-fornos incorporavam os últimos desenvolvimentos e outros eram criados, como uso de tijolos refratários no lugar de pedras naturais no revestimento interno; aumento do número de ventaneiras; da altura dos fornos, chegando a 13,7 metros de altura de cuba; topo de forno fechado (até então o topo era aberto), com equipamentos de topo cada vez mais eficientes, até o desenvolvimento do topo com cone invertido; e, finalmente, melhorias na casa de corrida, com furo de gusa oposto a furo de escória, para poder dar conta da cada vez maior produção diária de cada forno. Ao longo do tempo, o coque foi tomando o lugar do carvão vegetal, também, nos Estados Unidos.

O fim do século XIX foi marcado por um grande aumento na produção mundial de aço, com o desenvolvimento de processos revolucionários de conversão de gusa. O americano William Kelly percebeu que o carbono do gusa podia ser "queimado" com ar, aumentando a temperatura e diminuindo o teor de carbono até converter-se em aço. Concomitantemente, o inglês Henry Bessemer trabalhou na mesma linha e patenteou o processo (Figura 1.12). Apesar da dificuldade de tratar gusa com teores elevados de fósforo, o processo prosperou e foi adotado por diversos fabricantes europeus.

FIGURA 1.12 - Primeiras experiências do conversor de Bessemer (SCHUBERT,1958).⁸



Na mesma época, Siemens desenvolveu o forno regenerativo de soleira aberta, e Martin aperfeiçoou o processo com o uso de sucata de ferro. O inglês Sidney Gilchrist Thomas resolveu o problema do fósforo nos conversores Bessemer pelo uso de revestimento básico. De 1870 a 1900, a produção mundial de aço aumentou 56 vezes, chegando a 28 milhões de

toneladas na virada do século. Grande parte do aço era usado na construção de ferrovias, mas outros mercados eram abertos, como na fabricação de caldeiras, navios, construção civil, pontes. O grande monumento a esta época é a Torre Eiffel, construída em 1889 de aço produzido pelo processo Siemens-Martin. Neste mesmo ano, os Estados Unidos tornaram-se os maiores produtores mundiais de aço. No fim do século XIX, tanto na Europa como nos Estados Unidos, a indústria siderúrgica operava grandes alto-fornos de mais de 20 metros de altura, produzindo em torno de 180 toneladas/dia. O ferro gusa era convertido a aço ou pelo processo pneumático (Bessemer ou Thomas), ou pelo processo de soleira aberta (Siemens-Martin). O processo Siemens-Martin era mais flexível em termos do teor de fósforo do gusa e permitia o emprego de maior quantidade de sucata, e, a partir dos primeiros anos do século XX, tornou-se o processo dominante de conversão de ferro gusa em aço.

O princípio regenerativo para aquecimento de ar foi aplicado por um associado de Siemens, E.A. Cowper, no desenvolvimento dos regeneradores duplos, um em aquecimento pela queima do gás do alto-forno, enquanto o outro preaquece o ar. Conseguiu temperaturas de 620° C no ar, com 20% de economia de combustível no alto-forno.

Durante as primeiras décadas do século XX, os desenvolvimentos do alto-forno foram basicamente melhorias no equipamento e no processo que já era bem estabelecido, porém grandes avanços foram registrados na preparação do minério de ferro. Em 1910, na Pensilvânia, foi instalada a primeira máquina Dwight-Lloyd de sinterização direcionada para minério de ferro; os primeiros sínteres eram ácidos, mas, a partir de meados do século XX, passaram a ser utilizados sínteres básicos, com conseqüente economia de combustível no alto-forno, que não mais necessitava calcinar o calcáreo. O processo de pelotização, compreendendo a formação de pelotas a partir de finos de minério úmidos, seguida de queima destas pelotas, foi desenvolvido na primeira metade do século passado, disseminando-se a partir da década de 1950, para tornar-se, hoje, a pelota uma das formas mais importantes de comercialização de minério de ferro.

Outro desenvolvimento decisivo ocorrido no século XX foi a injeção de combustíveis pelas ventaneiras dos altos-fornos. Esta prática começou a

disseminar-se a partir da década de 1940, quando se percebeu que a injeção de óleo combustível pelas ventaneiras poderia levar à significativa economia do coque carregado pelo topo. A injeção de carvão e, posteriormente, a de gás natural foram testadas e aprovadas e, na atualidade, praticamente todos os grandes altos-fornos empregam algum tipo de injeção de combustível pelas ventaneiras.

Na década de 1970, o Japão passou por uma grande modernização de sua siderurgia, e um programa nacional promoveu a substituição de inúmeros altos-fornos por outros mais modernos e maiores. Aproveitou-se a desativação de vários altos-fornos para uma experiência em grande escala de dissecação dos altos-fornos a serem desativados, o que levou à "descoberta" da chamada zona coesiva nos altos-fornos, a região com material semifundido, através da qual os gases fluem apenas pelas "janelas" de coque, o que mudou radicalmente a maneira de se pensar sobre o fluxo de materiais no alto-forno.

Um moderno alto-forno, hoje, pode produzir 13.000 toneladas de ferro gusa de qualidade estável por dia, tem vida útil, em média, próxima a 15 anos, alta produtividade e baixo consumo de combustível (entre 470 e 500 kg de coque mais combustível injetado).

1.2 O Processo Siderúrgico

As usinas siderúrgicas atuais podem ser divididas em dois grandes grupos: usinas integradas e usinas semi-integradas. Usina integrada é aquela cujo aço é obtido a partir de ferro primário, isto é, a matéria-prima é o minério de ferro, que é transformado em ferro na própria usina, nos altos-fornos; o produto dos altos-fornos, chamado ferro-gusa, é transformado em aço através da operação de conversão. Usina semi-integrada é aquela cujo aço é obtido a partir de ferro secundário, isto é, a matéria-prima é sucata de aço, não havendo necessidade da etapa de redução do minério de ferro. A sucata é transformada novamente em aço comercial, por meio do emprego de fornos elétricos de fusão; são recicladoras de aço.

Em uma moderna usina siderúrgica integrada, o processo que vai das matérias-primas ao produto final é constituído pelas seguintes etapas principais: extração do ferro de seu minério nos altos-fornos; a conversão do

ferro gusa, produto intermediário, em aço; o **lingotamento** do aço líquido de forma a solidificar em forma conveniente para as operações seguintes; e, **finalmente**, a conformação do metal na forma de produto. Em siderúrgica **semi-integrada**, o processo começa com a fusão de sucata de aço em forno elétrico a arco, e depois segue basicamente o mesmo procedimento das integradas. A Figura 1.13 apresenta um fluxograma simplificado do processo siderúrgico.

As matérias-primas básicas do processo são minério de ferro, carvão mineral e calcário, mas muitos outros insumos e utilidades são empregados.

O processo siderúrgico começa fora da usina com a seleção, compra e transporte de todos os materiais necessários. O primeiro passo é dispor os minérios de ferro e os carvões minerais em pilhas no pátio de matérias-primas, junto dos sistemas de transporte, que têm a função de encaminhar estes materiais aos locais de seu processamento.

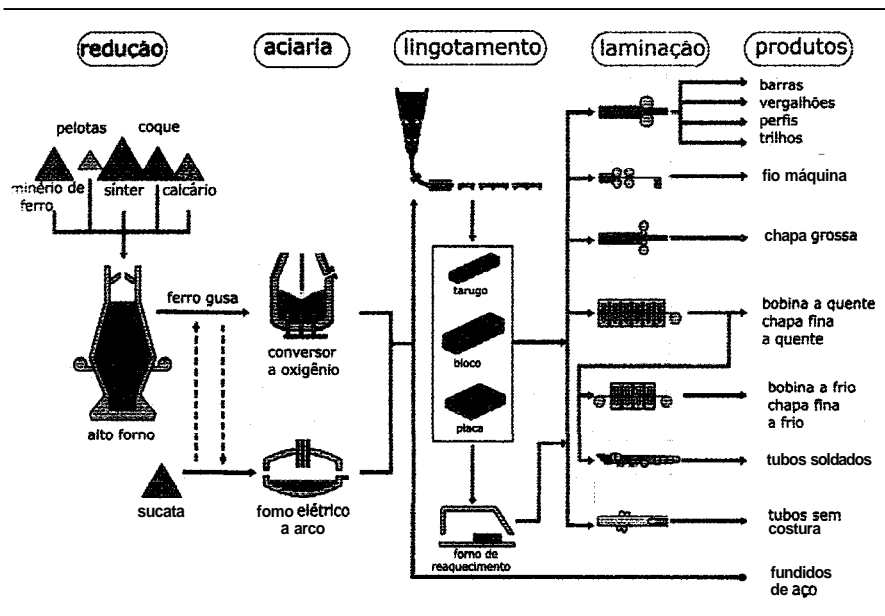


FIGURA 1.13 - Fluxograma simplificado do processo siderúrgico (AN INTRODUCTION... 2006).⁹

Procuram-se otimizar as misturas de minérios de ferro, como também a dos carvões minerais, objetivando menor custo com a melhor qualidade possível. Essa fase é feita através da formação de pilhas, com os minérios e os carvões dispostos em camadas horizontais em suas pilhas respectivas, com o

auxílio de um “*stacker*”. Essas pilhas têm um volume de material que poderia alimentar a linha de produção por vários dias.

Após a pilha estar concluída, e com o objetivo de não haver segregação na pilha, o material da pilha é recuperado por cortes **transversais**, utilizando o *reclaimer*, que envia esse material para a *sinterização*, no caso de minérios, ou para a *coqueria*, no caso dos carvões minerais.

A sinterização é um processo de aglomeração dos minérios de ferro que emprega o chamado sinterfeed, minério com **granulometria** entre 0,1 a 9,5 mm. O processo é feito em uma máquina de esteira rolante onde se deposita o minério de ferro e finos de coque ou carvão, formando camada de aproximadamente 700 mm de altura por 2.000 mm de largura, a qual é **aquecida** por uma frente de combustão, alimentada por ar succionado através da camada, que percorre da superfície até o fundo da camada ocasionando uma ligação incipiente que produzirá o colamento entre as partículas de minério de ferro, resultando o sinter. Posteriormente, tratar-se-á de forma mais **aprofundada** o processo.

A mistura de carvões é enviada à coqueria, onde sofrerá o processo de coqueificação, resultando o "coque". Como **subprodutos**, têm-se substâncias carboquímicas, que são purificadas e vendidas (importante para baixar o custo dos carvões), e o gás de coqueria (GCO), que é utilizado na usina como combustível complementar do balanço **energético** da usina. O Capítulo 2 trata com mais detalhes as matérias-primas siderúrgicas

Tanto o sinter como o coque são enviados para silos, processo denominado silagem. Estes silos têm sistemas dosadores, **importantes** na formulação da carga usada no processo de produção do **gusa**, que é o produto resultante da redução do minério de ferro.

Em usinas integradas, o minério de ferro é reduzido a ferro metálico nos altos-fornos.

O alto-forno é um reator cilíndrico vertical que trabalha a **contra-corrente**, ou seja, a carga a ser reduzida carbotermicamente **cntra** pelo topo deste, e os gases redutores sobem da base para o topo do forno, mantido em regime permanente. Esse forno tem dimensões da ordem de 10 m a 14 m de diâmetro por 60 m a 70 m de altura. Este necessita de alguns equipamentos auxiliares, tais como: regeneradores, de **3** a 4 por alto-forno, que têm como

objetivo recuperar o calor latente dos gases, que saem do topo do alto-forno, aquecendo o ar que vai ser injetado no próprio alto-forno; turbo-soprador, que é uma turbina multiestágio capaz de ter alta vazão a pressões elevadas (cerca de 6 kg/cm^2); sistema de limpeza de gases, muito importante para evitar o entupimento das tubulações e regeneradores, em razão da quantidade elevada de particulados nos gases que saem dos alto-fornos.

Resumindo, o alto-forno é um equipamento que recebe sinter de minério de ferro, coque e ar aquecido, produzindo o gusa (sistema líquido que contém essencialmente ferro e carbono em solução, a uma temperatura perto de 1.500°C); escória (sistema oxidado líquido que contém os minerais de ganga do minério de ferro) e o “GAF” (gás que sai pelo topo do alto-forno).

O gusa, antes de ir para a aciaria, sofre pré-tratamentos específicos, como de dessiliciação, desfosforação e dessulfuração, para minimizar a presença de Si, P e S, e com isso facilitar o processo de produção de aços com maior nível de qualidade. A escória sofre um processo de atomização com água, obtendo-se como produto escória granulada, o que auxilia sua venda para a indústria cimenteira. O GAF após livrar-se do material particulado é injetado nos regeneradores, como combustível, para aquecer o ar que é injetado no alto-forno. O Capítulo 3 trata com mais detalhes o processo de redução em altos-fornos.

Apesar do alto-forno ser o processo clássico de redução do minério de ferro e o mais usados nas usinas siderúrgicas do mundo, atualmente, existem diversos processos emergentes, que em determinadas condições, podem apresentar vantagens sobre o alto-forno. Esse assunto será tratado no Capítulo 4.

A aciaria é o setor da usina siderúrgica onde o gusa é refinado, obtendo-se o aço. O processo consagrado nas usinas integradas, atualmente, é a conversão do gusa pelo processo a oxigênio, ou processo LD, no qual o gusa é oxidado, controladamente, por um fluxo de oxigênio lançado diretamente à superfície do banho, através de uma lança, por onde o fluxo de oxigênio atinge velocidade acima da do som.

Atualmente, nas aciarias é que se encontram os processos mais flexíveis na arte de se conseguir aços com qualidades competitivas com aquelas de aços fabricados por aciarias de pequeno porte, que utilizam sucata e fornos elétricos a arco. Para que isso aconteça, as aciarias foram aprimorando

tecnologias de metalurgia de panela (refino secundário), como: injeção de pós-reativos; forno RH, para tratamento do aço a vácuo etc.; todas essas tecnologias objetivam: **minimizar inclusões**, **homogeneizar** o aço, **descarburar** o aço até teores de ppm; em resumo, conseguir o aço com alto nível de **limpeza**. A fabricação de aços em **convertedores** a **oxigênio** é tratada no Capítulo 5; em fornos elétricos, no Capítulo 6; e o refino secundário de aços; no Capítulo 7.

Uma grande conquista do setor de aciaria é o **lingotamento** contínuo que, além de **minimizar** problemas de superfície dos lingotes, **já** apresenta uma geometria de placa, pronta para a **laminação**, sem passar pelo processo de **laminação** de desbaste. No antigo processo **clássico**, o aço **produzido** era solidificado em **lingoteiras** de ferro fundido, resultando lingotes de até 20t, nas mais variadas formas geométricas. Neste processo, há necessidade de **reaquecer** os lingotes e fazer a laminação de desbaste, obtendo-se a placa, que é a matéria-prima para os processos de fabricação de produtos planos por **laminação**. No lingotamento contínuo a placa é obtida diretamente no **processo**. O lingotamento contínuo é tratado no Capítulo 8, enquanto o Capítulo 9 trata dos materiais **refratários** utilizados nos principais equipamentos siderúrgicos.

A placa obtida por lingotamento contínuo é um produto intermediário, que pode ser vendido no mercado nacional ou internacional, ou processado na própria usina. É a matéria-prima para duas classes de produtos comerciais: chapa grossa (chapa com espessura **superior** a 6,0 mm); chapas finas (que podem ser a quente e a frio).

Para a fabricação de chapas grossas, a placa, após o **reaquecimento** em forno de placa, é encaminhada ao laminador de chapas grossas onde **sofre** o processo de deformação, chegando às dimensões requeridas. O próximo passo pode ser o tratamento térmico (normalização, recozimento ou têmpera), chegando-se ao produto final chapa grossa tratada termicamente ou, então, chapa grossa sem tratamento térmico.

Para a fabricação de chapas ou tiras **finas** e bobinas, a placa é encaminhada para a laminação de chapas finas. O primeiro passo é o aquecimento das placas, em forno de **reaquecimento**, posteriormente essa placa é encaminhada ao trem de laminação a quente, do qual obtém-se o produto "tira a quente", que é um produto comercial, após passar pela laminação de acabamento.

A tira a quente pode seguir para decapagem (tratamento químico superficial), ao invés da laminação de acabamento. Após a decapagem e secagem da tira, ela é encaminhada ao trem de **tiras a frio**, obtendo-se a tira a frio, que é recozida, sofrendo em seguida a laminação de encruamento, tendo-se a "tira fina a frio" que é um dos produtos ao qual se incorporou o maior valor de toda linha de laminados. No processo de laminação de produtos longos, mais comum em usinas semi-integradas, em vez de placa o iingotamento (contínuo ou não) pode produzir barras ou tarugos, que dão origem à linha de laminação de produtos longos ou perfis, como é o caso da laminação de trilhos. A laminação dos aços é tratada no Capítulo 10.

A preocupação com o meio ambiente é hoje tema central dos siderurgistas. Grandes investimentos foram feitos nos últimos anos no intuito de diminuir a geração e de captar eficientemente possíveis emissões de materiais nocivos ao meio ambiente e à saúde da população. A tendência de reciclar internamente os resíduos gerados no processo siderúrgico já está sendo posta em prática pela maior parte das usinas. Siderurgia e Meio Ambiente é o tema do Capítulo 11, e os diversos tipos de produtos de aço são descritos no Capítulo 12.

REFERÊNCIAS

- 1 MCGANNON, H.E. (ed.). *The making, shaping and treating of steel*. 9. ed. Pittsburgh: United States Steel Co., 1971.
- 2 BARRACLOUGH, K.C. *Steelmaking before Bessemer*. Blister Steel: The Metals Society, 1984. v.1.
- 3 SHERBY, O.D. Ultrahigh carbon steels: Damascus steels and ancient blacksmiths. *ISIJ International*, v. 39, n.7, p.637-648, 1999.
- 4 TYLECOTE, R.F. *A history of metallurgy*. London: The Metals Society, 1976.
- 5 SRINIVASAN, S.; RANGANATHAN, S. *Metallurgical heritage of India*. Disponível em: <<http://metalg.iisc.ernet.in/~wooiz/heritage/Heriitage.htm>>. Acesso em: 11 out. 2006.
- 6 SINGER, C.; HOLMYARD, E.J.; HALL, A.R.; WILLIAMS, I. *A history of technology*. Oxford: Clarendon Press, 1956. v.2.

- 7 BIRINGUCCIO, V. *The pirotechnia of Vannoccio Biringuccio*. New York: The American Institute of Mining and Metallurgical Engineers, 1943. (Seeley W. Mudd series)
- 8 SCHUBERT, H.R. The steel industry. In: SINGER, C.; Holmyard, E.J.; Hall, A.R. *A history of technology*. Oxford: Clarendon Press, 1958. v.5
- 9 AN INTRODUCTION to iron and steel processing. Tokyo : JFE 21ST Century Foundation, 2003. Cap. 2. Disponível em: <http://www.jfe-21st-cf.or.jp/chapter_2/2a_1_img.html>. Acesso em: 18 dez. 2006.

BIBLIOGRAFIA

- 1 AGRICOLA, G. *De Re Metallica*. New York: Dover Publications, 1950.
- 2 BERNAL, J.D. *Science in history*. Cambridge: MIT, 1969. v.2
- 3 MOLERA, I. The farga catalana. In: WAYMAN, M.L. (ed.). *All that glitters: readings in historical metallurgy*. Montreal: Canadian Institute of Mining and Metallurgy, 1989.
- 4 RAYMOND, R. *Out of the fiery furnace: the impact of metals on the history of mankind*. University Park: Pennsylvania State University Press, 1986.
- 5 RICKETTS, J.A. A short history of ironmaking, In: IRONMAKING CONFERENCE, 57., 1998, Toronto. *Proceedings..* Warrendale, PA: Iron & Steel Society, 1998. p. 3-40
- 6 ROSSI, P. *O nascimento da ciência moderna na Europa*. Bauru: EDUSC, 2001.
- 7 SCHUBERT, H.R. Extraction and production of metals: iron and steel. In: SINGER, C; HOLMYARD, E.J., HALL, A.R., WILLIAMS, I. *A history of technology*. Oxford: Clarendon Press, 1958. v. 4.
- 8 SMITH, C.S (ed.). *Sources for the history of the science of steel: 1532-1786*, Cambridge: Society of History of Technology e MIT Press, 1968.
- 9 SMITH, C.S., FORBES, R.J. Metallurgy and assaying. In: SINGER, C; HOLMYARD, E.J., HALL, A.R., WILLIAMS, I. *A history of technology*. Oxford: Clarendon Press, 1956. v. 3.
- 10 WAKELIN, D.H.; RICKETTS, J.A. The nature of ironmaking. In: WAKELIN, D.H. (ed.). *The making, shaping and treating of steel: ironmaking volume*. 11.ed. Pittsburgh: AISE Steel Foundation, 1999.

O objetivo deste capítulo é o de fornecer informações básicas sobre as matérias-primas siderúrgicas e quais são as influências das composições químicas, principalmente das impurezas, e da umidade na produção de aço. Serão analisadas, também, as características físicas desejáveis das matérias-primas para a sua utilização e serão analisados resumidamente os processos de secagem, calcinação, aglomeração e coqueificação. A abordagem será mais do ponto de vista de princípios do que de descrição.

Pouca atenção tem sido dada ao assunto, embora muitas das inseqüências danosas sejam resultantes ou provenientes das matérias-primas. Especificações destas devem ser dinâmicas e coerentes com o desenvolvimento tecnológico e com a disponibilidade-preço. Os fornecedores precisam entender as exigências dos compradores, assim como os utilizadores saberem analisar as conseqüências das pequenas alterações nas especificações, para as alterações necessárias nos processamentos, sempre com objetivo de um menor custo final do produto, porém, atendendo à qualidade do mesmo.

2.1 As Matérias-Primas nos Processos Siderúrgicos Integrados e Semi-Integrados

As matérias-primas essenciais para siderúrgicas integradas são: minérios, redutores, combustíveis, fundentes, sucatas, ferros-liga, desoxidantes, dessulfurantes e refratários. As utilidades são água, oxigênio e energia elétrica.

As siderúrgicas semi-integradas ou aciarias elétricas necessitam, essencialmente, de: sucatas, fundentes, ferros-liga, refratários e as mesmas utilidades de uma usina integrada, porém, com grande consumo de energia elétrica.

2.2 Principais Impurezas Provenientes das Matérias-Primas e Insumo

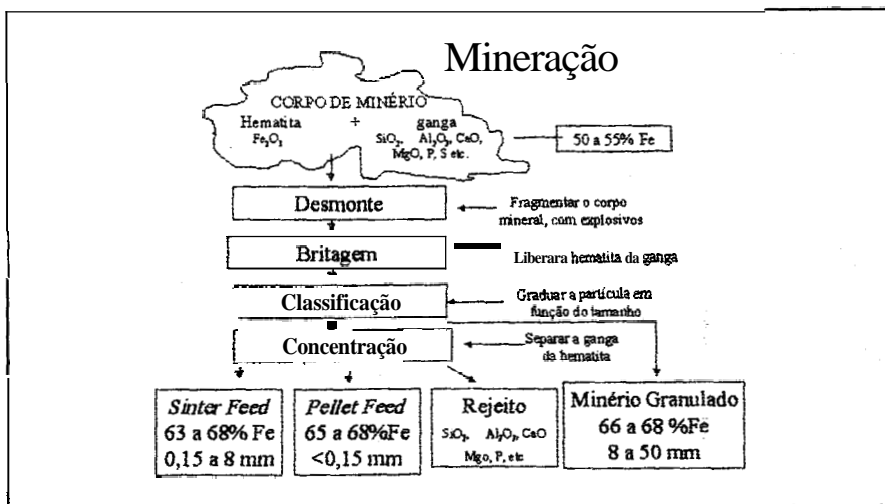
2.2.1 Minérios, aglomerados, combustíveis e sedutores

Os minérios de ferro podem ser hematíticos (Fe_2O_3), magnetíticos (Fe_3O_4), ilmeníticos (FeTiO_3), limoníticos (óxido de ferro hidratado), e outros, porém os de maior importância são os hematíticos e magnetíticos. Os minérios brasileiros são na maioria hematíticos com altos teores de Fe (até 70%) e pouca ganga. Os mesmos são considerados, em qualidade, um dos melhores do mundo. A grande ocorrência de minério de ferro na crosta terrestre (Brasil, África do Sul, Austrália, China, Índia etc.) permite a sua exploração sem receios de exaustão.

A Figura 2.1 mostra um fluxograma para produção de diversos tipos de minério (minério granulado, *pellet feed* e *sinter feed*). Apenas o minério granulado é utilizado diretamente nas usinas siderúrgicas. Os *pellet feed* e os *sinter feed* são utilizados para produção de pelotas e de sinter. Esses processamentos estão descritos mais adiante.

O redutor mais utilizado é o coque metalúrgico, embora o carvão vegetal também tenha sua grande importância. O coque é o produto (resíduo) obtido pela destilação de carvão metalúrgico. O processo de coqueificação está descrito mais adiante.

FIGURA 2.1 - Fluxograma simplificado para produção de minérios de ferro (MOURÃO, 1986).1



Como o produto é um aço, com determinadas propriedades, numa primeira etapa produz-se um ferro de alta pureza para, então, elaborá-lo com adições de elementos de liga (ferro-ligas). Assim, as impurezas contidas nas matérias-primas devem ser eliminadas durante os processos de redução ou fusão e refino.

A maioria das impurezas provenientes das gangas do minério, dos aglomerados e das cinzas dos combustíveis e redutores sólidos é eliminada durante o processo de fusão/redução na forma de escória, tais como alumina, óxido de cálcio e sílica (parte é incorporada ao gusa na forma metálica). Alguns elementos (óxidos mais facilmente reduzidos que o de ferro) são totalmente incorporados ao gusa, tais como o fósforo, cobre etc., e outros são parcialmente incorporados ao metal líquido, como o enxofre, o silício, o manganês e o carbono.

Durante a etapa de refino (purificação), a maioria das impurezas, menos nobres que o ferro, contidas no metal líquido, são eliminadas por oxidação seletiva, tais como o silício, o carbono e o manganês. As mais críticas são as impurezas mais nobres que o ferro, tais como o cobre e o fósforo. O enxofre é uma das impurezas especiais indesejáveis. O fósforo e o enxofre são considerados os "inimigos" do aço pela dificuldade (altos custos) na sua eliminação, e por serem os elementos que afetam negativamente nas propriedades do aço, mesmo em quantidades muito pequenas (menores que 0,003%).

2.2.2 Fluxantes, escorificantes e fundentes

Fluxantes também denominados de escorificantes ou fundentes (normalmente utilizados como sinônimos de maneira não correta) são os materiais adicionados à carga para formação das escórias (escorificantes: reter as impurezas com baixa atividade na escória), durante a fusão/redução ou durante a elaboração do aço, para controlar a composição, basicidade/acidez e potencial de oxidação das escórias ou para melhorar a fluidez destas (fluxante: aumenta a fluidez e facilita as reações e separação metal-escória). Os fundentes são materiais que dissolvem a ganga/escória e formam uma solução com menor temperatura *líquidus*, permitindo assim que o processo seja viabilizado a baixas temperaturas. Em consequência dessa propriedade os

fundentes agem também como fluxantes. Normalmente os fluxantes, escorificantes e fundentes são óxidos ou carbonatos, fluoretos e eventualmente cloretos.

Os óxidos e carbonatos são os mais utilizados por serem ambientalmente mais saudáveis: óxidos de cálcio, de magnésio, de silício, de bário etc., ou os correspondentes carbonatos contendo estes componentes, tais como o calcário, dolomita, magnesita. Os carbonatos durante o processamento são decompostos em óxidos correspondentes e dióxido de carbono (evolução de gases) por uma reação bastante endotérmica, portanto, consumindo calor. Os carbonatos só podem ser utilizados se o balanço térmico e o perfil térmico dos processos forem favoráveis.

O fluoreto de cálcio (fluorita) é um eficiente fluxante, melhorando a fluidez das escórias siderúrgicas, porém, a sua característica de dissolver óxidos, também, afeta negativamente pelo desgaste mais intenso dos refratários. Além disso, os gases emanados não são ambientalmente saudáveis.

Os cloretos são muito raramente utilizados na siderurgia. As utilizações mais comuns são em sais de tratamentos térmicos e em processamento de metais não ferrosos.

As impurezas indesejáveis são o fósforo, o enxofre, os álcalis (Na, K) e metais voláteis (Zn, Cd) e, em alguns casos, cloretos. Entre os utilizados na aciaria, as mais críticas são enxofre e fósforo.

2.2.3 Sucatas

Nas siderúrgicas integradas as sucatas são adicionadas (até aproximadamente 20%) nas cargas dos conversores com benefícios econômicos, e servem para controlar a temperatura **final** do aço.

Nas siderúrgicas semi-integradas, de aciaria elétrica, a sucata é a matéria-prima mais importante.

As sucatas geradas internamente, normalmente, não contêm impurezas indesejáveis, a menos das sucatas geradas de aços especiais contendo elementos mais nobres que o ferro, por exemplo: cobre, chumbo etc., e geradas de aços revestidos com zinco ou estanho (galvanizados ou estanhados).

As sucatas adquiridas de terceiros contêm impurezas das mais diversas, tais como, enxofre, cobre, antimônio, arsênio chumbo, zinco, cromo, níquel, cobalto, vanádio, tungstênio, molibdênio, silício, nióbio etc., além de contaminações com óxidos de silício, alumínio, cálcio, ferro etc.

As impurezas nocivas podem ser classificadas segundo:

- **As mais nocivas:** S (para sua eliminação exige condições especiais de alta basicidade e redutoras); Cu, As, Sb, Ni (estes, por serem elementos mais nobres que o ferro, não podem ser eliminados, por oxidação seletiva, na fase oxidante da fabricação de aços).
- **Nocivas:** P (exige condições oxidantes e de alta basicidade); Zn (por conter teores elevados diminui o teor de ferro contido, gera mais gases, aquece as tubulações do sistema de limpeza dos gases por re-oxidação com o ar e gera mais poeiras).
- **Impurezas menos nocivas:** elementos facilmente oxidáveis durante a fase oxidante da fabricação de aços não são críticos principalmente se as especificações finais nos aços não exigem teores muito baixos destes. Estão nesta categoria: Al, Ti, Zr, Nb, Cr, V, Si, Mn, C.

Elementos que são mais nobres que o ferro, porém, por apresentarem alta pressão de vapor, nas temperaturas de elaboração de aços, são eliminados para a fase gasosa. Estes são: Pb, As, Sb, Cd, Hg.

2.2.4 Desoxidantes, dessulfurantes, ferros-figa e outras adições finais

Os desoxidantes principais na siderurgia são: Fe-Si, Fe-Si-Mn e Al. Como contêm componentes que apresentam alta afinidade pelo oxigênio, são oxidados pelo oxigênio dissolvido no aço e formam os correspondentes óxidos estáveis que devem ser incorporados nas escórias. De qualquer forma, a fase de desoxidação é uma fase redutora do processo de fabricação de aços e, assim sendo, os teores de impurezas de elementos mais nobres que o dos elementos desoxidante são indesejáveis, pois tendem a ser incorporados no aço. O fósforo é a impureza mais crítica, pois não há possibilidade de ser removida nas etapas posteriores. O enxofre, também, é uma outra impureza crítica, principalmente nos processos que não passam pela dessulfuração final.

Processos de Preparação de Matérias-primas Siderúrgicas

Os dessulfurantes como Ca, Mg, Ca-Si, Terras Raras, CaO, MgO, Ca-Mg, se utilizados na etapa final da fabricação do aço, não devem conter principalmente o fósforo.

Os ferros-liga são basicamente ligas-mãe que são utilizadas para adições de elementos de ligas nos aços (Fe-Mn, Fe-V, Fe-Cr, Fe-Mo, Fe-W, Fe-Ni, Fe-Zr, Fe-Nb etc.). Como são adições finais na elaboração dos aços todas impurezas contidas nos ferros-liga vão ser incorporadas a eles. Assim, todas impurezas contidas nos ferros-liga podem ser críticas de acordo com as especificações dos aços. Em relação aos aços microligados, por conterem baixos teores de elementos de liga, as impurezas contidas nas adições não afetam tanto quanto em aços-ligas, contendo teores médios (aços de construção mecânica, aços ferramenta), e altos de elementos de liga (aços inoxidáveis, aços resistentes às altas temperaturas). Novamente, as impurezas mais críticas são o fósforo e o enxofre. Os ferros-liga produzidos por redução carbotérmica, por conterem alto teor de carbono, normalmente, não permitem a sua utilização como adições finais. Os ferros-liga produzidos por redução metalotérmica, normalmente, contêm teores de Si ou Al como impurezas, porém comumente não são críticas. Adições finais para acerto de composição, também, podem ser feitas por metais "puros" e as impurezas devem ser controladas tal como descrito anteriormente.

Estas adições por serem feitas nas etapas finais exigem, também, que o controle de umidade seja rigoroso para alguns tipos de aços cujos teores de hidrogênio são críticos. Parte da água (umidade) será reduzida e o hidrogênio será incorporado ao banho.

2.2.5 Impurezas provenientes de outros insumos

Combustíveis podem conter enxofre que pode, parcialmente, ser absorvido no metal. Os comburentes, tais como o ar e o oxigênio, também podem contaminar os aços com oxigênio, nitrogênio e hidrogênio (este proveniente da umidade do ar).

Dependendo do tipo de aço, as contaminações podem vir pelas reações de redução de óxidos metálicos contidos nos refratários, pela reação entre os elementos do metal líquido e o refratário.

2.3 Características Físicas Desejáveis das Matérias-Primas

2.3.1 Granulometria

Os princípios básicos que regem as especificações quanto ao tamanho e distribuição das partículas ou materiais são:

- **Permeabilidade:** Em processos de leito fixo ou praticamente fixo (exemplos: redução em alto-forno, sinterização de minérios e alguns casos de secagem e calcinação), onde há contra-corrente de gases, há necessidade de que a carga apresente uma permeabilidade mais homogênea possível para que o fluxo gasoso (por exemplo, os gases redutores no alto-forno) se distribua, também, de maneira mais homogênea possível. Presença de partículas finas conduzem à inviabilização do processo ou à geração excessiva de poeiras (particulados carregados pelos gases). Sob esse aspecto, seria desejável que as matérias-primas ou aglomerados se distribuíssem dentro de uma pequena faixa granulométrica. Pelotas seriam desejáveis em relação ao minério bitolado para carga nos altos-fornos.
- **Velocidade de reação:** As reações que ocorrem topoquimicamente, tais como as de redução, calcinação, combustão, dissolução, são dependentes do tamanho das partículas. Partículas menores são desejáveis, tais como na combustão de particulados sólidos e na dissolução de sólidos em líquidos. Os processos endotérmicos, tais como os de calcinação e redução, são mais dependentes do tamanho das partículas. As restrições que ocorrem quanto ao menor tamanho para cada processo são: quanto à geração de poeiras durante a manipulação e carregamento por fluidização em processos envolvendo fase gasosa (ex. redução, calcinação, secagem, fusão etc.); e para que a permeabilidade da carga não seja afetada em processos de leito fixo envolvendo fases gasosas (reduções carbotérmicas e por hidrogênio, calcinações, ustulações etc.), como visto antes.
- **Fluidização:** É a propriedade de uma dada partícula sólida de se manter em suspensão num fluido com uma dada viscosidade e com uma dada velocidade no sentido ascendente. É função também do tamanho das partículas, das formas das partículas, da densidade da partícula, da tensão superficial e superfície específica. Os processos de leito fluidizado, no entanto, exigem que os materiais de mesma natureza apresentem tamanho

Processos de Preparação de Matérias-Primas Siderúrgicas

de partículas dentro de uma faixa granulométrica estreita, pois para dadas propriedades do fluido e sua velocidade, as partículas pequenas seriam carregadas pelo fluido e as grandes sofreriam decantação.

- **Transmissão térmica:** Processo como o de calcinação em que a reação é fortemente endotérmica e que ocorre de maneira topoquímica (~~interface de reação que vai avançando da superfície para o interior da partícula~~), normalmente, é controlado por transmissão térmica. O calor necessário para suprir a reação endotérmica precisa, a partir da superfície da partícula, ser conduzido através da camada já calcinada até a interface de reação. Quanto menor a partícula mais facilmente este objetivo é atingido, porém, valem as restrições apontadas quanto à fluidização, ao carregamento e à permeabilidade da carga. Partículas com distribuição granulométrica estreita são desejadas, admitindo-se uma boa distribuição térmica no reator.
- **Segregação:** Materiais de mesma natureza e mantidas as demais características constantes apresentam ângulos de repouso diferentes, em função do tamanho das partículas. Assim, num empilhamento as partículas maiores tendem a rolar mais facilmente e se concentram mais na base do que no topo. O mesmo comportamento ocorre no carregamento de um grande reator, por exemplo, num alto-forno.

2.3.2 Densidades aparente e real

~~A densidade real é uma característica do próprio material, porém, a densidade aparente depende do material, da distribuição granulométrica, da forma das partículas e das porosidades. A mistura de materiais de densidades diferentes é dificultada pois há tendência à segregação durante o manuseio, carregamento e distribuição da carga, dentro de um reator. Outra influência da densidade é na adição das matérias-primas durante a desoxidação, dessulfuração ou acerto de composição química de aços. Materiais com densidade menor que a da escória sobrenadam nela, se não forem agitadas ou mergulhadas no banho para que sofram dissolução. Para materiais com densidade intermediária (maioria das adições) entre escória e o banho metálico, as velocidades de reação melhoram, porém, normalmente, são recomendadas as técnicas de injeção. Materiais de alta densidade, mas de~~

densidade aparente baixa, associada às partículas pequenas, por efeito de tensão superficial, podem também flutuar sobre a escória ou sobre o banho.

2.3.3 Área superficial

A área superficial está relacionada com o tamanho, a forma e a porosidade das partículas. Como já comentado, ela influi favoravelmente na maioria das reações metalúrgicas, principalmente, as controladas por reação química na superfície (reduções, dissoluções). As inconveniências são: maior friabilidade e menor densidade aparente.

2.3.4 Tensão superficial / Molhabilidade

Esta propriedade afeta principalmente a aglomeração e a dissolução de adições de partículas sólidas no banho metálico ou na escória. Quanto mais o material é molhado pela fase líquida melhor, isto é, quanto menor for o ângulo de contato entre o material e o líquido (Figura 2.2).

(θ)

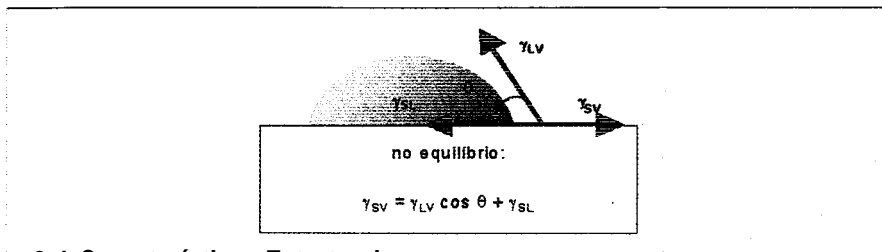


FIGURA 2.2 - Diagrama ilustrativo do equilíbrio de vetores.

2.4 Características Estruturais

Dependendo de como são as estruturas das matérias-primas elas podem influenciar as velocidades das reações metalúrgicas. Assim, os materiais formados de cristais (grãos) pequenos, com porosidades abertas, e trincas (fissuras) são mais desejáveis que os materiais de estrutura compacta. Durante os processos de redução controlados por difusão, as características citadas são importantes quando o material é submetido às altas temperaturas (acima de 300°C), a vaporização brusca da água contida no material compacto pode

levar à sua degradação (fenômeno de crepitação, com geração de partículas finas), quando as pressões internas superam a resistência mecânica do material. Estruturas compactas, também, são mais susceptíveis ao inchamento, pois diminuem os pontos de nucleação se comparados com materiais mais porosos.

2.5 Características Químicas e Mineralógicas

Em relação à composição química, quanto mais pura for a matéria-prima menos energia consumirá, gerará menos escória, necessitará de menos adições/corretivos e o processo será mais eficiente. Componentes puros apresentam as suas atividades químicas elevadas (por definição, na escala Raoultiana a atividade de componente puro é igual a 1). As matérias-primas normalmente vêm associadas às impurezas, e quando estas formam soluções sólidas ou compostos (simples ou complexos) com o componente principal, a atividade química deste diminui e, assim, diminui também as reações desejadas – por exemplo, as reações de redução de monóxido de ferro – "FeO" para Fe – fica dificultada se durante a sinterização do minério de ferro formar a fayalita (2FeO.SiO₂). A presença de fases hidratadas, umidades ou matérias voláteis em matérias-primas, dependendo do processo, poderá conduzir à crepitação ou à projeção de banho/escória. Na etapa final de fabricação do aço, materiais contendo fases hidratadas ou contendo umidade ou matérias voláteis devem ser evitados. A dissolução dos ferros-liga nas adições em aços depende, também, da composição química, a qual influi na temperatura *liquidus* do ferro-liga, assim como nas fases presentes nestas.

2.6 As Propriedades Desejadas das Matérias-Primas e os seus Ensaios

2.6.1 Propriedades a frio

Os materiais durante o manuseio, transporte, carregamento dos reatores, mistura e eventual classificação não devem se degradar por ruptura (fratura) ou desgaste. Esta resistência à degradação (geração de partículas finas por abrasão ou ruptura) pode ser avaliada pelos ensaios de tamboreamento, queda, compressão. A descrição dos ensaios pode ser encontrada em Mourão (1986).¹

2.6.2 Propriedades a quente

As matérias-primas quando carregadas nos reatores necessitam apresentar comportamentos tanto físicos (degradação) como químicos (redução e reatividades), os quais viabilizem o processo. As principais propriedades ensaiadas são: resistência à degradação por crepitação; degradação por inchamento; degradação a baixas temperaturas e por perda de resistência à compressão a altas temperaturas; redutibilidade e reatividade.

- **Crepitação:** Crepitação é o fenômeno de degradação por ruptura de material em partículas menores, quando submetido bruscamente a temperaturas acima de 300°C . A causa principal é a presença de umidade interna ou matérias voláteis ou água de cristalização ou carbonatos que, com o aquecimento, se vaporizam ou se decompõem formando fase gasosa, podendo aumentar a pressão no interior dos materiais, fraturando-os em partículas menores. É função do nível e da natureza de porosidade, assim como da quantidade e natureza dos componentes passíveis de formação da fase gasosa.
- **Inchamento:** Inchamento é o fenômeno de aumento de volume que alguns minérios de ferro e aglomerados apresentam durante a sua redução por carbono. Há o inchamento estrutural quando a hematita (Fe_2O_3) é reduzida para magnetita ou wustita (Fe_3O_4 ou " FeO "). Durante esta transformação estrutural acabam gerando trincas e, portanto, inchando. Os inchamentos, propriamente ditos, os catastróficos, ocorrem na etapa de redução carbotérmica de " FeO " para o Fe metálico, e são originados pelo crescimento filamentar de ferro durante a redução carbotérmica, que ocorrem na faixa de temperatura de 900°C a 1.050°C . Quando isso ocorre praticamente inviabiliza os processos de redução. Maiores detalhes podem ser encontrados em Mourão, Nascimento e Capocchi (1997).²
- **Degradação durante redução à temperatura baixa:** Este é um fenômeno que ocorre, principalmente, devido à transformação estrutural quando a hematita é reduzida à magnetita ou à wustita, a temperaturas baixas, da ordem de 550°C . A hematita do tipo romboédrico parece apresentar maior susceptibilidade a esta degradação, assim como o aumento dos teores de Al_2O_3 . Por outro lado, pequenos teores de Cl_2 e/ou SO_2 ,

Processos de Preparação de Matérias-Primas Siderúrgicas

normalmente presentes em Alto-Fornos, podem diminuir drasticamente este tipo de degradação (DAWSON,1993).³

- **Resistência a compressão:** Perda de resistência à compressão a altas temperaturas (600°C a 1.000°C). A perda de resistência a altas temperaturas está associada ao inchamento e aos materiais aglomerados com cura a frio. Os aglomerados de cura a frio que utilizam aglomerantes orgânicos perdem a resistência com a decomposição desses componentes, Já nos aglomerados com aglomerantes inorgânicos (por exemplo, o cimento), a alta resistência é obtida pela hidratação dos componentes e estes, quando se decompõem com a temperatura (na faixa de 600°C a 900°C), também, perdem a resistência mecânica (MANTOVANI e TAKANO, 2000).⁴
- **Redutibilidade:** Redutibilidade é a propriedade do minério ou do aglomerado de ser mais ou menos facilmente reduzido pela fases gasosas (CO, H₂, ou CO + H₂). Ela depende principalmente da estrutura do material, granulometria, porosidade, mineralogia e trincas. A Tabela 2.1 mostra que a redutibilidade da fayalita (2FeO.SiO₂) é praticamente 50 vezes menor do que da hematita natural (SRB e RUZICKOVA, 1988).⁵ Os ensaios são padronizados (SRB e RUZICKOVA, 1988).⁵

TABELA 21 - Efeito da composição mineral na redutibilidade de minério de ferro.

MINERAL	REDUTIBILIDADE (%)
Hematita natural	49,9
Magnetita natural	26,7
CaO. Fe ₂ O ₃	40,1
2CaO. Fe ₂ O ₃	28,5
2FeO.SiO ₂ (fayalita)	1

- **Reatividade:** É uma propriedade cinética importante dos carvões e coque. São normalmente classificadas em oxireatividade (nas reações de combustão com ar ou O₂); carboreatividade (nas reações com CO₂ -Boudouard); hidreoreatividade (reação com H₂O); e tioreatividade (reação com o S). Do ponto de vista metalúrgico quando se fala em reatividade confunde-se com a carboreatividade. Ela depende principalmente da estrutura, da mineralogia, da porosidade e da granulometria dos carvões e coques. O carvão vegetal por apresentar uma estrutura bem porosa e, portanto, com alta superfície específica, é o que tem maior reatividade em relação ao carvão mineral e ao coque. Os ensaios também são padronizados (MOURAO, 1986).¹

2.7 Os Processos de Preparação das Matérias-Primas

2.7.1 Os tratamentos de minérios

O processo de tratamentos de minérios visa adequar os minérios para sua utilização nas indústrias processadoras (metalúrgica, construção civil, química, cerâmica etc.), principalmente quanto à granulometria e aos teores de impurezas (diminuição dos teores de ganga). Não será objeto de análise deste capítulo, pois foge do escopo e pode ser encontrado em Chaves (1996).⁶ Basicamente as operações unitárias envolvidas são: cominuição (britagem e moagem); separação granulométrica (peneiramento e classificação); separação para concentração (flutuação, separação magnética, gravítica por meio denso; etc.); separação sólido-líquido (filtração e decantação ou espessamento) separação sólido-gás (filtração, lavagem, precipitadores eletrostáticos).

2.7.2 Secagem

A secagem tem por objetivo a eliminação da umidade do material (água superficial e água interna contidas nas porosidades), porém, não as águas de cristalização. A umidade pode ser de água adsorvida (fisicamente) ou absorvida (quimicamente) nas superfícies.

A necessidade de secagem de materiais decorre de diversos fatores, tais como: necessidade técnica para manuseio, para mistura e homogeneização de materiais, para evitar incorporação de hidrogênio no aço, para evitar geração excessiva de gases, para evitar crepitação; necessidade de segurança para evitar explosões pela evolução instantânea de vapor de água (exemplo: vazamento de metal líquido sobre material muito úmido); necessidade econômica para diminuir o custo de transporte.

De modo geral, o processo de secagem necessita de muita energia (a reação de vaporização da água é uma reação endotérmica que consome 44,5 kJ/mol de água), porém, a temperatura não necessita ser alta (acima de 100° C e da ordem de 200° C a 300° C, a pressão de 1 atmosfera). Assim, muitos processos industriais dispõem de gases efluentes a estas temperaturas e são combustíveis de baixo poder calorífico.

Processos de Preparação de Matérias-Primas Siderúrgicas

A secagem, também, pode ser feita em atmosferas com pressão de vapor menor que a de equilíbrio, a temperaturas inferiores a **100° C**.

Em alguns casos, a temperatura máxima fica limitada para que o material não oxide ou entre em combustão ou elimine componentes voláteis (por exemplo, secagem de carvão).

O princípio termodinâmico está na pressão máxima de vapor d'água definido pela reação de vaporização e calculado por:



onde $\Delta H_{298} = + 44.500 \text{ J/mol}$ (endotérmico) (GASKELL, 1973)⁷ e a variação de energia livre pode ser representada por :

$$\Delta G^\circ = A + BT \quad (2.2)$$

e considerando o equilíbrio líquido-vapor tem-se:

$$\Delta G^\circ = A + BT = - RT \ln p_{H_2O} \quad (2.3)$$

Portanto, a pressão máxima de vapor d'água (p_{H_2O}) em função da temperatura pode ser calculada pela expressão:

$$\ln p_{H_2O} = - \frac{A}{RT} - \frac{B}{R} \quad (2.4)$$

onde A e B são também função de temperatura e que podem ser estimadas por A = AH (variação da entalpia de vaporização em função da temperatura), B = AS (variação da entropia da mesma reação em função da temperatura), R=constante universal dos gases e T = temperatura absoluta em K.

A expressão final acaba ficando complexa e não será reproduzida aqui. Maiores detalhes consultar Chaves (1996)⁶ onde estão também as tabelas contendo as pressões máximas de vapor d'água para as variações de temperatura.

A Figura 2.3 mostra de maneira esquemática o diagrama de fase de água, onde o equilíbrio líquido-vapor está representado pela curva BB'.

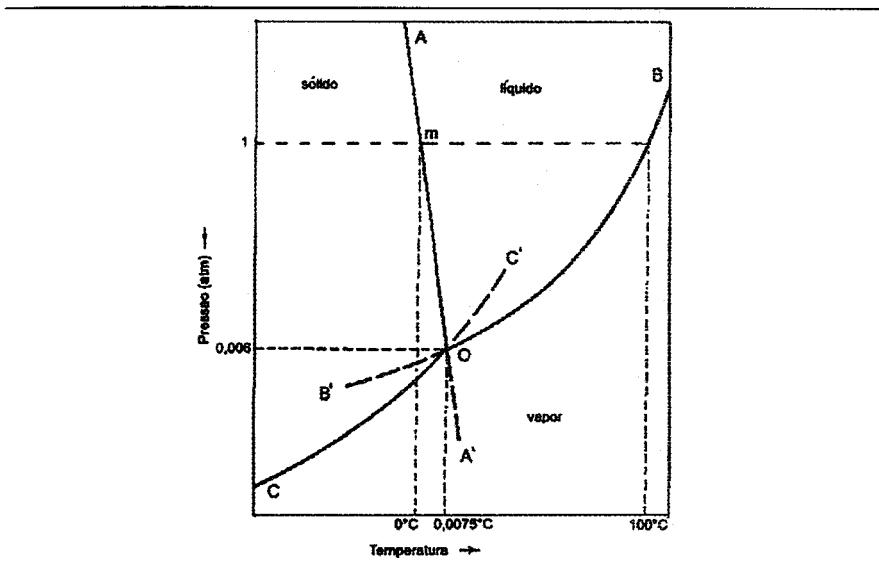


FIGURA 2.3 -
 Representação
 esquemática do diagrama
 de fase de água
 (GASKELL, 1973).⁷ A
 curva BB' representa
 a pressão máxima de vapor
 da água em função da
 temperatura.

De outro lado, a reação reversa de **condensação**, também, é determinada pela expressão descrita. Assim, se num leito de secagem, os gases quentes atingirem a **saturação** (equilíbrio entre a umidade no material e o vapor d'água contido nos gases), a uma dada temperatura T, ela deixará de prosseguir com a secagem.

Se num instante posterior este gás saturado atingir regiões de temperaturas inferiores a T, o vapor contido **condensará aumentando** a umidade desta região. A análise de um processo de secagem consiste em correlacionar as seguintes variáveis: umidade inicial, umidade final, transmissão térmica, velocidade de secagem, temperaturas iniciais e finais dos gases e do material, pressões parciais de vapor d'água para diferentes temperaturas (perfil térmico), balanços térmicos etc.

2.7.3 Calcinação

O processo de **calcinação** deriva da reação de decomposição de carbonato de cálcio, porém o termo tem uma abrangência maior. O termo é utilizado, também, para todos carbonatos (ex. dolomita, magnesita) e para eliminação da água de hidratação (alumina hidratada, cal hidratada etc).

Processos de Preparação de Matérias-Primas Siderúrgicas

É um processo bastante endotérmico, muito mais que o de secagem, e portanto exige fornecimento de energia em grande quantidade para as transformações de carbonatos e hidratos em óxidos correspondentes. Além disso, necessita de temperaturas relativamente elevadas, normalmente de 600° C a 1.100° C e por ser endotérmica a frente de reação vai avançando da periferia da partícula para o seu interior à medida que as condições termodinâmicas (temperatura e pressão) e cinéticas sejam satisfeitas. O aporte térmico para "a frente de reação" é prejudicado pela baixa condutividade térmica do óxido formado.

As reações de calcinações podem ser genericamente representadas por:



e a variação da energia livre de Gibbs pode ser descrita como

$$AG^\circ = A + BT \quad (T \text{ em Kelvin}), \quad (2.7)$$

onde os coeficientes e as constantes são semelhantes ao definido na reação (2.4) de secagem.

Para as condições de equilíbrio, tem-se, com o mesmo raciocínio empregado na secagem, que as pressões de equilíbrio de CO_2 e $H_2O_{(v)}$ podem ser determinadas em função de temperatura por:

$$\Delta G^\circ = A + BT = -RT \ln k = -RT \ln p_{H_2O} \text{ ou } -RT \ln p_{CO_2} \quad (2.8)$$

Portanto:

$$\ln p_{CO_2} \text{ ou } \ln p_{H_2O} = -\frac{A}{RT} - \frac{B}{R} \quad (2.9)$$

Assim, para a reação de decomposição do carbonato de cálcio tem-se:



onde $\Delta H_{298} = +177.800 \text{ J/mol}$ e

$$AG^o = +168.406 - 143,93T \text{ J/mol} \quad (2.11)$$

que resulta na expressão aproximada de:

$$\ln p_{CO_2} = 17,374 - \frac{20238,28}{T}, \text{ com } p_{CO_2} \text{ em atm} \quad (2.12)$$

Os resultados estão mostrados na Figura 2.4.

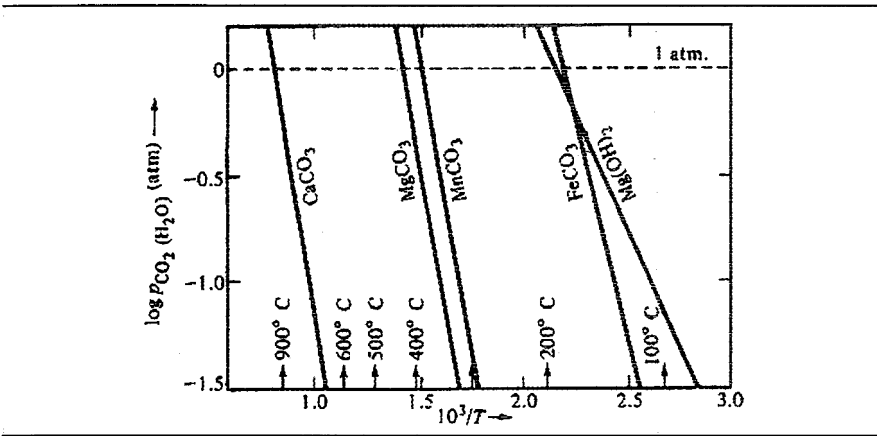


FIGURA 24 - Pressões de equilíbrio de CO_2 e de H_2O em função de temperatura na calcinação (ROSENQUIST, 2004).⁸

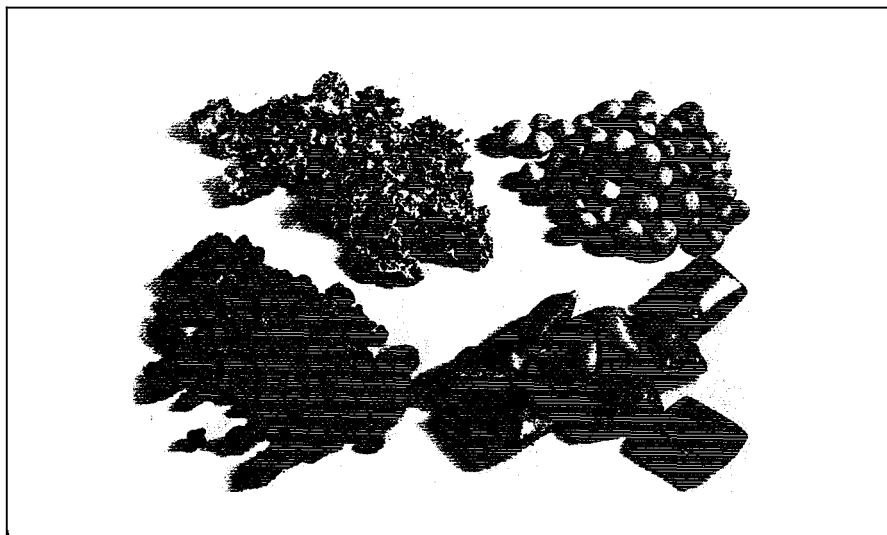
Pode-se verificar na Figura 2.4 que o processo é bastante sensível às variações de temperatura (reação bastante endotérmica).

Resumidamente, pode-se dizer que as características importantes do processo de **calcinação** são: é uma reação bastante endotérmica; o produto calcinado é pouco condutor térmico; a reação vai ocorrendo da parte externa da partícula para a região **central**; tendo aporte térmico suficiente, a reação é controlada por transmissão térmica; o processo é **favorecido** com **granulometrias menores**, desde que seja também evitada a perda por arraste por gases e permita **permeabilidade** homogênea dos gases; os **parâmetros** de controle são: perfil de temperatura, o balanço térmico **estagiado** (em pelo menos zonas de combustão e superaquecimento, de **calcinação** propriamente dita e zona de preaquecimento), granulometria da carga, fração não **calcinação** do produto, e reatividade do produto.

2.7.4 Aglomeração

Os processos de aglomeração (sinterização, pelotização e briquetagem) objetivam **transformar** os finos de matérias-primas em aglomerados **que** viabilizem a utilização em processos metalúrgicos. **Podem**, também, ser utilizados para permitir manuseios (transporte e **carregamento** de reatores com menor geração de poeira). Os finos podem ser gerados **durante** a extração, numa mina, de minério granulado (bitolado). Esses finos podem ser gerados por cominuição, para permitir a concentração do **minério**, ou deliberadamente cominuído para **que** seja passível de aglomeração. Os processos de aglomeração **surgiram** primeiramente com o objetivo de aproveitar a grande quantidade de finos **que** ficavam **acumulados durante** a **produção** de minérios **granulados** ou para aproveitamento de minérios pobres em ferro que necessitavam de concentração prévia (os taconitos dos Estados Unidos). Os comportamentos mais eficientes dos aglomerados em relação aos minérios bitolados, principalmente de **redução** em alto-fornos, fizeram **que** os minérios fossem deliberadamente **cominuídos** para se **tornarem** passíveis de aglomeração. Os processos de aglomeração largamente **utilizados** na **siderurgia** são o de sinterização e o de pelotização. Na **Figura 2.5** **podem** ser vistos os aglomerados de minério de ferro.

FIGURA 2.5 - Aspectos dos aglomerados de minério de ferro. Sínter (topo a esquerda) e no sentido horário, **pelotas**; **briquetes**; e **nódulos** (WAKELIN, 1999).⁹



- **Processo de sinterização de minério** - O processo de sinterização consiste em aglomerar, por fusão incipiente, uma mistura de finos, porém não tão finos, de minério, de coque ou carvão vegetal, de fundentes, de sínter de retorno e água. O calor necessário é fornecido pela combustão de coque ou de carvão vegetal contido na carga com o oxigênio do ar. O ar é sugado pela parte de baixo da carga. Uma vez iniciada a ignição na parte superior da carga a combustão prossegue à medida que o ar entra em contato com as partículas de coque ou carvão vegetal formando uma "frente de combustão". Assim, o ar frio que é sugado esfria o sínter e este preaquece o ar antes da queima do coque ou carvão. A combustão localizada provoca uma fusão parcial da carga na região mais quente (frente de combustão) e o gás quente de combustão constituído principalmente de CO_2 , N_2 e O_2 vai preaquecendo a carga logo abaixo. É um processo com bom rendimento térmico. No entanto, para que isso aconteça é necessário que haja um bom controle da permeabilidade da carga, isto é, possibilite a passagem homogênea dos gases e do ar, com vazão certa. Para isso, a água que é adicionada atua de maneira preponderante, fazendo que as partículas bastante finas fiquem aderidas (aderentes) às mais grossas (nucleantes). Quando as partículas são muito finas, pode-se fazer uma micropelotização prévia.

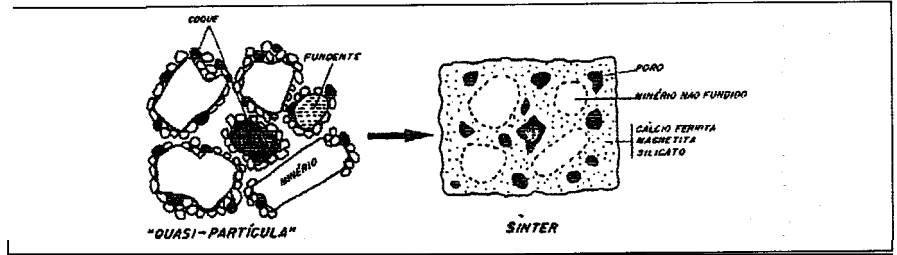
Verifica-se, portanto, que a granulometria das matérias-primas é importante. O desejável seria que as partículas de minério estivessem preponderantemente na faixa de 0,5 mm a 7 mm e do coque entre 1 mm e 10 mm. No entanto para efeitos industriais é possível admitir, para minérios, faixas mais largas com frações maiores até 10 mm e até 25% de fração fina menor que 0,100 mm. A quantidade de coque utilizada é da ordem de 4% da carga. A temperatura máxima atingida na zona de combustão deve ser da ordem de 1.300° C a 1.400° C. Temperaturas menores resultam em sínter menos resistente e temperaturas maiores resultam em fusão exagerada da carga com formação da fase líquida e esta fase diminui drasticamente a permeabilidade comprometendo o processo. Além disso, temperaturas elevadas resultam num sínter com maior quantidade de materiais vítreos e cristalino, os quais são menos redutíveis.

Durante o processamento, parte do enxofre contido na carga é eliminada na forma gasosa (SO_2), juntamente com os gases de combustão.

Processos de Preparação de Matérias-Primas Siderúrgicas

A Figura 2.6 mostra um esquema simplificado da mistura, com as partículas finas (aderentes) aglomeradas sobre as partículas maiores e estrutura porosa de um sinter.

FIGURA 2.6 - Esquema da mistura úmida da carga e o sinter resultante (ROCHA, 1986).¹⁰



As Figuras 2.7 e 2.8 ilustram o processo.

FIGURA 2.7 - Esquema do avanço da frente de combustão, deixando a parte superior sinterizada e fria, e a parte inferior ainda a sinterizar (ROCHA, 1986).¹⁰

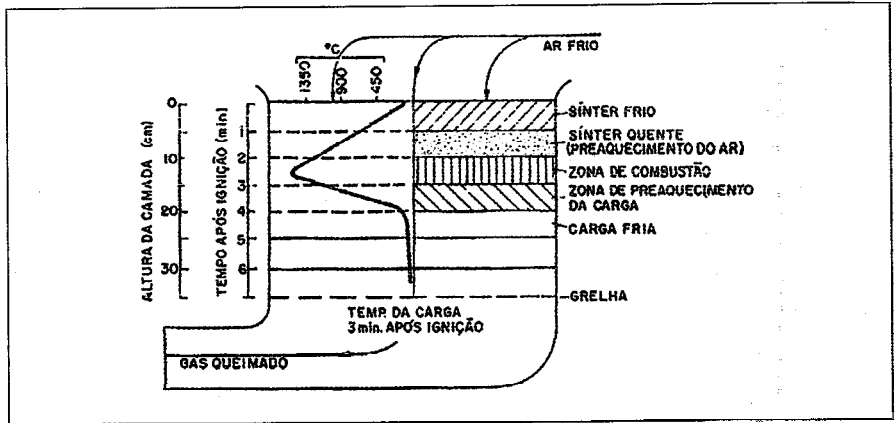
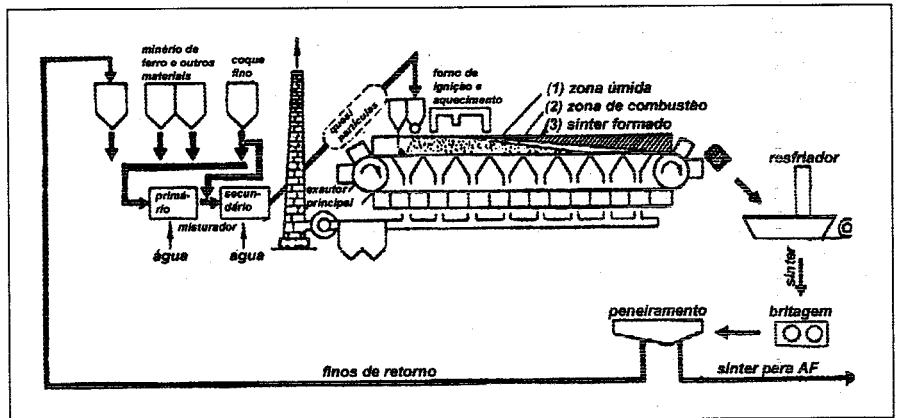


FIGURA 2.8 - Processo de sinterização em grelha móvel (ROCHA, 1986).¹⁰



Os mecanismos básicos de sinterização são:

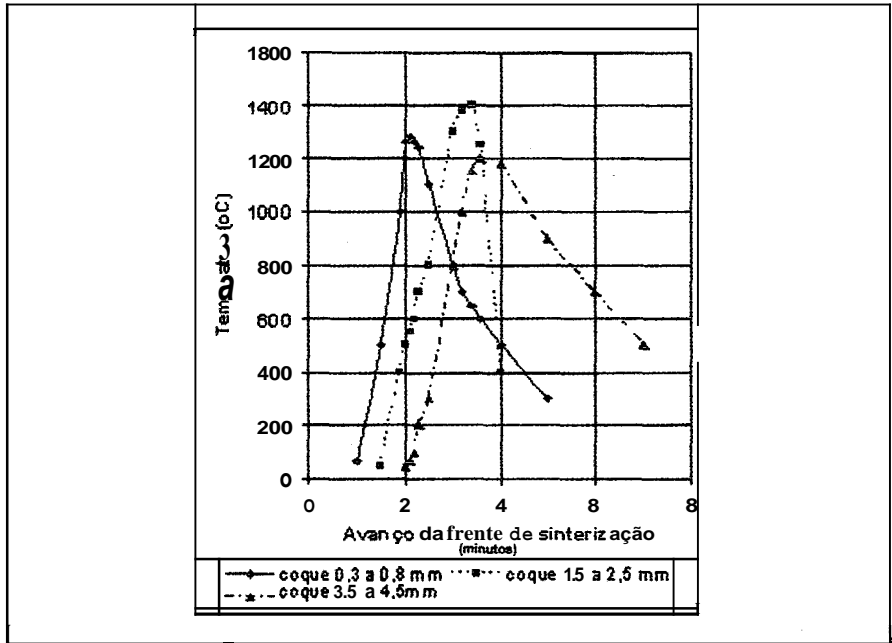
- a combustão de finos de coque com o ar eleva localmente a temperatura para 1.300°C a 1.400°C o que faz que a mistura de particulados finos - aderentes (óxidos de ferro e adições de cal ou calcário) - forme ferritas de cálcio, que se fundem parcialmente e, a seguir, dissolvam os componentes silicosos da ganga do minério (DAWSON, 1993);³
- durante o aquecimento, a fusão parcial e o resfriamento, há reações de formações de fases de ferritas de cálcio ($n\text{CaO}\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$) assim como de fases vítreas contendo SiO_2 , Al_2O_3 , FeO , CaO ;
- o ar que está sendo sugado deixa porosidade nesta fase líquida antes de solidificá-la, resultando em um produto típico com grande porosidade interconectada.

Em relação à qualidade do sinter, deseja-se uma boa redutibilidade e uma boa resistência mecânica. Para conferir boa redutibilidade é importante que se formem ferritas de cálcio e, para tanto, é necessária uma composição da mistura com relação CaO/SiO_2 maior que 1,8 (DAWSON, 1993).³ Picos de temperaturas elevadas, excedendo 1.300°C , conferem maior resistência mecânica, provavelmente, devido à formação de maior quantidade da fase líquida, porém, diminuem as quantidades de ferritas de cálcio (DAWSON, 1993)³ e, também, a produtividade pela diminuição de permeabilidade.

A produtividade na sinterização é bastante dependente do tipo de perfil térmico e da velocidade de seu avanço, que, por sua vez depende do tamanho das partículas, da reatividade do combustível e das permeabilidades da mistura durante a sinterização.

Deseja-se um perfil térmico estreito e de alta temperatura. O combustível deve se queimar num tempo entre 1 a 3 minutos. Mantidas as permeabilidades, a distribuição granulométrica do combustível (finos de coque) que resulta em melhor perfil é entre 1,5 mm e 2,5 mm (Figura 2.9). Na prática, recomenda-se entre 0,3 mm a 3 mm. Tamanhos maiores resultam em tempo maior para queima e alargam o perfil térmico, diminuindo o pico de temperatura. Partículas finas fazem que a frente de combustão avance com maior velocidade que a de transmissão térmica.

FIGURA 2.9 - Efeito do tamanho do coque no perfil térmico da frente de sinterização (BORDON e TAKANO, 1995).¹¹



As μ durante o processo de sinterização são essenciais para que o ar atinja a frente de combustão e que os gases gerados percolem a camada ainda não sinterizada. A camada já sinterizada, praticamente, não apresenta resistência ao fluxo gasoso, dada à sua grande porosidade interconectada. As duas principais resistências ao fluxo gasoso são decorrentes da camada da mistura a sinterizar e da presença da fase líquida viscosa na zona da frente de combustão.

A permeabilidade da mistura a sinterizar (camada compacta antes da ignição) depende:

- da quantidade de finos menores que 0,2 mm (aderentes); e
- da quantidade de água adicionada durante a mistura. O comportamento do escoamento de ar nesta camada pode ser descrita pela equação de Ergun (ROSENQUIST, 2004):⁸

$$\frac{\Delta p}{l} = \frac{15\eta V(1-\epsilon)^2}{\phi^2 d^2 \rho \epsilon^3} + \frac{1,75pV^2(1-\epsilon)}{\phi d \rho \epsilon^3} \quad (2.13)$$

onde,

d_p = diâmetro da partícula (m);

l = altura da cama (m);

Δp = diferença da pressão da cama (N/m^2);

V = velocidade superficial do gás (m/s);

ϵ = fração de vazios, fração de volume não ocupado por sólidos;

η = viscosidade do gás (N.s/m^2), onde $\text{N.s/m}^2 = \text{kg/s.m} = 10$ poise;

ρ = densidade do gás (kg/m^3); e

ϕ = fator de forma.

Verifica-se que o escoamento de ar aumenta com os aumentos do fator de forma, do diâmetro médio das partículas e da fração de vazios. As partículas finas diminuem o escoamento pela obstrução dos vazios deixados pelos nucleantes (partículas maiores). Para evitar esta obstrução, é essencial que as partículas finas fiquem aderentes às nucleantes. Isto é obtido com adição correta de água durante a mistura, pois a água é o componente que liga as partículas por tensão superficial (efeito menisco). A umidade ótima pode ser estimada, para uma dada mistura, pelas medidas de volume específico aparente para adições crescentes de água. O máximo volume específico aparente corresponde à umidade ótima (Figura 2.10).

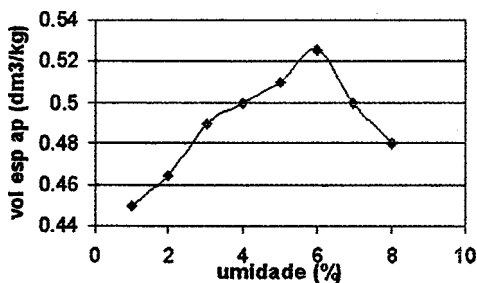


FIGURA 2.10 - Efeito da umidade da mistura a sinterizar no volume específico aparente. A umidade ótima desta mistura é de 6% (BORDON e TAKANO, 1995).¹¹

A permeabilidade durante a sinterização é, também, afetada pela formação da fase líquida na frente de combustão. Para uma dada mistura, perfis térmicos com altas temperaturas e largas (altas temperaturas por tempo maior) conduzem à formação de uma camada maior de fase líquida. Estas condições são obtidas quando há excesso de combustível e agravadas com partículas de coque maiores que 4 mm.

Dawson (1993)^{3,12-14} apresenta em seus trabalhos revisões contendo uma análise bastante completa sobre o processo de sinterização.

- **Processo de pelotização** - O processo de pelotização consiste na aglomeração de finos na forma de esferas da ordem de 10 mm a 15 mm de **diâmetro**. Esta operação é feita por rolamento em discos ou tambores rotativos (Figura 2.11). O princípio está em gerar continuamente uma quantidade de núcleos que devem crescer até o tamanho desejado. Para isso, é essencial que o poder de aglomeração ditado pelo conjunto água e material a pelotizar seja alto. A coesão das partículas se dá pela força capilar do conjunto material-água, em que a água atua como agente de ligação entre as partículas (Figuras 2.12 e 2.13). Portanto, o poder de aglomeração pode ser medido pela molhabilidade. Assim, os materiais hidrofílicos são facilmente pelotizados e os hidrofóbicos, tais como os resíduos sólidos contendo óleos na superfície, são de difícil pelotização. Como visto, desde que a água é o componente de ligação, quanto maior a superfície específica do material, mais a aglomeração fica facilitada. Portanto, deseja-se tamanho menor possível das partículas (na prática especifica-se: 100% menores que 0,150 mm) e de porosidade alta. A cal é um componente que confere plasticidade à **pelota** e facilita também a pelotização. Além disso, por ser um componente básico, é utilizado na mistura para a produção de **pelotas autofundentes**.

As **pelotas**, assim obtidas, são designadas **pelotas verdes** ou **cruas** e necessitam apresentar resistência mínima para manuseio local, da ordem de 100 N/**pelota**, porém é insuficiente para transporte a grande distância e para carga nos altos-fornos. A resistência **mecânica** necessária (resistência à compressão de - 3.000N/**pelota** e índice de **abrasão** < que 10% menores que 5 mm) é obtida submetendo-se a **pelota** ao "tratamento térmico" a altas temperaturas (-1.300" C), normalmente conhecido como a operação de **queima** (sinterização) da **pelota**. Após a **queima**, a porosidade típica é de 22% a 30%. O equipamento utilizado para **queima** é do tipo contínuo de esteiras com zonas de **secagem**, **preaquecimento**, **queima**, **pós-queima** e **resfriamento**. A Figura 2.14 ilustra o processo de pelotização.

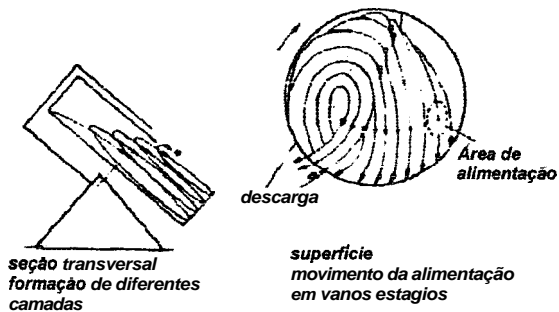


FIGURA 2.11 - Formação da *pelota crua*, crescimento e descarga do produto, num disco pelletizador (MOURÃO, 1986).¹

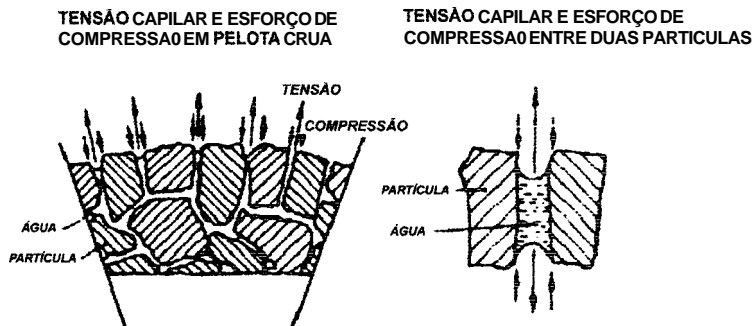


FIGURA 2.12 - Influência das forças capilares no mecanismo de ligação (MOURÃO, 1986).¹

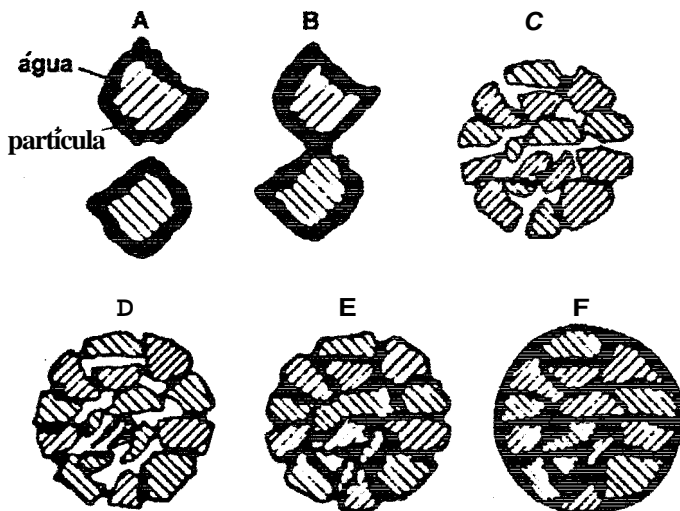
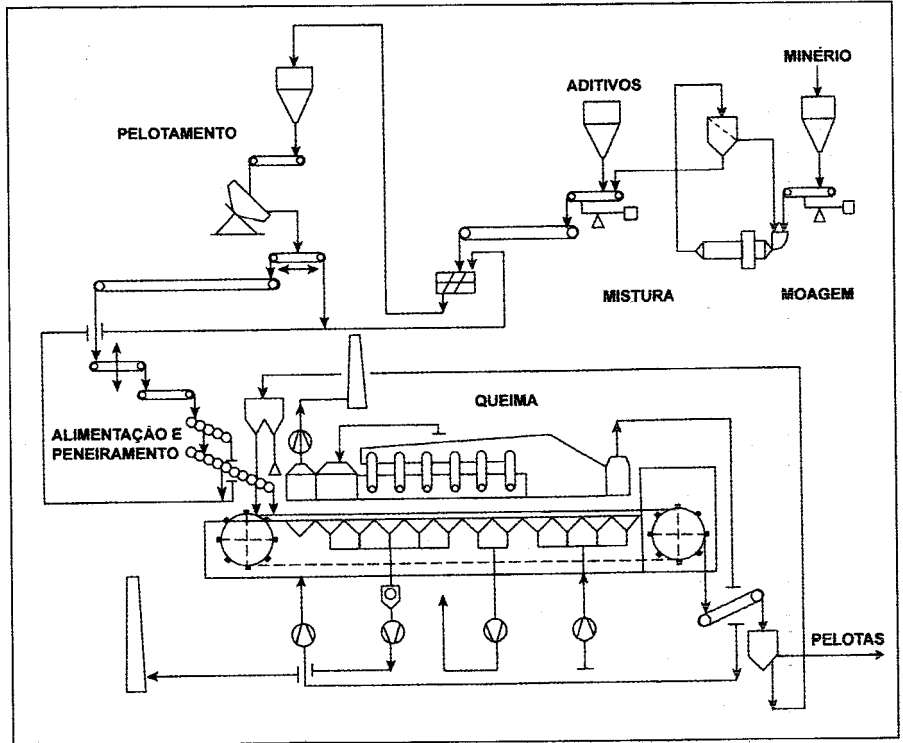


FIGURA 2.13 - Atuação da água na pelletização (SRB e RUZICKOVA, 1988).⁵

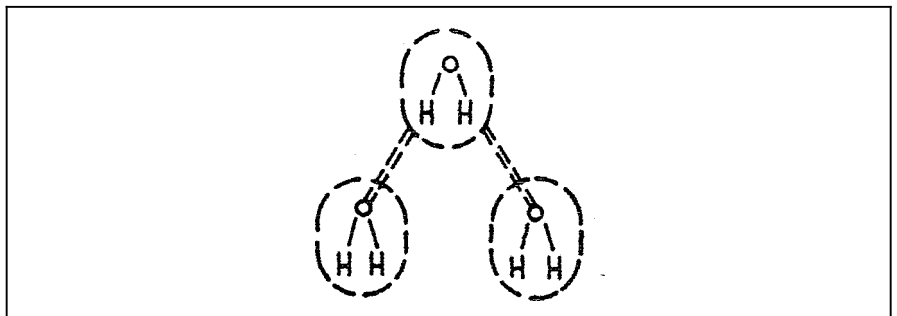
Processos de Preparação de Matérias-Primas Siderúrgicas

FIGURA 2.14 - Fluxograma do processo de pelotização.



- **Teoria da aglomeração (pelotas verdes)** - Na obtenção de pelotas verdes a água atua como componente fundamental na ligação entre partículas pela sua força capilar. A energia de superfície de partículas faz que os dipolos de água fiquem orientados segundo as linhas de força, formando cadeias, orientadas para o volume de líquido. Os filmes de água adsorvidos nas superfícies de partículas são ligados por pontes de hidrogênio (Figura 2.15).

FIGURA 2.15 - Vista esquemática de ponte de hidrogênio (SRB e RUZICKOVA, 1988).⁵



Dependendo do preenchimento pela água dos espaços interpartículas podem-se definir 3 estados: o estado pendular em que a água está presente apenas nos pontos de contato; o estado funicular é um estado intermediário, no qual, além dos pontos de contatos, alguns poros estão completamente preenchidos com água; e o estado capilar, em que todos os poros estão preenchidos com água e não há formação de filme de água na superfície da pelota.

A teoria mostra que a maior coesão é verificada no estado capilar. Quando há presença de partículas menores que 5 micra, o modelo visco-capilar se adapta melhor aos resultados reais. Neste modelo, admite-se que as partículas extremamente finas formem uma solução coloidal que age como aglomerante e pode superar a coesão dada pela força capilar.

Durante a secagem, a evaporação total de água deveria conduzir à desintegração do aglomerado, porém isso não ocorre, devido à ação de novas forças, tais como: ligação mecânica pela acomodação e entrelaçamento entre partículas resultantes das irregularidades das superfícies; ligações pelas formações de pontes de fases sólidas, que contribuem bastante no endurecimento durante a secagem e ocorrem em regiões bastante compactas, sendo decorrentes da precipitação de alguns sais que estavam dissolvidos na água (por exemplo, quando se usa água do mar, e/ou pelas ligações formadas pelos aglomerantes, tais como bentonita ou cal); e ligações pelas forças de atração entre partículas sólidas, tais como as de Van Der Waals e eletrostáticas, que, no entanto, só se tornam importantes quando as distâncias entre partículas são menores que 10 nm.

- *Mecanismos de nucleação e crescimento de pelotas* - O controle da adição de água atua de maneira preponderante na nucleação e crescimento de pelotas.

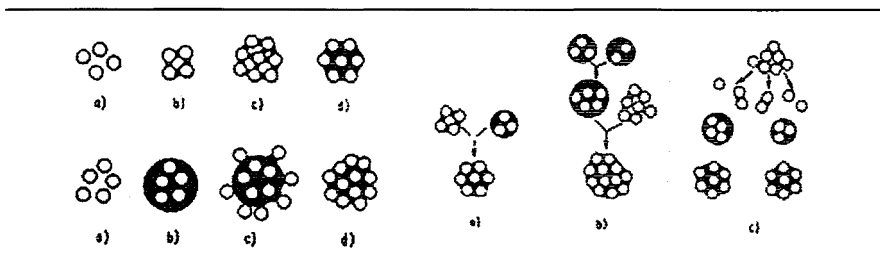


FIGURA 2.16 - Mecanismos de formação de núcleos de pelotas (SRB e RUZICKOVA, 1988).⁵

A Figura 2.16 mostra os diversos mecanismos para formação de núcleos de **pelotas**: no primeiro caso, há partículas úmidas se ligando pelas forças capilares; no segundo, a super-umidificação local, por exemplo, pela gota d'água, forma-se o primeiro núcleo e outras partículas são atraídas por tensão superficial d'água; e no terceiro, os núcleos já formados podem se desintegrar e formar novos núcleos. Na realidade, estes mecanismos atuam simultaneamente pelas ações das colisões e gotas de água.

O crescimento ocorre pela incorporação de novas partículas ou de núcleos menores em maiores, pela ação capilar e pelos impactos. A aderência de partículas de diâmetro d em **pelotas** de diâmetro D depende de tamanhos relativos. Assim, o tamanho máximo para essa aderência é dada na Tabela 2.2. Verifica-se que uma **pelota** de 10 mm de diâmetro pode incorporar partículas úmidas e esféricas com diâmetro máximo de 0,400 mm. Uma vez aderente à superfície da **pelota**, a partícula penetra, pelo impacto, para o interior da mesma compactando-a e endurecendo-a.

TABELA 2.2 - Tamanho máximo de partículas esféricas (d) que podem aderir numa **pelota** de diâmetro (D) (SRB e RUZICKOVA, 1988).⁵

	Partícula seca	Partícula úmida
D/d	11,2	25

Nota-se que, para o material apresentar boas propriedades de pelotamento e resistência mecânica suficiente, são importantes: distribuição **granulométrica** com tamanho de partículas todas menores que 0,150 mm e pelo menos 60% menores que 0,040 mm; área superficial específica de 1.600 cm^2/g a 2.100 cm^2/g ; minério que apresente boa **molhabilidade**; e forma irregular. A determinação da umidade ótima é também essencial.

Os aglomerantes normalmente utilizados, como bentonita, cal hidratada, cimento, orgânicos (por exemplo, *carboxi-metil-celulose*) etc., atuam para melhorar o pelotamento, a resistência a verde, e alguns deles podem melhorar a resistência a seco e após a queima. A bentonita natural de sódio tem apresentado melhores resultados, com adição de apenas 0,5%. A característica principal da bentonita, que contém principalmente **montmorilonita**, é a capacidade de sorção devido à presença de valências livres.

A cal é outro aditivo que apresenta a propriedade de melhorar o pelotamento e melhorar a resistência mecânica, devido à reação de carbonatação na presença de CO_2 . No entanto, a sua grande utilização é como

escorificante de SiO_2 , controlando a basicidade final da escória na redução.

O cimento é mais utilizado em pelotas de cura a frio (não endurecidas por queima). O endurecimento a frio ocorre pelas reações de formação de hidratos de silicatos de cálcio.

- **Endurecimento de pelotas por queima oxidante** - O mecanismo de endurecimento de pelotas é basicamente semelhante ao de queima (sintenzação) de produtos cerâmicos. Na queima de pelotas, dois mecanismos são importantes: pela formação de novas fases e recristalização; e pela formação de novas fases com fusão parcial destas.

O ciclo de tratamento térmico, para determinar melhores temperaturas e tempo, deve ser estabelecido experimentalmente para cada composição de pelota. Normalmente, utilizam-se temperaturas de 1.200° C a 1.300° C durante 10 minutos (Figura 2.17).

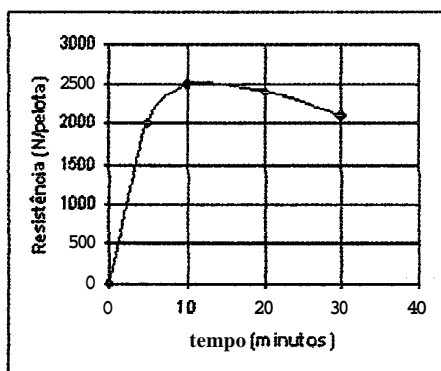


FIGURA 2.17 - Resistência a compressão de pelotas, típica, para 1220° C (SRB e RUZICKOVA, 1988).⁵

Para temperaturas altas e tempos longos, há crescimento exagerado de cristais (diminui a resistência mecânica). Para pelotas ácidas, há formação de maiores quantidades de fayalita, de baixa redutibilidade (Tabela 2.1). Para pelotas autofundentes (com adições de caí), a formação de ferritas de cálcio e silicatos complexos de cálcio e ferro (Olivinas de Ca-Fe) é favorecida.

O endurecimento por formação de fase líquida de silicatos não é desejado, por inibir a redução, evitando o contato de gases redutores com cristais de óxidos de ferro e cálcio-ferritas.

Embora a principal fonte de contaminação por enxofre na siderurgia não seja a partir de minérios, em pelotas queimadas em condições oxidantes há uma substancial eliminação deste. Os sulfatos eventualmente presentes se decompõem à temperatura de queima e são eliminados com os gases do forno.

2.7.5 Coqueificação

O coque deve apresentar propriedades de alta resistência para evitar a degradação dentro do forno, assim como conter alto teor de carbono (carbono fixo), apresentar baixa reatividade (carboreatividade: reação com o CO₂) e baixo teor de enxofre (< 1%).

O coque metalúrgico é o produto de destilação de carvão mineral à temperatura de, aproximadamente, 1000° C. Coqueificações feitas a temperaturas maiores ou por maior tempo, a uma dada temperatura, conduzem a um produto de menor reatividade. Embora haja uma disponibilidade enorme, principalmente no Hemisfério Norte, nem todo carvão mineral apresenta propriedades de coqueificação, e que satisfaça às composições químicas. O carvão mineral metalúrgico deve apresentar propriedade de, durante o aquecimento, sem a presença de ar, tornar-se plástico, e à medida que vai eliminando as matérias voláteis volte a solidificar numa nova estrutura. Dependendo, também, dos teores de matérias voláteis. Os com baixos teores tendem a inchar durante a formação da fase plástica. Assim, são feitas misturas de carvões para que os voláteis estejam na faixa de **23%** a 35%.

Devido a essas características necessárias, a disponibilidade, a baixo custo, de carvão metalúrgico está se tornando cada vez mais crítica. O carvão metalúrgico brasileiro não é competitivo, por ora, porque, para diminuir o teor de enxofre aos limites necessários, há necessidade de uma cominuição intensa (granulometria bastante fina para liberar as piritas FeS₂ presentes) para concentração posterior.

A coqueificação é feita numa bateria contendo retortas (longas, altas e estreitas) e com aquecimento entre elas (Figura 2.18). A Figura 2.19 mostra a evolução da coqueificação e a Figura 2.20 mostra o coque sendo descarregado da retorta. Após o descarregamento, o coque é resfriado bruscamente (extinção) com água ou nitrogênio.

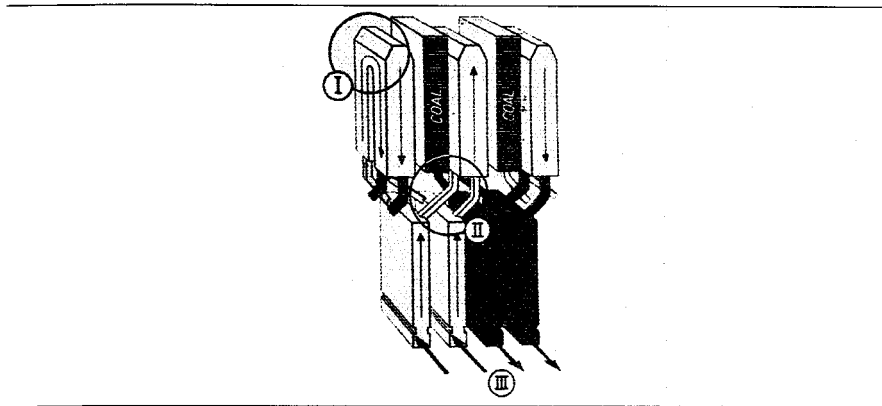


FIGURA 2.18 - Esquema de uma parte da bateria de coque mostrando as retortas contendo carvão e o sistema de aquecimento (I, II e III) das retortas (ARAÚJO, 1967).15

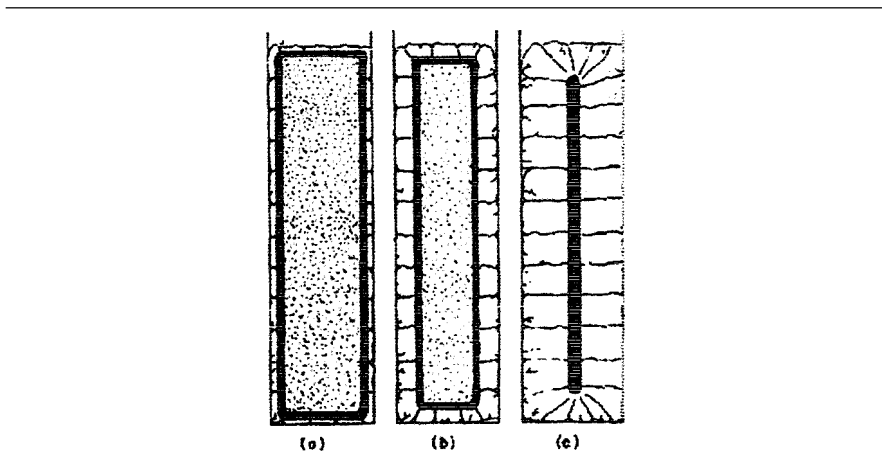


FIGURA 2.19 - Ilustração da evolução do processo de coqueificação dentro de uma retorta, da periferia para a parte central, a medida que ocorre o aquecimento. Aquecimento, evolução das matérias voláteis e a formação da fase plástica, e eliminação dos voláteis com a consolidação final na forma de coque sólido (ARAÚJO,1967).15

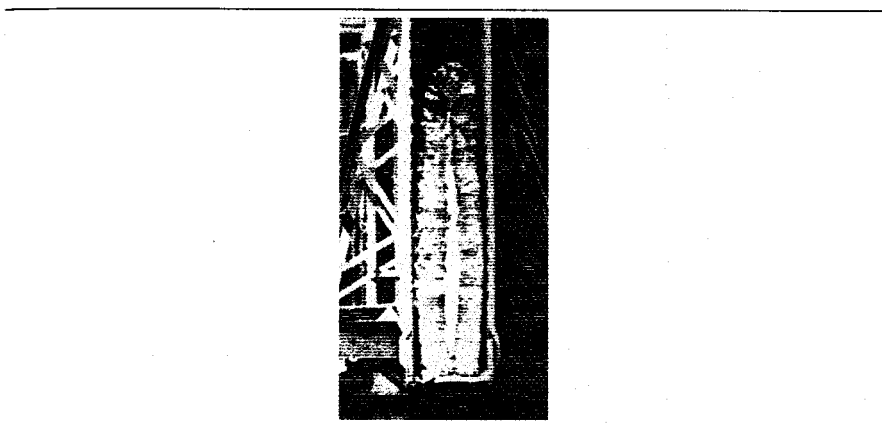


FIGURA 2.20 Fotografia de coque já formado sendo desenfornado da retorta (WAKELIN, 1999).9

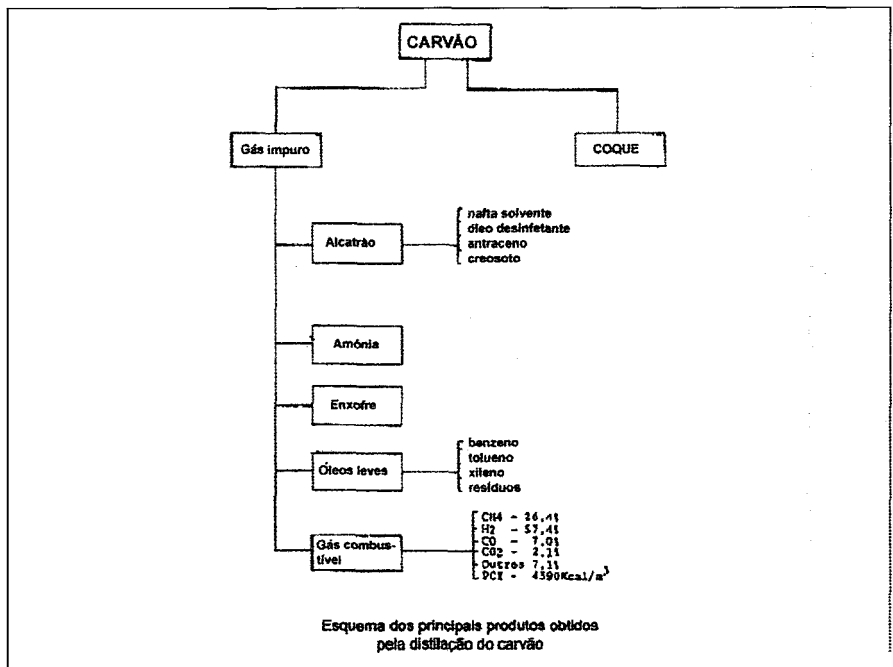
Processos de Preparação de Matérias-Primas Siderúrgicas

A produção de coque metalúrgico gera importantes subprodutos, que são os diferentes hidrocarbonetos (matérias voláteis) derivados da destilação do carvão. São hidrocarbonetos desde os aromáticos, os longos e os mais simples. Estes vêm a constituir o gás de coqueria. Alguns desses componentes são considerados nocivos ao meio ambiente. Por esta razão e pelo custo, novas tecnologias estão sendo desenvolvidas para a produção de aço, sem a utilização de coque.

As matérias voláteis são separadas por destilação fracionada. A Figura 2.21 apresenta um exemplo dos subprodutos obtidos.

O gás combustível (gás de coqueria) é um excelente combustível gasoso, pois a sua composição é principalmente de metano (CH_4), de hidrogênio (H_2) e de monóxido de carbono (CO). O poder calorífico do gás de coqueria (-18.000 kJ/Nm^3) é praticamente igual à metade do poder do gás natural (-35.000 kJ/Nm^3) e 5 vezes maior que o gás de alto-forno (-3.600 kJ/Nm^3). Nas usinas integradas este gás é totalmente utilizado para aquecimentos na própria coqueria, parte no pre-aquecimento de ar no alto-forno e nos fornos de aquecimento.

FIGURA 2.21 - Principais subprodutos obtidos do processo de coqueificação. **Nota** o alto poder calorífico do gás de coqueria (ARAÚJO, 1967).15



2.8 Resumo

As matérias-primas essenciais para siderúrgicas integradas são: minérios, redutores, combustíveis, fluxantes, sucatas, ferros-liga, desoxidantes, dessulfurantes e refratários. **As** utilidades são água, oxigênio e energia elétrica.

As usinas semi-integradas ou aciarias elétricas necessitam, essencialmente, de: sucatas, fluxantes, ferros-liga, refratários e as mesmas utilidades de uma usina integrada, porém, com grande consumo de energia elétrica.

As impurezas contidas nas matérias-primas podem ser mais ou menos nocivas, dependendo das dificuldades técnicas para sua eliminação e dos efeitos dessas impurezas no produto final, mesmo em teores bastante baixos. Podem ser classificadas segundo:

- *A mais nocivas*: S (para sua eliminação exige condições especiais de alta basicidade e redutoras); Cu, **As**, Sb, Ni (estes por serem elementos mais nobres que o ferro não podem ser eliminados, por oxidação seletiva, na fase oxidante da fabricação de aços).
- *Nocivas*: P (exige condições oxidantes e de alta basicidade); Zn (por conter teores elevados diminui o teor de ferro contido, gera mais gases, aquece as tubulações do sistema de limpeza dos gases por re-oxidação com o ar e gera mais poeiras).
- *Impurezas menos nocivas*: elementos facilmente oxidáveis durante a fase oxidante da fabricação de aços não são críticos, principalmente se as especificações finais nos aços não exigem teores muito baixos destes. Estão nesta categoria: Ai, Ti, Zr, Nb, Cr, V, Si, **Mn**, C.

Geralmente, são desejados tamanhos de partículas entre 8 mm a 0 mm. Partículas menores que 8 mm normalmente são aglomeradas, por exemplo por sinterização ou pelotização. Partículas grandes levam mais tempo para as reações se completarem, e as finas geram mais poeiras ou simplesmente inviabilizam alguns processos (ex. Aito-Forno).

REFERÊNCIAS

- 1 MOURÃO J. M. Pelotização de minérios de ferro. In: BRADASCHIA, C. *Siderurgia para não-siderurgistas*. São Paulo: ABM, 1986. v. 1, p. 107-176.

- 2 NASCIMENTO, R.C.; MOURAO, M.B.; CAPOCCHI, J.D. Microstructures of self-reducing pellets bearing iron ore and carbon. *ISIJ International*, v. 37, n.11, p. 1050-1056, 1997.
- 3 DAWSON, P.R. Recent development in iron ore sintering. Part 2: Research studies on sintering and sinter quality. *Ironmaking and Steelmaking*, v. 20, n. 2, p. 137-143, 1993.
- 4 MANTOVANI, M.C.; TAKANO, C. The strength and the high temperature behaviors of self-reducing pellets containing EAF Dust. *ISIJ International*, v. 40, n. 3, p. 224-230, 2000.
- 5 SRB, J.; RUZICKOVA, Z. *Pelletization of fines*. Amsterdam: Elsevier, 1988. (Developments in mineral processing, 7).
- 6 CHAVES, A. P. Teoria e *prática* do tratamento de minérios. São Paulo: Signus, 1996.
- 7 GASKELL, D.R. Introduction to *metallurgical thermodynamics*. Tokyo: McGraw Hill, 1973. p. 173.
- 8 ROSENQVIST, T. *Principles of extractive metallurgy*. 2.ed. Trondheim: Tapir Academic Press, 2004. p. 208-209.
- 9 WAKELIN, D.H. (ed.). The making, shaping and treating of steel: ironmaking volume. 11.ed. Pittsburgh: AISE Steel Foundation, 1999. p. 434, 628.
- 10 ROCHA, G. T. Sinterização. In: BRADASCHIA, C. Siderurgia para não-siderúrgicas. São Paulo: ABM, 1986. v. 1, p. 177-192.
- 11 BORDON, M.A.; TAKANO, C. Efeito da granulometria do coque no perfil de temperatura na sinterização de minério de ferro. In: CONGRESSO ANUAL DA ABM, 50., 1995, São Pedro, SP. Anais... São Paulo: ABM, 1995. v. 3, p. 141-154.
- 12 DAWSON, P.R. Recent development in iron ore sintering. Part 1: Introduction. *Ironmaking and Steelmaking*, v. 20, n. 2, p. 135-136, 1993.
- 13 DAWSON, P.R. Recent development in iron ore sintering. Part 3: Granulation and strand feeding. *Ironmaking and Steelmaking*, v. 20, n. 2, p. 144-149, 1993.
- 14 DAWSON, P.R. Recent development in iron ore sintering. Part 4: The sintering process. *Ironmaking and Steelmaking*, v. 20, n. 2, p. 150-159, 1993.
- 15 ARAÚJO, L.A. Siderurgia. São Paulo: FTD, 1967. p. 44, 58 e 69.

Redução de Minério de Ferro em Altos-Fornos

3.1 Descrição do Processo

Capítulo

03

Eduardo Emery C, Quito

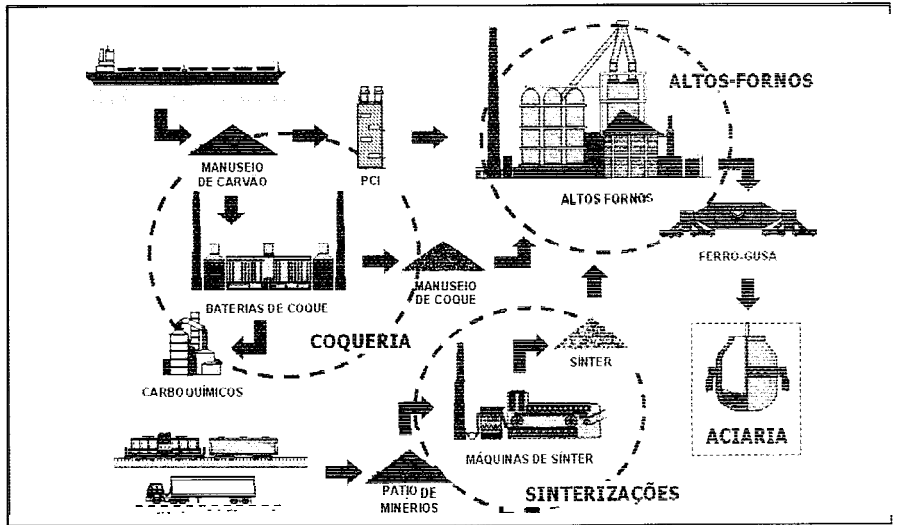
O processo de alto-forno domina o cenário mundial de produção de ferro-gusa líquido para a produção de aço. Este predomínio tem se mantido ao longo dos anos, principalmente devido aos contínuos desenvolvimentos ocorridos, especialmente, a partir da década de 1970, no projeto e na tecnologia operacional e de manutenção. Esses desenvolvimentos levaram a aumentos significativos de produtividade em operação contínua por longo tempo, acentuada redução do fuel-rate e o uso de outros reductores tais como o gás natural e o carvão pulverizado. Entretanto existem algumas desvantagens no processo de alto-forno principalmente centradas na necessidade de unidades suplementares de preparação de matérias-primas como a coqueria e a sinterização, que implicam elevados investimentos adicionais, além de alguns problemas ambientais. Isso abriu espaço para a pesquisa e desenvolvimento de processos alternativos denominados genericamente de "fusão redutora". Apesar disso, devido à sua elevada eficiência energética e capacidade de produção, evolução tecnológica e flexibilidade operacional do alto-forno entra neste novo século mais competitivo que nunca e novas unidades estão sendo construídas no Brasil e no mundo.

O alto-forno é um equipamento destinado a produzir ferro-gusa em estado líquido a uma temperatura em torno de 1.500°C , com a qualidade e em quantidade necessárias para o bom andamento dos processos produtivos subsequentes. Para isso, o alto-forno utiliza como matérias-primas básicas a carga metálica: sinter, pelotas, minério granulado e o combustível sólido (coque ou carvão vegetal), além de fundentes e injeções auxiliares (gás natural, carvão pulverizado etc.).

Em uma usina siderúrgica integrada a coque, ou seja, com todas as etapas básicas do processo siderúrgico, o sinter é produzido na siderúrgica e tem como constituinte principal o minério de ferro. O coque é produzido na coqueria e é obtido através da pirólise do carvão mineral. Outros materiais

podem ser utilizados, também, carregados pelo topo ou injetados na região inferior do forno, onde o ar quente é soprado, gerando gases que ascendem em contracorrente com os sólidos carregados pelo topo. A Figura 3.1 mostra um fluxograma parcial de uma usina, até o alto-forno, destacando as matérias-primas básicas carregadas e seu principal produto.

FIGURA 3.1 – Fluxograma parcial de uma usina siderúrgica integrada a coque (COMPANHIA SIDERÚRGICA PAULISTA, 2001).'



3.1.1 Descrição do equipamento

O alto-forno é considerado o reator mais complexo da metalurgia. No seu interior ocorrem centenas de reações e estão presentes os 3 estados da matéria: sólidos, líquidos e gases. Neste reator ocorrem grandes gradientes de temperatura, variando de mais de 2000°C na zona em frente as ventaneiras, onde ocorre a combustão do coque, até cerca de 150°C , na região superior onde os gases deixam o forno.

O alto-forno é carregado com matérias-primas ferrosas preparadas (sinter e pelotas) ou naturais (minério de ferro granulado); com um combustível e fonte de gás redutor (coque ou carvão vegetal); e, também, pode ter injeções auxiliares pelas ventaneiras (óleo combustível, alcatrão, carvão pulverizado, gás natural, plásticos picotados, etc.). O objetivo é produzir uma liga, no estado líquido, composta de ferro (92% - 95%) e

carbono (3,5% - 5,0%) e mais alguns elementos de liga (silício, manganês etc.), a uma temperatura em torno de 1500°C, liga esta denominada ferro-gusa. Também existe uma produção significativa de escória de alto-forno, da ordem de 200 a 350 kg por tonelada de ferro-gusa produzida, e de gás de alto-forno, da ordem de 1.750 a 2.300 Nm³ por tonelada de ferro-gusa produzida.

Para uma descrição sequencial do processo de alto-forno e da função de algumas partes que serão primordiais para o entendimento do funcionamento do equipamento, serão utilizadas as indicações numéricas da Figura 3.2. Partindo dos pátios de estocagem ou dos processos anteriores (coqueria e sinterização), as matérias-primas são transferidas para a "casa de silos" [1] através de correias transportadoras. Cada tipo de material (sinter, coque, minério granulado, pelotas, fundentes, etc.), é carregado em silos separados [2] equipados com balanças. As várias matérias-primas são pesadas de acordo com regras pré-determinadas de modo a obter a composição química desejada do ferro-gusa e da escória a partir das análises químicas de cada material. Os materiais da carga, após pesagem, são então descarregados sobre um carro *skip* [3] ou correia transportadora, que fazem o transporte dos materiais até uma tremonha de recebimento no topo do forno [4].

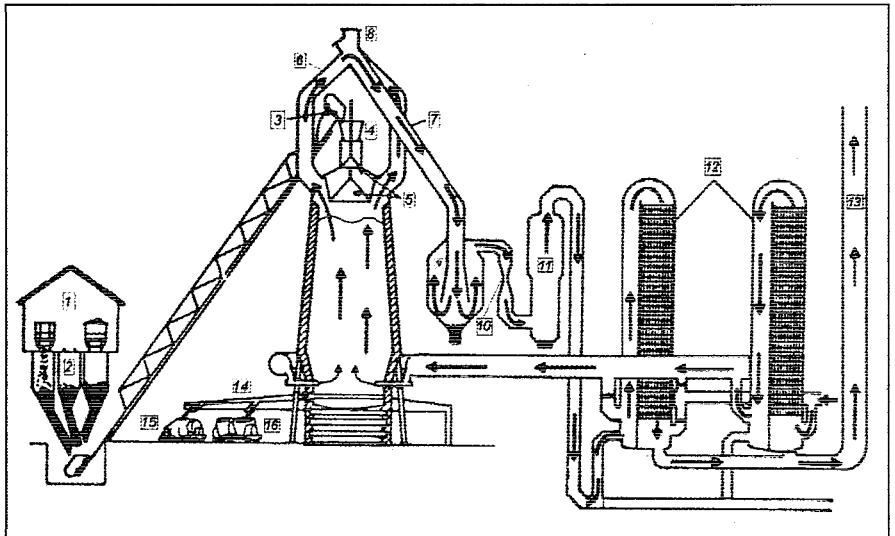
No topo do forno as matérias-primas ferríferas (sinter, minério granulado, pelotas) são carregadas de modo a formar, no interior do forno, camadas separadas das de coque. Os materiais podem ser carregados para o interior do forno por meio de um sistema de dois estágios de cones [5], os quais são responsáveis pela selagem dos gases e pela distribuição circunferencial dos materiais na "goela" do forno. Estes fornos podem ter, também, um dispositivo denominado "armadura móvel", que consiste de placas móveis cuja função é reduzir a seção da goela, permitindo o direcionamento dos materiais carregados para a região central. Outros fornos mais modernos podem ter um outro sistema de carregamento baseado em duas tremonhas que descarregam as matérias-primas em uma "calha rotativa", que pode ter o ângulo de inclinação alterado, permitindo grande flexibilidade no direcionamento da carga no interior do forno.

Redução de Minério de Ferro em Altos-Fornos

Também no topo do forno existem quatro *up-takes* [6], através dos quais o gás quente e sujo com poeiras deixa o forno e flui para cima, para então serem direcionados para baixo por meio do *downcommer* [7] No extremo do topo do forno existem válvulas *bleeders* [8] cuja função é permitir a liberação do gás e proteger o topo no caso de uma súbita elevação de pressão do gás, decorrente de eventuais problemas operacionais com o processo. Toda esta região tem a estrutura em chapas de aço protegidas com refratário interno, juntas de expansão para absorver as variações de temperatura e pressão dos gases e vedações à base de silicone, para evitar vazamentos de gases no ambiente. Em média, estes componentes são projetados para operar com temperatura na ordem de 350° C. Acima disto, há a necessidade de se resfriar imediatamente os gases através da injeção de água, por meio de *sprays* instalados sobre a carga.

O gás desce pelo *downcommer* até o coletor de pó [9], onde as partículas de pó mais grosseiras se depositam, acumulam e são descarregadas sobre um vagão ferroviário. O gás então flui para a lavagem em um equipamento tipo *venturi* [10], onde são removidas as partículas mais finas na forma de lama. O estágio final de tratamento do gás consiste da passagem pelo desumidificador [11] cuja função é reduzir o teor de umidade do gás.

FIGURA 3.2 – Esquema mostrando o funcionamento de um alto-forno (AMERICAN IRON AND STEEL INSTITUTE, 2006).²



Após a limpeza, parte do gás gerado é direcionada para os regeneradores [12]. Normalmente os fornos são equipados com 3 ou 4 regeneradores com formato cilíndrico. Os gases são queimados na região inferior do regenerador que está na fase combustão, atingem o domo e, ao descer, transferem calor para um empilhamento de tijolos refratários presente no interior do regenerador. Os produtos da combustão deixam os regeneradores e são encaminhados a uma chaminé compartilhada por todos [13]. O ar, proveniente de turbo sopradores, é aquecido após passar pelo regenerador que está em fase de sopro, e injetado pelas ventaneiras.

Na parte inferior do forno o gusa e a escória produzidos são separados por diferença de densidade no canal principal [14]. O gusa é coletado em carros torpedos [15] e destinado a Aciaria. A escória é drenada em potes [16] ou transformada em um material granulado por meio de jato de água em alta pressão e colocada para venda.

3.1.2 O corpo principal do alto-forno

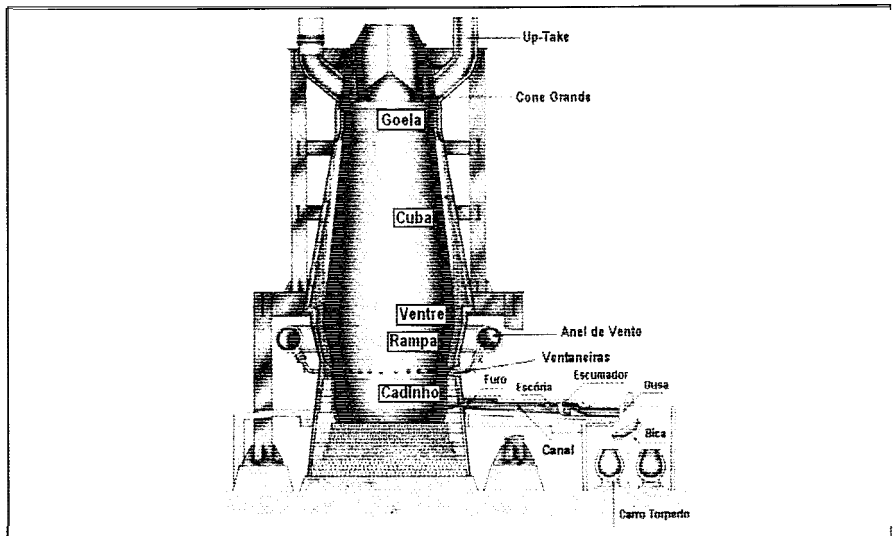
O corpo principal do alto-forno é composto da goela, cuba, ventre, rampa e cadinho assim definidos em função da geometria e da função de cada região, conforme mostra a Figura 3.3:

- *Goela*: Parte cilíndrica superior de onde é feito o carregamento do alto-forno. Nesta região, ficam posicionados os equipamentos de distribuição da carga, que serão detalhados posteriormente, e diversos sensores que medem o nível da carga, o perfil da carga, a temperatura e a composição dos gases produzidos etc. O nível normal da carga, medido por meio de um sonda mecânica ou radar, fica em torno de 1,0 m abaixo de um referencial denominado *stockline*. Sempre que o nível da carga, no ponto de medição, desce e atinge este valor predefinido uma nova batelada de carga é carregada no interior do forno.
- *Cuba*: Compreende a maior parte volumétrica do alto-forno, sendo de formato tronco-cônico, com o maior diâmetro na parte inferior. Este formato se deve em parte à necessidade de compensar o aumento de volume da carga, devido à elevação da temperatura e em parte para possibilitar uma descida de carga suave, sem a agregação de cascos de material semifundido nas paredes.

Redução de Minério de Ferro em Altos-Fornos

- **Ventre:** Parte cilíndrica de união entre a cuba e a rampa. É uma das partes mais solicitadas do forno, devido à intensa oscilação de temperatura em função da variação de posição da zona compreendida entre os pontos de amolecimento e fusão da carga metálica, denominada de zona coesiva.
- **Rampa:** Região de formato tronco-cônico, com o maior diâmetro na parte superior, e este formato ajuda a sustentação da carga e o gotejamento de gusa e escória para o cadinho, através dos interstícios das partículas de coque.
- **Cadinho:** Região cilíndrica que compõe a parte inferior do alto-forno e que tem como uma de suas finalidades armazenar, por tempo controlado o gusa e a escória produzidos. Na parte inferior do cadinho ficam as regiões denominadas furos de gusa, onde são feitas perfurações periódicas para a drenagem do gusa e da escória. Na parte superior do cadinho ficam posicionadas as ventaneiras, onde é feita a injeção do ar soprado e de combustíveis auxiliares.

FIGURA 3.3 -Corpo principal do alto-forno (PLIBRICOJAPAN CO., 2006).3



As ventaneiras, conforme pode ser observado no arranjo da Figura 3.4, ficam posicionadas na parte superior do cadinho, um pouco antes da conexão com a rampa. O número de ventaneiras aumenta com o tamanho dos fornos, podendo alcançar mais de 40 nos grandes altos-fornos. **As** ventaneiras são peças de cobre refrigeradas a água, que penetram até 500mm no interior

do forno e, por isso, são submetidas às mais altas temperaturas e ao ataque das partículas de coque incandescente e gotejamento de gusa e escória. Para cumprir esta função deve haver uma alta taxa de extração de calor por meio de uma elevada vazão de água de refrigeração da ordem de 300 litros/min a 500 litros/min de água em alta pressão que percorre canais internos de formato espiralado. As ventaneiras são encaixadas por dentro de um esfriador ou caixa de refrigeração, que serve como suporte e que consiste de um anel de cobre, oco e refrigerado a água.

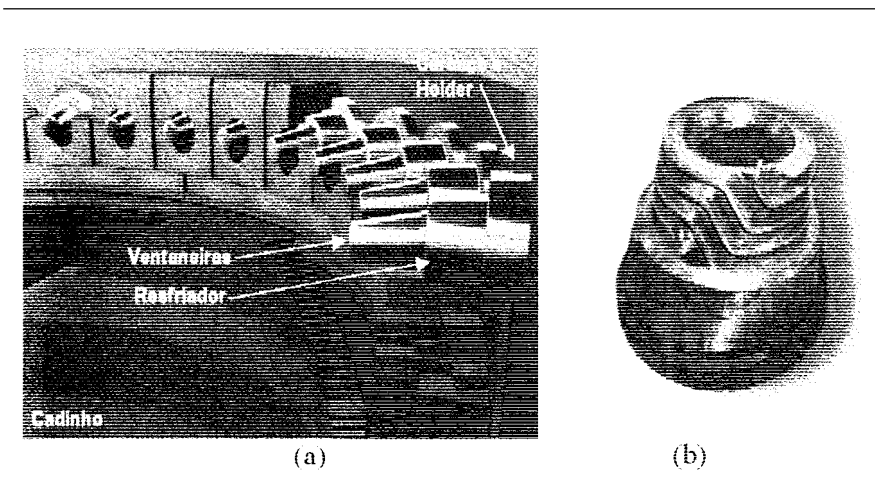
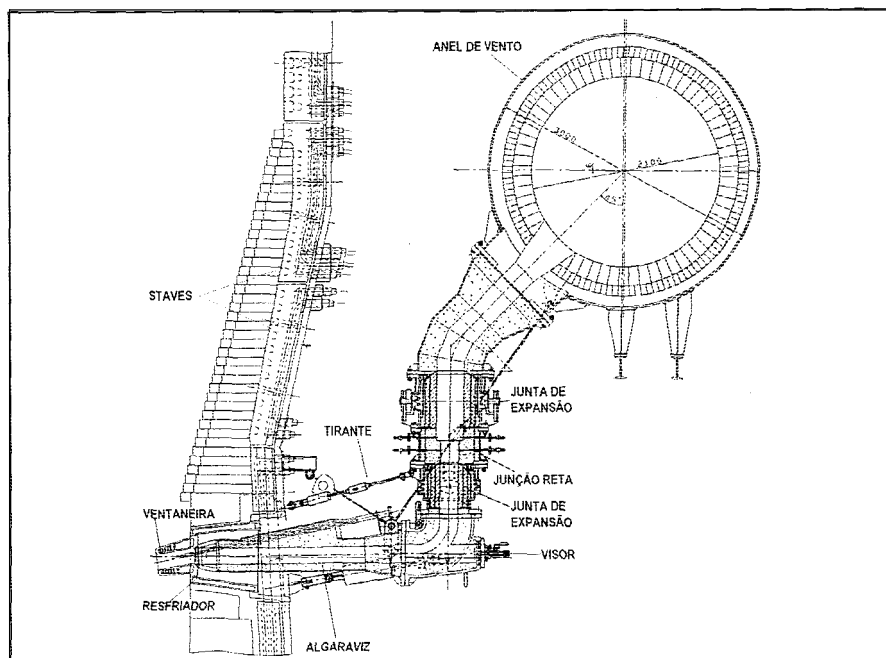


FIGURA 3.4 – (a) Arranjo das ventaneiras no interior do forno; (b) Detalhes internos da ventaneira (MCNALLY et al., 199-?).⁴

O ar quente é introduzido nas ventaneiras, para a combustão do soque, através de um tubo de ligação denominado de algaraviz. O algaraviz é uma peça de aço revestida internamente com refratário cerâmico. Na extremidade do algaraviz, oposta ao acoplamento com a ventaneira, fica uma espécie de visor que, através de vidros de alta resistência a temperatura e pressão, permite visualização da zona de combustão do alto-forno e, também, diversos aspectos operacionais muito relevantes para o processo. Como exemplo, pode-se citar a observação de passagem de cascões desgarrados das paredes ou de semifundidos; o estado da combustão das injeções auxiliares; a presença de escória retida; e, principalmente, a avaliação periódica do estado térmico do forno pelo simples brilho da zona de combustão, quando observado por um operador experiente. Peios algaravizes, também, são

inseridas as lanças que permitem as injeções de combustíveis auxiliares na ventaneira. Os tubos superiores, que conectam o algaraviz ao anel de vento, também, são revestidos com refratário para proteger o aço e minimizar as perdas de calor, conforme arranjo que pode ser observado na Figura 3.5.

FIGURA 3.5 - Sistema de gusa quente (ventaneira, resfriador, algaraviz, conexões e anel de vento) (COMPANHIA SIDERÚRGICA PAULISTA, 2001).1



A capacidade de produção de um alto-forno está diretamente ligada ao Volume Interno do equipamento, definido como o volume compreendido entre os planos que passam pelo *stockline* e pela borda inferior dos furos de gusa. O volume interno dos altos-fornos varia bastante, dependendo da capacidade de produção projetada para cada usina siderúrgica. Não existe uma classificação padronizada, porém considera-se, de uma maneira geral, que alto-forno com volume interno menor que 1.500 m^3 é de pequeno porte, alto-forno com volume entre 1.500 m^3 e 3.000 m^3 é de médio porte e com volume acima de 3.000 m^3 , é de grande porte.

Atualmente, a marca de maior alto-forno do mundo foi novamente estabelecida em maio de 2004, com o início da terceira campanha do alto-forno nº2 em Oita no Japão. Este alto-forno gigante tem 5.775 m^3 de volume

interno, diâmetro do cadinho de 15,6 m, diâmetro do ventre de 17,2 m e diâmetro da goela de 11,1 m. A Figura 3.6 ilustra, utilizando dados do Encontro de Especialistas de Redução, promovido pela ABM, o volume interno dos maiores altos-fornos brasileiros que operam com coque.

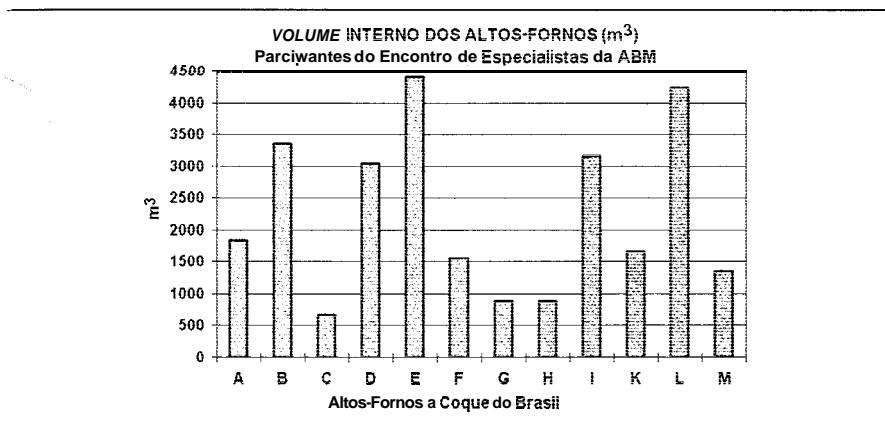


Figura 3.6 - Volume interno (m³) dos altos-fornos a coque do Brasil (ENCONTRO DE ESPECIALISTAS..., 2005).5

3.1.3 Descrição das zonas internas do alto-forno

Com base em estudos de dissecação de Altos-fornos realizados na década de 1970 no Japão, onde altos-fornos em operação foram congelados, além de sondagens com fornos em operação e diversos outros estudos em vários países, cinco zonas internas principais nos altos-fornos foram definidas, conforme mostra esquematicamente a Figura 3.7.

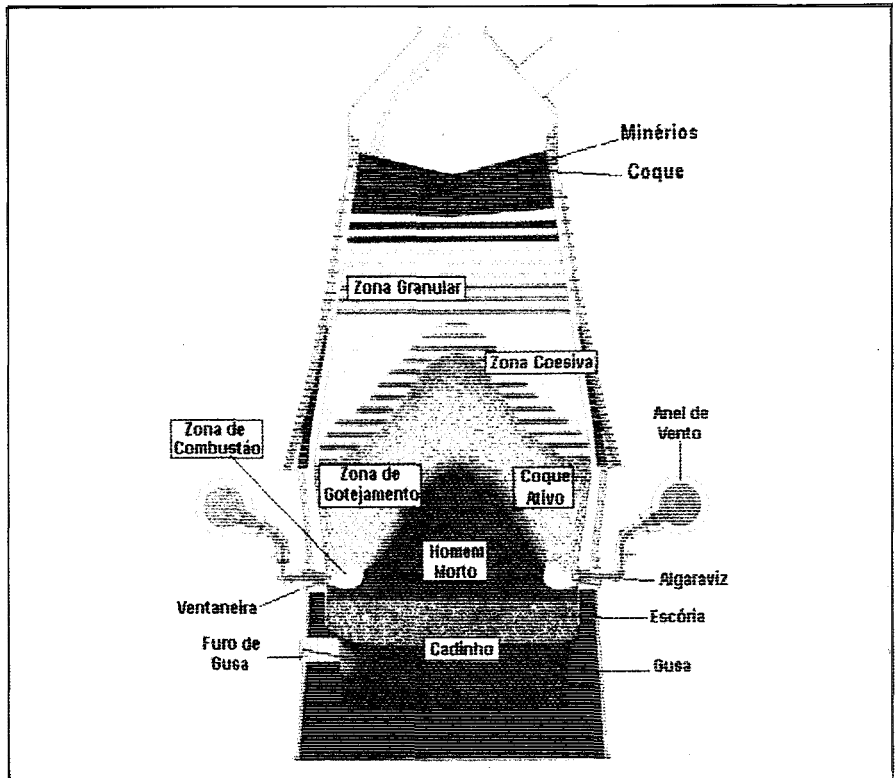
As características principais de cada zona interna do alto-forno são descritas a seguir.

- **Zona granular:** Nesta zona, o minério e o coque mantêm sua configuração em camadas, tais como foram carregados, ou seja, camadas alternadas de coque e de minérios. Nesta região existem apenas duas fases (gases e sólidos). portanto, a redução dos óxidos de ferro ocorre apenas no estado sólido.
- **Zona coesiva:** É constituída de camadas de coque e camadas coesivas alternadas. As camadas coesivas são formadas de massas semifundidas de partículas de minério de ferro, praticamente impermeáveis ao fluxo gasoso, que passa preferencialmente através das camadas de soque. A Figura 3.8 mostra esquematicamente as principais características da zona coesiva.

Redução de Minério de Ferro em Altos-Fornos

- *Zona de gotejamento*: Esta região contém coque na forma sólida, em cujos interstícios gotejam o gusa e a escória. Esta zona é dividida em duas subzonas: a região de coque atjvo e o "homem morto". Durante a descida das gotas de gusa para o cadinho, acontecem importantes reações que incorporam os elementos de liga ao gusa.
- *Zona de combustão*: É uma região parcialmente vazia em frente às ventaneiras, devido à elevada energia cinética do sopro de ar quente. À medida que as partículas de coque circulam vão sendo queimadas gerando o gás redutor e energia.

FIGURA 3.7 – Zonas internas do alto-forno (CAMPOS,1984).⁶



- *Cadinho*: É preenchido com coque granulado por cujos interstícios se depositam o gusa e a escória, que se separam em duas camadas por diferença de densidade. No cadinho ainda ocorrem importantes reações entre as fases metálica e escorificada, tal como a dessulfuração do gusa.

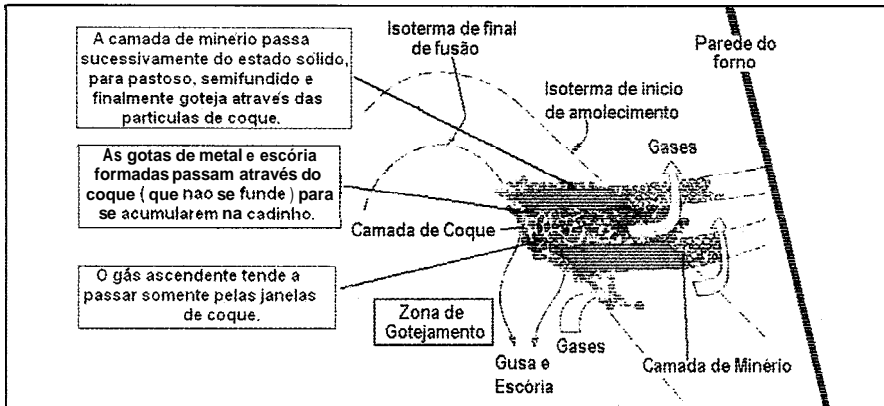


FIGURA 3.8 – Zona coesiva do alto-forno (CAMPOS, 1984).6

Observando a Figura 3.8, nota-se que a disposição da carga em camadas alternadas de coque e minérios ocorre até a zona coesiva. Nas temperaturas reinantes a partir desta região somente o coque consegue se manter em estado sólido. Portanto, na parte inferior do forno, ou seja, no cadinho e em parte da rampa, a carga sólida é composta somente de coque e ele será consumido por queima na zona de combustão ou tendo seu carbono absorvido pelo metal líquido. Esta porção de coque se divide em duas zonas: a "zona de coque ativo" que compreende a porção de coque que rola em direção às ventaneiras para ser queimado, e a "zona de coque inativo", também denominada de "homem morto", cujo coque não rola em direção às ventaneiras e é consumido basicamente pela incorporação de carbono ao gusa. Esta porção de coque tem sobre si grande parte do peso de toda a coluna de carga do alto-forno e, dependendo da relação de forças entre o peso da carga e o empuxo exercido pelo gusa, escória e ar soprado, pode ser ou não apoiada no fundo do cadinho. O gusa e escória líquidos ficam depositados no cadinho ocupando os espaços intersticiais entre as partículas desta porção de coque.

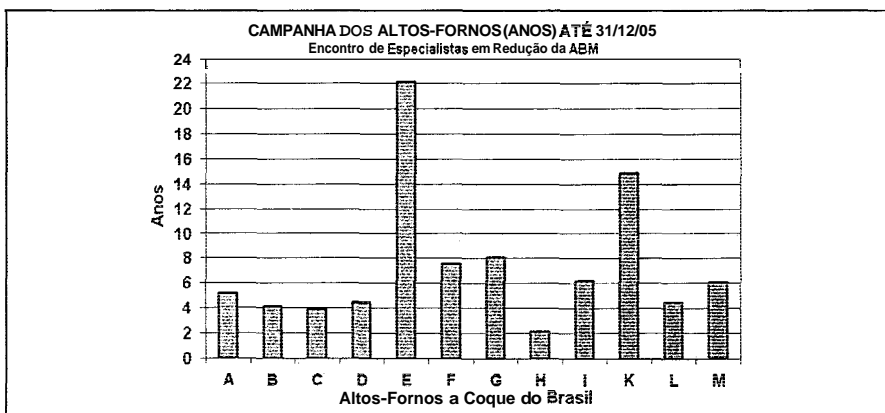
A zona coesiva do alto-forno situa-se na faixa de temperatura compreendida entre o início de amolecimento e a fusão da carga metálica. O seu perfil depende da distribuição de fluxo gasoso no interior do alto-forno, que, por sua vez, depende da relação minério/coque ao longo do diâmetro do forno. A atuação na relação minério/coque ao longo do diâmetro do forno constitui importante parâmetro operacional do alto-forno, denominado de "distribuição da carga" e será visto posteriormente.

3.1.4 Avaliação da performance do alto-forno

Para se avaliar uma operação razoável de um alto-forno de modo a possibilitar um retorno econômico dos investimentos, é necessário que se obtenha durante a sua operação, pelo menos os seguintes resultados:

- *Vida útil elevada:* Em função do altíssimo investimento na construção ou reforma de um alto-forno, grande esforço foi realizado, nas três últimas décadas, para o prolongamento das campanhas dos altos-fornos. A vida útil média dos altos-fornos, conhecida como campanha, está atualmente na faixa de 12 a 18 anos, porém, existem altos-fornos em operação com campanhas acima de 20 anos. A Figura 3.9 ilustra, utilizando dados do Encontro de Especialistas de Redução da ABM, o tempo acumulado das atuais campanhas dos grandes altos-fornos brasileiros.

Figura 3.9 – Tempo de campanha dos altos-fornos a Coque do Brasil, encontrado até 31/12/05. Encontro de Especialistas de Redução da ABM, 2005.



- *Alta produtividade:* Atualmente, o critério de avaliação da produtividade mais aceito é a razão entre a produção média diária e o volume interno do alto-forno (toneladas/dia/m³). A produtividade média dos altos-fornos brasileiros em operação fica na faixa de 1,80 t/dia/m³ a 2,80 t/dia/m³, dependendo da idade do forno, das particularidades de cada usina, das condições do mercado de aço e da eventual ocorrência de problemas operacionais. A produtividade de um alto-forno depende, também, da disponibilidade de oxigênio para enriquecimento do ar soprado (em porcentagem de acréscimo em relação ao teor normal de 21% no ar), que

é um dos fatores importantes para obtenção de elevadas produtividades. Outros fatores estão ligados à melhoria da permeabilidade da carga e redução do *fuel rate*, como será abordado posteriormente. A Figura 3.10 ilustra, utilizando dados do Encontro de Especialistas de Redução da ABM, o nível atual de produtividade de 12 dos principais altos-fornos do Brasil.

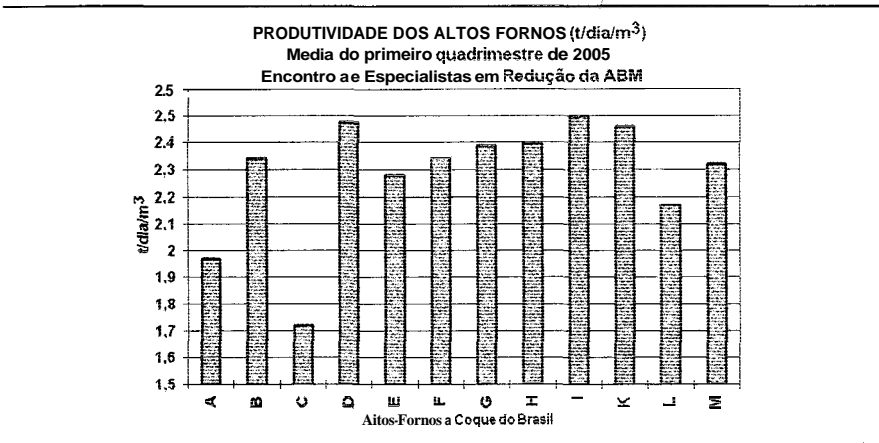


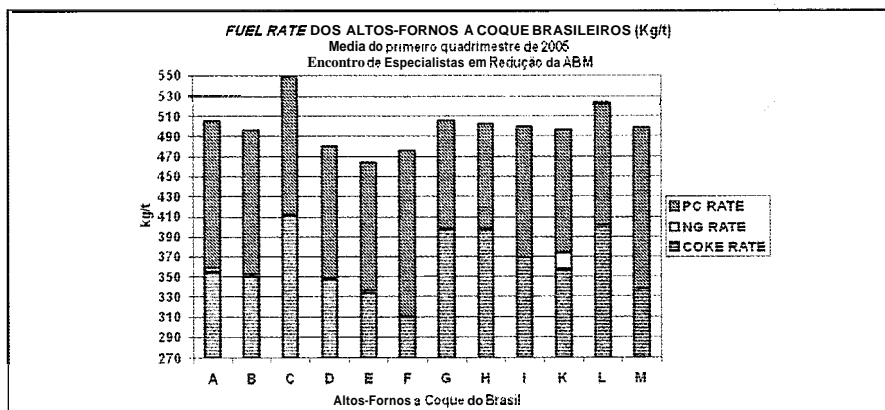
FIGURA 3.10 -
Produtividade dos altos-fornos a coque do Brasil (ENCONTRO DE ESPECIALISTAS..., 2005).⁵

- **Baixo consumo de combustível:** No caso brasileiro, os principais combustíveis utilizados no processo são o coque metalúrgico e o carvão pulverizado injetado pelas ventaneiras. No caso de usinas não-integradas de médio e pequeno porte e produtores de ferro-gusa, o carvão vegetal é o principal combustível utilizado. O consumo de combustível é medido em quilogramas de combustível consumido para a produção de uma tonelada de ferro-gusa. Em função do elevado custo destes combustíveis, existe sempre um empenho em se obter na operação do alto-forno um consumo de combustível cada vez mais baixo. Como o carvão pulverizado e os finos de carvão vegetal, que podem ser injetados diretamente pelas ventaneiras, são de custo relativamente mais baixo, é importante atingir altas taxas de injeção destes materiais, mantendo a estabilidade operacional do forno. A Figura 3.11 ilustra, utilizando dados do Encontro de Especialistas de Redução da ABM, o nível atual de consumo de combustíveis de 12 dos principais altos-fornos a coque do Brasil. Nesta Figura o consumo total de combustível (*fuel rate* em kg/t) de cada alto-forno está subdividido nos

Redução de Minério de Ferro em Altos-Fornos

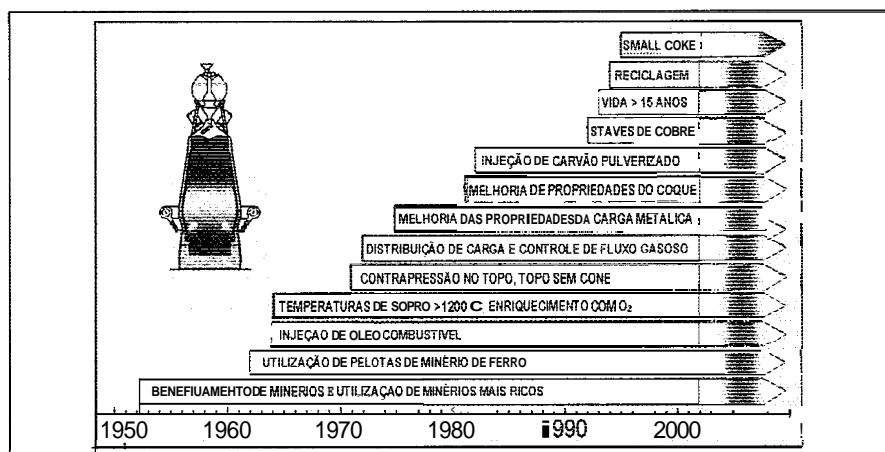
consumos parciais de coque (*coke rate* em kg/t), carvão pulverizado (*PC rate* em kg/t) e gás natural (*NG rate* em kg/t).

FIGURA 3.11 – *Fuel Rate* dos altos-fornos a coque do Brasil (ENCONTRO DE ESPECIALISTAS..., 2005).⁵



Desde a década de 1940 uma notável redução do *fuel rate* ocorreu, passando de valores de consumo de coque em torno de 1.000 kg/t para valores atuais, normalmente abaixo de 500 kg/t, e que deste total, cerca de 150 kg/t a 200 kg/t são relativos a injeções auxiliares pelas ventanciras, de custo mais baixo. Este notável ganho em eficiência operacional, tanto em consumo de combustível como em elevação da produtividade, só foi possível devido aos contínuos avanços tecnológicos na operação e manutenção dos altos-fornos, como resumido na Figura 3.12.

FIGURA 3.12 – Desenvolvimentos na tecnologia de alto-forno nas últimas décadas (AMELING, 2004).⁷



- *Qualidade adequada:* A qualidade do gusa deve estar dentro dos padrões exigidos pelo processo (Aciaria), que implica o atendimento de requisitos de composição química e de temperatura cada vez mais restritivos. A escória, também, deve ter uma composição adequada à sua utilização mais freqüente, que é a indústria cimenteira. A Tabela 3.1 mostra os componentes principais do ferro-gusa e da escória produzidos em um alto-forno a coque.

FERRO-GUSA (% em peso)								
Ti	Si	S	Mn	P	C	Ca	Outros	
0,03	0,38	0,026	0,69	0,091	4,82	93,86	0,1	
ESCÓRIA DE ALTO-FORNO 1% em peso)								
SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	S	MnO	TiO ₂	FeO	Outros
34,65	11,59	42,8	6,81	1,22	0,83	0,53	0,35	1,22

TABELA 3.1 – Análises típicas do gusa e da escória de um alto-forno a coque

3.2 Princípio de Funcionamento do Alto-Forno

3.2.1 Carregamento do alto-forno

Como fonte do metal (Fe) a ser extraído, o alto-forno utiliza o minério de ferro (geralmente hematita-Fe₂O₃ com teor de Fe em torno de 65%), podendo estar estes minérios granulados (10 mm a 30 mm) ou aglomerados de finos de minério, na forma de sinter ou pelotas.

Estes produtos trazem consigo impurezas, sendo as principais a sílica (SiO₂), o óxido de cálcio (CaO), o óxido de magnésio (MgO) e a alumina (Al₂O₃) que, fundidos, formarão um produto composto de silicatos complexos, denominado escória, que será separada da Fase metálica (gusa) durante a operação de vazamento do alto-forno.

O coque, no caso de médios e grandes altos-fornos brasileiros, é o combustível base utilizado no processo. Contendo cerca de 86% de carbono, ele reage com o ar injetado, queimando na zona de combustão e gerando a principal parcela de calor necessária para o processo. Além disso, em decorrência de sua combustão na região das ventaneiras, produz um gás, composto principalmente de nitrogênio e monóxido de carbono (CO), em altas temperaturas, que funcionará como o principal redutor dos óxidos de ferro.

Os fundentes são matérias-primas utilizadas para conferir às escórias uma proporção adequada de seus quatro óxidos principais (CaO - MgO - SiO_2 - Al_2O_3) e, por isso, variam em quantidade e tipo, em função da composição química do restante da carga. Os principais fundentes são: quartzo como fonte de SiO_2 , o calcário como fonte de CaO , o dunito ou serpentinito como fonte de MgO e SiO_2 , e a dolomita como fonte de CaO e MgO .

Da proporção dos quatro óxidos citados depende a fluidez da escória, suas propriedades dessulfurantes (remoção de enxofre) e de eliminação de outras impurezas, tais como, álcalis (K_2O e Na_2O) e óxido de zinco (ZnO), carregados no alto-forno.

As tendências mais modernas em termos de cargas para altos-fornos exigem a presença destes óxidos nos aglomerados (sínter e pelotas), minimizando ou eliminando o carregamento dos fundentes diretamente no alto-forno.

Os materiais sólidos carregados pelo topo do forno requerem de 6 a 8 horas para descer até a região inferior, aonde chegam transformados em produtos líquidos na forma de ferro-gusa e escória. Estes produtos líquidos são drenados do forno em intervalos regulares. Os gases formados na região inferior do forno, onde o ar quente é soprado, ascendem muito mais rapidamente (em torno de 6 a 8 segundos) até o topo, em contra-corrente com os sólidos que descem, após participar de inúmeras reações químicas.

Na operação do alto-forno, o carregamento e a descida da carga são continuamente monitorados por uma sonda mecânica ou radar, conforme esquematizado na Figura 3.13. Na operação normal, após o carregamento de uma batelada de carga, a sonda mecânica desce, toca a carga e acompanha a sua descida suave, conforme mostra o esquema da Figura 3.13. Quando o nível de carga predefinido é alcançado, a sonda é recolhida para que nova batelada seja carregada e assim sucessivamente. Eventualmente, podem ocorrer, devido a complicações operacionais mais comumente advindas de problemas com as matérias-primas, um “arriamento” ou “engaiolamento” da carga. O “arriamento” consiste em uma descida repentina da carga devido à formação de um vazio em uma região inferior. O engaiolamento consiste na interrupção da descida da carga e sempre é seguido de um grande arriamento. Estes eventos são extremamente prejudiciais à operação do alto-forno e

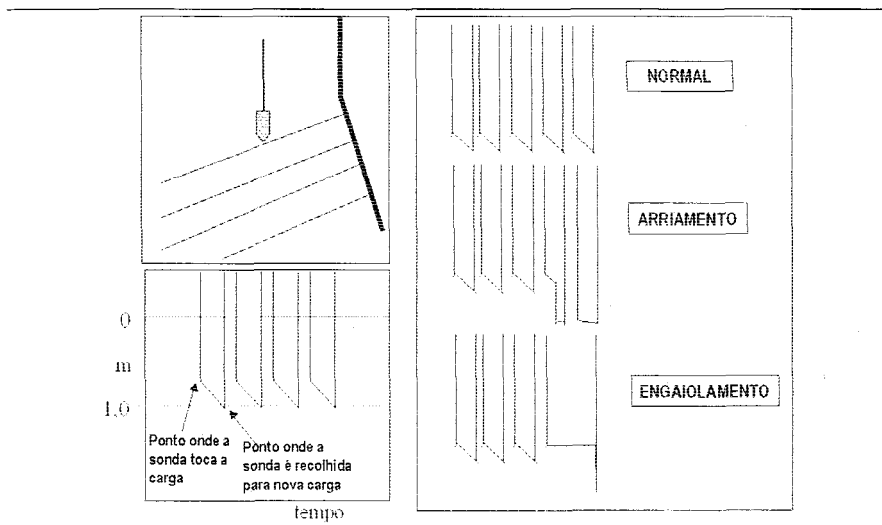


FIGURA 3.13 – Ocorrências da descida da carga no alto-forno (COMPANHIA SIDERÚRGICA PAULISTA, 2001).¹

sempre resultam em perda de produção e qualidade do ferro-gusa, portanto, devem ser analisados e sanados o mais rapidamente possível.

3.2.2 Distribuição de carga na alto-forno

A distribuição de carga consiste em se obter, por meio dos equipamentos instalados no topo do forno, uma distribuição radial de tamanho de partícula na carga, adequada ao escoamento gasoso desejado. Para isso, aproveita-se a grande diferença de permeabilidade existente entre as camadas de carga metálica e as de coque, para se obterem variações na relação entre as espessuras das respectivas camadas. Desse modo, as regiões onde a camada de coque é mais espessa que a camada de carga metálica tendem a ser mais permeáveis ao fluxo gasoso das regiões onde ocorre o inverso. Dentro das próprias camadas, regiões onde se concentram partículas de maior tamanho, também, tendem a ser mais permeáveis.

A distribuição de carga tem importância fundamental para a operação do alto-forno, uma vez que ela é um dos fatores determinantes da eficiência das trocas térmicas e das reações de redução, além de afetar diretamente o formato e a posição da zona coesiva e da carga térmica sobre a parede do forno. O controle da distribuição de carga é feito principalmente considerando

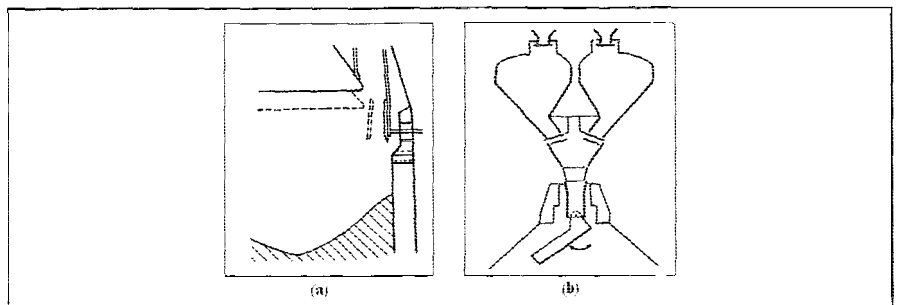
os fluxos gasosos central e periférico, sendo os dois muitas vezes antagônicos. Dessa forma, a distribuição mais adequada é um aspecto dinâmico da operação do alto-forno, variando conforme as necessidades. De modo geral, tem-se os seguintes conceitos genéricos:

- O fluxo gasoso central reduz a perda de carga na coluna, porém tende a reduzir o rendimento de gás,
- O fluxo gasoso periférico melhora a performance global, porém eleva a carga térmica na parede.

Pode-se distribuir carga no alto-forno de várias maneiras, que vão desde a sequência de carregamento das cargas até a variação do nível de carga abaixo do *stockline*. Entretanto, existem dois equipamentos específicos que permitem maior efetividade na distribuição de carga. Esses equipamentos são: o topo duplo cone, com armadura móvel, e o topo sem coque, equipado com a calha rotativa, cujos desenhos esquemáticos podem ser vistos na Figura 3.14. Como a calha rotativa é mais moderna e flexível, os altos-fornos mais novos normalmente são equipados com este tipo de equipamento para distribuir carga.

No caso do topo duplo cone, o avanço das placas da armadura móvel reduz a seção da goela e permite direcionar os materiais carregados mais na direção do centro do forno, se assim for desejado. No caso do topo sem cone, a calha ~ ~ ~ a permite colocar os materiais da carga em qualquer região na direção radial, pois, além do movimento rotativo, esta tem movimento angular em relação eixo central do forno. Em qualquer dos dois equipamentos procura-se direcionar o coque para a região central quando se deseja um fluxo gasoso preferencialmente central e, para a região periférica, quando se deseja um fluxo gasoso menos centralizado, como no caso de remoção de cascões agregados às paredes.

FIGURA 3.14 –
Equipamentos para
distribuição de carga no
alto-forno: (a) armadura
móvel e (b) calha rotativa
(COMPANHIA
SIDERÚRGICA PAULISTA,
2001).¹



A regra básica para o controle da distribuição de carga, independentemente do equipamento utilizado, é que a elevação da relação de espessuras entre a camada de minério e a camada de coque (relação minério/coque) em uma dada região reduz o fluxo gasoso no local.

3.2.3 Perfil térmico do alto-forno

O ar quente injetado na parte inferior do alto-forno, através das ventaneiras, promove a combustão do coque, gerando uma grande quantidade de calor e volume de gases. Os gases, produtos desta combustão, arrastando este calor, fluem para o topo do forno através dos vazios existentes entre as partículas e transferem o calor gerado para a carga, que desce em contracorrente. A Figura 3.15 apresenta, na forma de isoterma, um perfil típico das temperaturas dos gases no interior do alto-forno, para uma operação caracterizada por fluxo gasoso central. Observa-se na Figura 3.15 que em função das reações do processo, conforme será visto posteriormente, existe uma região de pouca variação de temperatura, denominada de zona de reserva térmica.

A carga fria carregada no topo, à medida que desce para as regiões inferiores do alto-forno, vai sendo aquecida pela corrente de gases que, partindo da região das ventaneiras a cerca de 2.100°C , transfere seu calor para a carga à medida que esta vai subindo no alto-forno chegando no topo a uma temperatura média entre 100°C e 250°C .

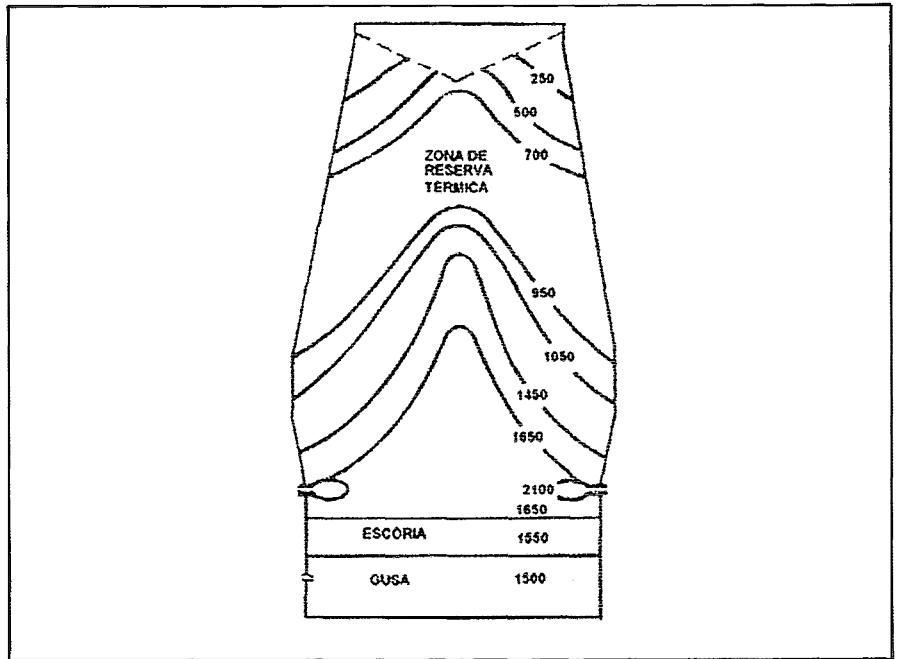
Dessa forma, do topo do alto-forno até o cadinho, as temperaturas das regiões do forno vão aumentando, até passar por um máximo em frente das ventaneiras, onde está ocorrendo a combustão do coque.

Ainda relativamente ao perfil térmico, há que se considerar que o grande volume de gases gerado na região das ventaneiras não flui para o topo de uma maneira uniforme, e em relação a seção horizontal da carga. Existe uma formação de caminhos preferenciais, onde haverá maiores temperaturas que outros pontos da mesma seção horizontal, pois ali está havendo um maior aporte de calor devido à passagem de maiores volumes de gases quentes. Normalmente, esses caminhos preferenciais ocorrem no centro da carga, conforme o ilustrado na Figura 3.13. Entretanto, pode haver também fluxo gasoso considerável pela região periférica do forno. Estes fenômenos podem

Redução de Minério de Ferro em Altos-Fornos

ser controlados através de equipamentos especiais de distribuição da carga, conforme visto anteriormente.

FIGURA 3.15 - Perfil térmico (temperaturas em graus Celsius) típico do alto-forno (COMPANHIA SIDERÚRGICA PAULISTA, 2001).1



3.2.4 A refrigeração do alto-forno

Durante a operação do alto-forno, as paredes são submetidas a uma intensa carga térmica resultante do fluxo de sólidos, líquidos e gases em altas temperaturas. A intensidade da carga térmica nas paredes varia com a localização no sentido vertical do forno e, também, pode variar com o tempo. O efeito combinado de valores elevados de temperaturas e da flutuação destes valores pode provocar o desgaste prematuro das paredes, encurtando a vida útil do alto-forno. Para minimizar a carga térmica, emprega-se, então, sistemas de refrigeração de modo a extrair para a água de refrigeração parte do calor transferido para as paredes e, desta maneira, reduzir a temperatura de trabalho das paredes. Os sistemas de refrigeração mais empregados são a refrigeração por placas de cobre e a refrigeração por staves, conforme ilustra a Figura 3.16.

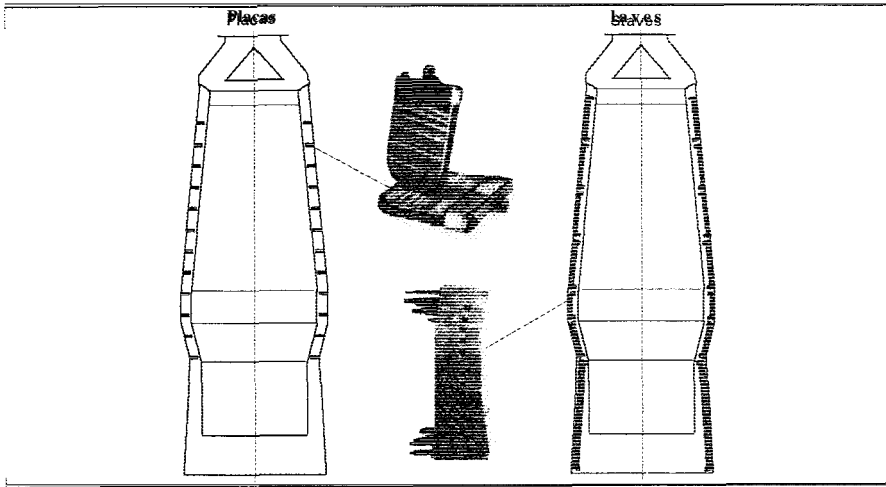


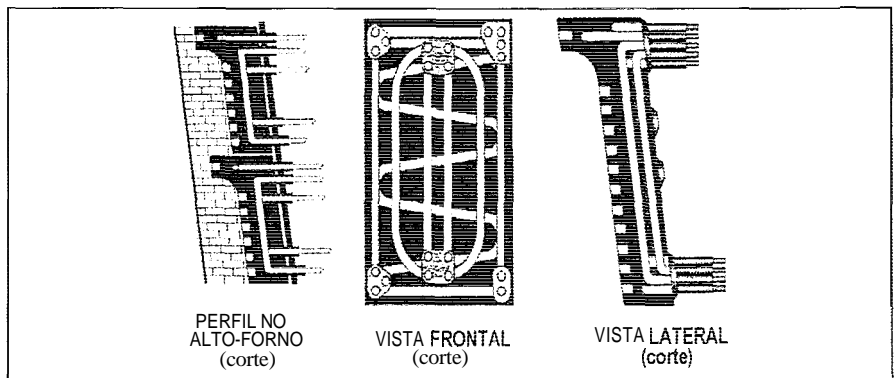
FIGURA 3.16 – Sistemas de refrigeração por Placas e por Staves (COMPANHIA SIDERÚRGICA PAULISTA, 2001).¹

A refrigeração por placas, que é um sistema mais antigo, consiste na inserção de placas de cobre entre os tijolos refratários. As placas de cobre possuem vazios internos por onde a água em circulação forçada extrai o calor transferido do interior do forno. A densidade de inserção das placas varia em função da região a ser refrigerada e do projeto do aito-forno, mas em média a distância entre as placas inseridas fica em torno de 300 mm. Este tipo de refrigeração se caracteriza pelo custo de fabricação e montagem relativamente menor e pela desvantagem de uma refrigeração não uniforme, causando o desgaste preferencial dos refratários assentados na região entre as placas.

A refrigeração por *staves*, que tem a vantagem de ser mais uniforme, teve início na Rússia na década de 1940 e passou por um período de intenso desenvolvimento até os dias atuais. Convencionou-se referir aos desenvolvimentos da tecnologia dos *staves* como gerações, e a geração atual é a quarta. Os *staves* são peças fundidas (ferro fundido ou de cobre) instaladas entre a carcaça de aço e a carga do forno. No interior destas peças existem tubulações de refrigeração, introduzidas antes do processo de fundição, por onde circula água desmineralizada ou abrandada (equivalente às águas utilizadas em caldeiras) em circuito fechado. Também podem existir refratários instalados durante a fundição na face quente, com objetivo de reduzir a abrasão e a carga térmica, conforme ilustra a Figura 3.17. As dimensões típicas de um *stave* de ferro fundido são 2 m de altura, e 180 mm a 450 mm de espessura.

A refrigeração por *staves* é com certeza um dos principais fatores contribuintes para a elevação da vida útil dos altos-fornos, porém uma desvantagem é que os *staves* não podem ser substituídos durante uma parada normal do alto-forno. Para tal, seria necessário uma parada de vários dias, com o abaixamento da carga e uma complicada operação de troca pela parte interna do forno. Sendo assim, sua operação requer um contínuo monitoramento das temperaturas e vazões de água, de modo a prevenir um desgaste prematuro. Se um aumento acentuado da carga térmica nos *staves* for observado; ações operacionais em distribuição de carga são requeridas de modo a reduzir o fluxo gasoso junto às paredes do forno.

FIGURA 3.17 –
Constituição típica de um
stave (COMPANHIA
SIDERÚRGICA PAULISTA,
2001).¹



3.2.5 Os regeneradores do alto-forno

Os regeneradores são trocadores de calor, e têm por função aquecer o ar injetado através das ventaneiras, utilizando, para isto, a combustão de gás do próprio alto-forno e gás proveniente da coqueria. Em usinas não-integradas o gás da coqueria pode ser substituído por gás natural ou gás liquefeito de petróleo. O regenerador recebe o ar na temperatura entre 150°C a 200°C proveniente dos turbo-sopradores, que é chamado de ar frio, e eleva esta temperatura para a faixa de 1.000°C a 1.250°C , dependendo de sua capacidade, passando a ser chamado de ar quente.

O combustível utilizado para se obter o aquecimento do regenerador é o gás misto, que é uma mistura de 85% a 95% de gás proveniente do próprio alto-forno (GAF) e de 5% a 12% de gás da coqueria (GCO). Para a queima do

gás misto, existem ventoinhas para prover a quantidade de ar necessária. O controle da vazão do gás misto, da relação ar/gás e da relação GAF/GCO, para incorporar o gás misto, faz parte dos procedimentos de controle da combustão.

A Figura 3.18 mostra um esquema básico de um regenerador. O gás misto e o ar entram em um queimador na base do regenerador, onde é feita a mistura e dá-se início à combustão. Na câmara de combustão é feita a queima completa do gás misto. A câmara tem grande altura e diâmetro, para evitar o impacto da chama no domo e para alargar mais a chama. O domo é a parte superior do regenerador e tem por finalidade inverter em 180° o sentido dos gases queimados e distribuir os gases para o empilhamento de tijolos refratários durante o aquecimento. Na fase de sopro, o sentido do ar quente é inverso. O empilhamento é constituído de tijolos refratários perfurados, dispostos uns sobre os outros, e tem por finalidade absorver o calor na fase de aquecimento. O empilhamento é sustentado por uma série de colunas de ferro fundido, onde a temperatura máxima de serviço é de 350° C.

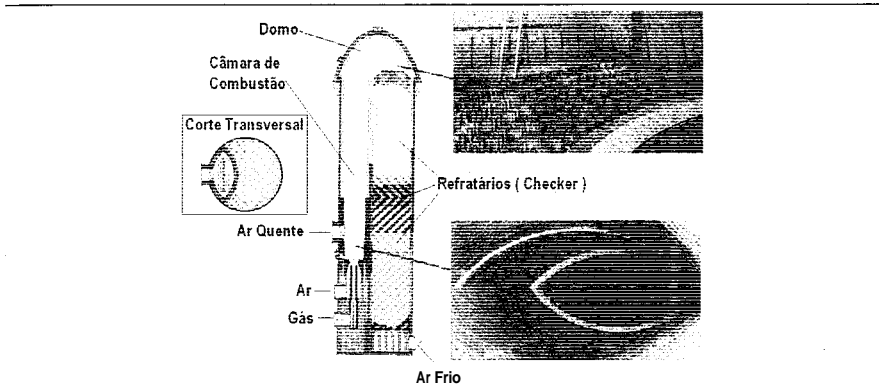


FIGURA 3.18 – Detalhes construtivos de um regenerador de alto-forno (HOT BLAST STOVE TECHNOLOGY, 1970).⁸

A superfície de aquecimento no empilhamento de um regenerador, normalmente, excede 40.000 m². Além da superfície, é necessário que haja espessura de refratário suficiente para armazenar o calor. A relação área/peso varia entre 20 m²/t e 24 m²/t e a capacidade de armazenagem térmica/área varia entre 23 kJ/m² e 26,3 kJ/m² (5,5 Kcal/m² a 6,3 Kcal/m²).

Os altos-fornos possuem conjuntos de três ou quatro regeneradores. Os regeneradores operam em ciclos, ou seja, enquanto um regenerador (para alto-forno equipado com três regeneradores) ou dois regeneradores (para

Redução de Minério de Ferro em Altos-Fornos

alto-forno equipado com quatro regeneradores) estão aquecendo o ar frio, ou seja, soprando ar quente para o forno, os outros estão em fase de aquecimento. Portanto, durante a operação dos regeneradores existem quatro fases cíclicas, conforme mostra a Tabela 3.2:

TABELA 3.2 – Fases de um ciclo de operação de um regenerador

FASES	OPERAÇÃO
Aquecimento	Regenerador em combustão, aquecendo o empilhamento
Sopro	Regenerador soprando ar quente para o alto-forno
Abafado	Regenerador aquecido e isolado com todas válvulas fechadas
Manobrando	Fase intermediária entre todas as outras.

Na fase “aquecimento”, o regenerador está queimando gás misto na câmara de combustão e direcionando estes gases para a chaminé, após aquecer o empilhamento. Na fase “sopro”, o regenerador está aquecendo o ar frio proveniente dos turbo-sopradares, que percorre o regenerador em sentido inverso ao dos gases queimados, recebendo calor do empilhamento. Na fase “manobrando”, o regenerador está mudando de condições de operação. Na fase “abafado”, o regenerador está em uma posição de espera para iniciar a fase de sopro, isolado do sistema de aquecimento e do sistema de sopro.

3.2.6 A limpeza de gases de alto-forno

O gás que deixa a goela do alto-forno arrasta consigo partículas finas da carga normalmente menores que 1 mm na taxa de 5 a 28 g/Nm³ de gás, devendo ser reduzido para valores menores que 0,01 g/Nm³ após a operação de limpeza, de modo a atender as especificações dos setores consumidores de gás,

A Figura 3.19 ilustra um dos vários sistemas de limpeza de gases para alto-forno. Utilizando as indicações numéricas da Figura, observa-se que os gases que deixam o alto-forno passam primeiro pelo coletor de pó [1], onde, devido ao alargamento da seção, os gases perdem velocidade e depositam as partículas mais grosseiras. O pó gerado nesta fase, da ordem de 10 kg a 15 kg por tonelada de gusa, é drenado por um sistema de válvulas na parte inferior [2] e é normalmente enviado para a sinterização.

O gás que deixa o coletor de pó, cujo teor de pó já é da ordem de 0,15 g/Nm³, passa por um sistema de lavagem tipo venturi com jatos de água. No primeiro estágio [3] o gás é lavado com água recirculada do segundo

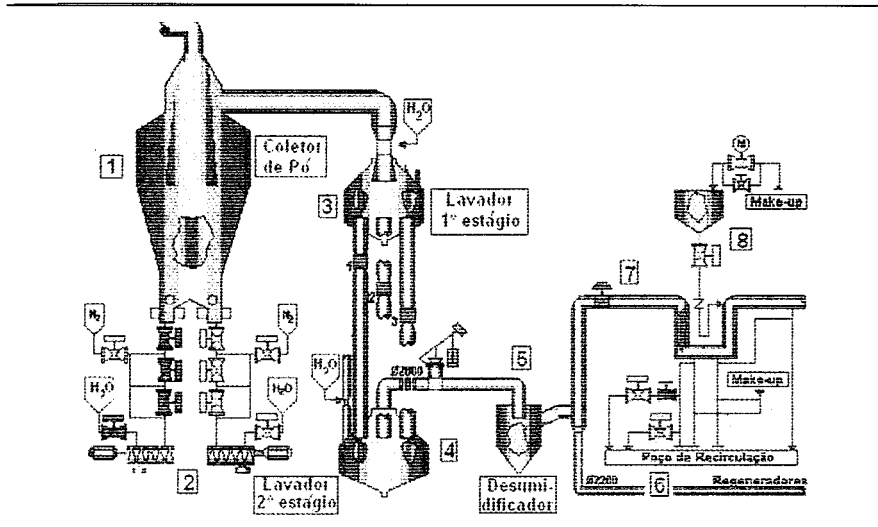


FIGURA 3.19 – Esquema mostrando um tipo de sistema de limpeza de gases ao alto-forno (CAMPANHIA SIDERÚRGICA PAULISTA, 2001).1

estágio, e no segundo estágio [4] com água tratada para remoção da lama em espessadores. Após a lavagem o gás passa por um desumificador [5] onde grande parte da umidade é retida por um sistema de chicanas.

Após limpo e desumificado, parte do gás é direcionado para os regeneradores [6] e o restante vai para um gasômetro [7], de onde é distribuído para a usina. Na linha de gás que vai para o gasômetro existe um selo hidráulico [8], cuja função é isolar a linha de gás do alto-forno durante uma parada do alto-forno.

3.2.7 A operação do alto-forno

A operação do alto-forno consiste do carregamento periódico de sólidos pelo topo, drenagem contínua ou periódica de líquidos pela parte inferior, contínua injeção de ar quente e hidrocarbonetos através das ventaneiras e remoção de gás e poeira pelo topo.

A maioria dos procedimentos operacionais básicos (carregamento, sopro de ar quente, operação dos regeneradores etc.) são executados sob controle automático, principalmente em altos-fornos mais modernos, equipados com diversos dispositivos de monitoramento interno do processo. A Tabela 3.3 indica alguns parâmetros de processo tipicamente monitorados.

Redução de minério de Ferro em Altos-Fornos

Figura 3. Exemplo
Parâmetros de
- processo e Controle

PARÂMETROS	EXEMPLOS
Temperaturas	Ar quente. águas de refrigeração. refratários, gás de topo, gusa etc.
Pressões	Pressão de sopro, em vários níveis no interior e topo etc
Fluxos	Ar soprado. injeções auxiliares, água de refrigeração, materiais drenados etc
Análises Químicas	Gusa e escória, materiais carregados. gases produzidos etc.
Aspectos Visuais	Visual da zona de combustão, aspecto do gusa. escória e matérias-primas etc
Valores Calculados	Rendimento de gds, temperatura de chama, velocidade de gBs etc.

Entre temperaturas, pressões, fluxos, valores calculados e outros, mais de 3.000 variáveis são tipicamente monitoradas em um alto-forno moderno. Normalmente, existe um Sistema Supervisório ou equivalente que permite o acompanhamento destas variáveis ou grupos de variáveis, razão na forma gráfica como na forma de índices operacionais.

O processo é contínuo, ou seja, não pára, a exceção de algumas paradas esporádicas para manutenções em equipamentos críticos, tipicamente 24 horas a cada três meses. Nestas ocasiões são preparadas cargas especiais com maior quantidade de coque, de modo a suprir a energia perdida durante o período de parada.

No dia-a-dia operacional, variações aleatórias, principalmente as variações nas propriedades das matérias-primas afetam o estado térmico do forno. Estas variações térmicas, caso não possam ser controladas, podem ter consequências graves, tais como desvios de qualidade do gusa, perdas de produção ou até mesmo o resfriamento do cadinho causando perdas significativas de produção. Assim, mesmo em operação normal, existe a necessidade constante de atuação no controle térmico do processo. A Tabela 3.4 resume os principais parâmetros que os operadores julgam para avaliar teoricamente o processo.

Para atuar preventivamente, corrigindo eventuais variações térmicas os operadores do alto-forno dispõem de algumas alternativas de atuação térmica no processo. As principais variáveis utilizadas pelos operadores no dia-a-dia operacional são as seguintes

- **Taxa de injeção auxiliar (carvão pulverizado, gás natural, etc.):** É uma das principais variáveis de controle térmico e deve ser usada preferencialmente, devido ao curto tempo de resposta. A sua disponibilidade é limitada na faixa inferior, pela mínima taxa de injeção e na faixa superior pela mínima temperatura de chama aceitável.

CONTROLE TÉRMICO DO ALTO-FORNO

Temperatura do Gusa	É o principal indicador de nível térmico. Deve-se atentar para fatores externos ao forno que afetam a Temperatura do Gusa (vulvina de gusa, cana-frio, medidor de temperatura etc).
Análise do Gusa	O Silício e o Enxofre do gusa também são excelentes indicadores térmicos, porém deve-se atentar o efeito das matérias-primas. O Enxofre é muito sensível a presença de água no fomo.
Análise da Escória	O aumento ou redução do silício do gusa afeta a basicidade binária ($B2 = CaO/SiO_2$) da escória. Portanto, quando o forno está esfriando, a B2 diminui e quando está esquentando a B2 aumenta.
Pressão de Base	Quando ocorre uma queda de nível térmico, a pressão de base tende a se estabilizar devido à redução de volume dos gases. Ocorre o contrário quando há elevação de nível térmico.
Descida de Carga (Ritmo de Produção)	O menor volume de gases, resultante da queda de nível térmico, resulta em redução de velocidade do gás, aumentando a velocidade de reação. Como consequência, quando está esfriando, a velocidade de descida de carga aumenta (maior produção) e fica mais estável.
Temperatura do Topo	Devido aos fenômenos comentados, ocorre queda da Temperatura do Topo quando o forno está esfriando. Deve-se tomar cuidado para outros fatores que afetam, como a umidade do coque.
Rendimento de Gás	Devido aos fenômenos comentados, ocorre elevação do Rendimento quando o forno está esfriando. Se a queda térmica for decorrente de deficiência de drenagem, ocorrerá queda do rendimento. No caso de erro de carregamento (coque a menos) o Rendimento de gás aumenta.
Temperatura do Guba	Uma elevação súbita de um ou mais termopares da parede do forno pode indicar queda de cascão e tem a possibilidade de levar a um resfriamento repentino do cadinho.
Delta de H ₂ (real - teórico)	Um valor positivo do Delta H ₂ (existe mais H ₂ que o esperado no gás) pode indicar a presença de água no forno. Se o analisador estiver inoperante ou a entrada de água for em uma região superior, o Delta H ₂ não vai ser efetivo.
Drenagem	Em um alto-forno mal drenado a acumulação de gusa e escória no cadinho resulta em perda de temperatura para o sistema de refrigeração e, além disso, este acúmulo resulta em maior empuxo, que comprime a zona de gotejamento, elevando a pressão e prejudicando o escoamento gasoso.
Variáveis Externas	O operador deve estar atento para com algumas variáveis-chave tais como a reatividade e o DI do coque, a % de fino do sinter, a umidade do coque, a utilização de coque e sinter, estoque e a pesagem das matérias-primas.
Aspectos Visuais	A avaliação só é completa se incluir a observação visual do gusa, da escória e das ventaneiras. A observação e análise dos aspectos visuais não podem ser realizadas por nenhum sistema de automação. É papel do operador experiente.

TABELA 3.4 – Parâmetros julgados pelo operadores para avaliar o estado térmico ao processo.

- **Temperatura de sopra:** também tem curto tempo de resposta, porém de forma a minimizar o coke rate, procura-se trabalhar com temperaturas mais elevadas, limitando a disponibilidade de maior elevação no caso de forno termicamente deficiente.

- *Umidade do ar:* Esta é uma excelente variável de controle térmico e é também útil no controle da pressão de base. Entretanto, na operação com injeções auxiliares, procura-se trabalhar com umidade mais baixa, de modo a não diminuir ainda mais a temperatura de chama, limitando sua disponibilidade no caso de forno termicamente deficiente.
- *Vazão de oxigênio:* A sua disponibilidade está ligada ao controle da temperatura de chama, que deve ser mantida na faixa de 2.000° C a 2.400° C.
- *Pressão de topo:* A sua disponibilidade está ligada ao controle da velocidade de gás na cuba, que deve ser mantida na faixa de 2,6 m/s a 3,2 m/s.
- *Coke rate:* A disponibilidade do *coke rate* para atuação térmica é limitada pelo tempo de resposta muito longo (em torno de seis horas a r a alcançar as regiões inferiores do forno).
- *Vazão de ar:* Quando o forno estiver termicamente deficiente, mal drenado ou com pressão alta, pequenas reduções de vazão são sempre efetivas e não prejudicam sensivelmente a produção do forno.

3.2.8 4 drenagem dos produtos do alto-forno

No cadinho do alto-forno, o gusa e a escória produzidos se separam por diferença de densidade, ficando o gusa na parte inferior. Como estes materiais ocupam os espaços entre os interstícios do coque presente no cadinho, o volume para acumulação destes materiais é limitado e a sua acumulação em excesso pode causar sérios problemas operacionais, tais como marcha irregular, queima de ventaneiras e esfriamento do cadinho. Portanto, a drenagem regular do cadinho é uma operação fundamental e deve ser controlada criteriosamente. Para isso, são realizados balanços dinâmicos de materiais produzidos e drenados, de modo a se ter os residuais de gusa e de escória no cadinho a cada instante.

A Figura 3.20 ilustra a seqüência de eventos que ocorrem durante uma corrida típica do alto-forno. Após a broqueamento do furo de gusa, por meio de uma perfuratriz, o gusa normalmente é o primeiro material a ser drenado e, após algum tempo, a escória passa a ser drenada em paralelo com o gusa. O final da corrida é determinado pelo início de saída do gás do interior do forno pelo furo, indicando que, naquela região, a superfície da escória

atingiu o nível do furo de gusa. Neste momento, o furo é novamente obturado com massa à base de carbono por meio do canhão de lama, e um outro furo de gusa deverá ser aberto, ou já estar aberto, em outra casa de corrida, de modo a manter uma drenagem contínua do aito-forno.

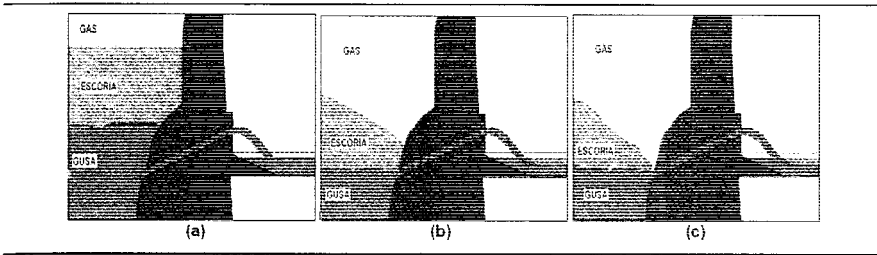


FIGURA 3.20 - Sequência de eventos durante uma corrida do alto-forno: (a) início da corrida, (b) início da escória e (c) final da corrida (COMPANHIA SIDERÚRGICA PAULISTA, 2001).¹

A injeção da massa de tamponamento do furo de gusa (composto a base de alcatrão, ligantes e vários aditivos minerais) provoca um acúmulo de massa sinterizada na parte interna do forno, denominado “cogumelo”. Durante a operação de broqueamento para a abertura de furo, uma perfuratriz hidráulica ou pneumática, utilizando uma haste com uma broca na extremidade, gira e percussiona em alta velocidade até alcançar o gusa líquido, rompendo o cogumelo, conforme mostra o esquema da Figura 3.21. O comprimento do furo no início de uma corrida fica na faixa de 2,5 m a 4 m, dependendo do tamanho do aito-forno. A Figura 3.21 mostra também a operação de fechamento do furo com a massa de tamponamento utilizando o canhão de lama, na qual o cogumelo é recomposto.

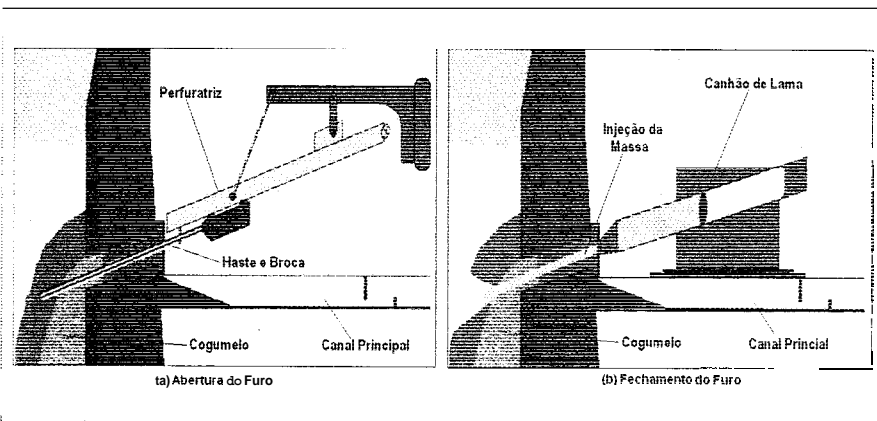
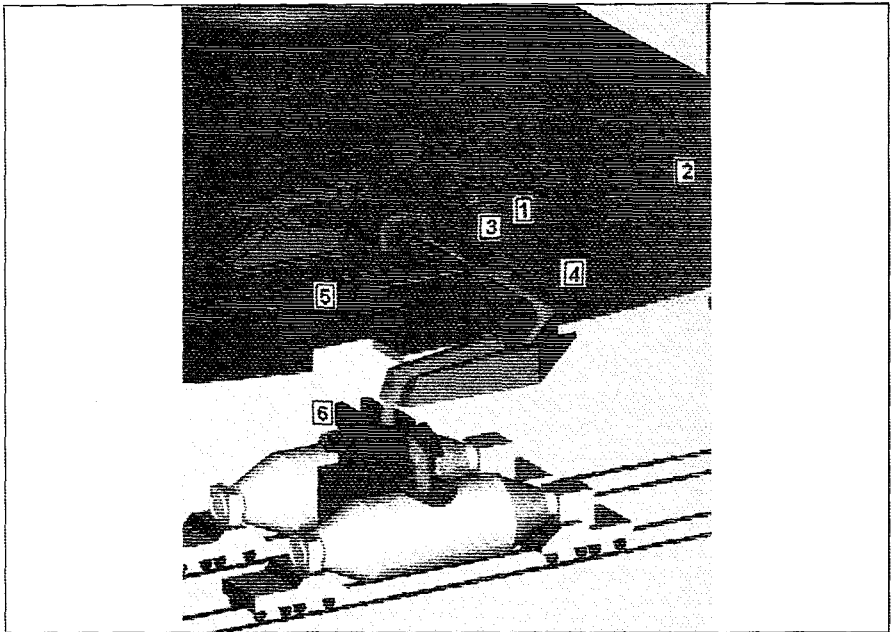


FIGURA 3.21 – Operação de abertura (a) e de fechamento (b) do furo de gusa (COMPANHIA SIDERÚRGICA PAULISTA, 2001).¹

Redução de Minério de Ferro em Altos-Fornos

Para descrever a operação de drenagem do alto-forno serão utilizadas as indicações numéricas da Figura 3.22, que mostra os principais equipamentos da casa de corrida do alto-forno. O canhão de lama [1] e a perfuratriz [2] são os equipamentos utilizados, como visto anteriormente, para fechar e abrir o furo de gusa. O gusa e a escória, após deixarem o furo na forma de um jato de material líquido, são separados por diferença de densidade no canal principal [3]. A escória é direcionada para um sistema de granulação através do canal de escória. O gusa após passar também pelo canal secundário [4], é direcionado para carros torpedos posicionados no piso inferior da casa de corrida, por meio da bica basculante [6], cuja função é permitir a troca dos carros torpedos, direcionando o fluxo de gusa para o carro ao lado. O enchimento do carro torpedo pode ser monitorado automaticamente através de um medidor de nível [5].

FIGURA 3.22 - Drenagem do gusa para os carros torpedo (METALLICA ASSESSORIA E PLANEJAMENTO LTDA, 2006).9



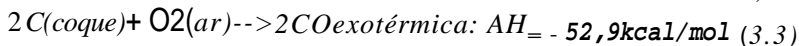
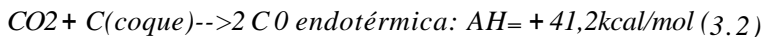
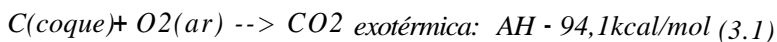
3.3 Principais Reações no Interior do Alto-Forno

O alto-forno é um reator químico em contra-corrente. A transferência de calor dos gases ascendentes para os sólidos que descem é acompanhada pela transferência de oxigênio destes sólidos para os gases. Centenas de reações químicas ocorrem no processo de alto-forno, porém algumas são fundamentais para a compreensão do processo, como será descrito a seguir.

3.3.1 Zona de combustão

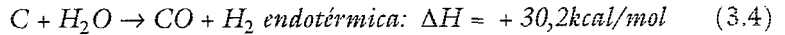
O ar aquecido pelos regeneradores é injetado nas ventaneiras a uma velocidade que varia de 180m/s a 280m/s. Decorrente desta alta velocidade, o coque em frente das ventaneiras é empurrado formando uma cavidade que é a "zona de combustão" descrita anteriormente, onde o coque circula em movimentos rápidos, ao mesmo tempo em que é queimado pelo oxigênio do ar e vai diminuindo de tamanho à medida que reage. O tamanho da "zona de combustão" varia de acordo com os parâmetros operacionais de cada alto-forno, mas normalmente atinge a faixa de 1,5m a 2,5 m, além da ponta das ventaneiras.

As principais reações do coque na frente das ventaneiras, onde ele é queimado pelo ar injetado gerando temperaturas de chama da ardem de 2.000 a 2.400° C, ocorrem como mostrado a seguir, lembrando que o AH é chamado calor de reação. Quando o AH é positivo o calor é absorvido e a reação é declarada como endotérmica. Quando o AH é negativo, o calor é liberado e a reação é declarada como exotérmica.



Inicialmente ocorre a oxidação do carbono do coque pelo oxigênio do ar, conforme a reação (3.1), gerando grande quantidade de calor. Como o CO₂ é instável na presença de carbono acima de 1.000°C, e existe temperatura e carbono em excesso (coque presente), a reação (3.2), reconhecida como

reação de Boudouard, se desenvolve rapidamente. Dessa forma, para termodinâmica tudo se passa como se somente ocorresse a reação (3.3), ou seja, que todo o oxigênio do ar injetado no alto-forno queima o carbono do coque produzindo CO. O ar soprado contém ainda umidade cuja decomposição se dará segundo a reação:



A equação (3.4) explica o efeito refrigerante sobre a temperatura de chama proporcionado pela umidade do ar soprado. Na operação de alto-forno, costuma-se injetar cerca quantidade de vapor junto com o ar, de modo a manter constante a umidade do ar e exercer melhor controle sobre a temperatura de chama.

Pelas reações descritas, a composição aproximada dos gases produzidos pela combustão nas ventaneiras sem injeções auxiliares (e também desprezando a parte proveniente da umidade do ar, o que não afetará muito o percentual) pode ser obtida considerando que cada molécula de O₂ do ar gera 2 moléculas de CO. Portanto, em termos de volume, temos que:

Volume total de gases = Volume de Nitrogênio + Volume de oxigênio

$$\% N_2 = \frac{79}{79 + (21 \times 2)} \times 100 = 65,3\% \quad (3.5)$$

$$\% CO = \frac{21 \times 2}{79 + (21 \times 2)} \times 100 = 34,7\% \quad (3.6)$$

Assim, conforme a equação (3.6), a combustão na ventaneira gera um gás com cerca de 35% de CO na temperatura calculada de chama, ou seja um gás com alto poder de redução que se dirigirá para as partes superiores do alto-forno para reagir com óxidos de ferro, retirando-lhes o oxigênio combinado e produzindo o ferro livre. A injeção de combustíveis auxiliares pelas ventaneiras pode alterar significativamente a composição do gás gerado, principalmente, com relação à presença de hidrogênio.

3.3.2 Reações de redução

O regime de trocas térmicas no alto-forno, aliado às condições termodinâmicas e cinéticas impostas pela reação de Boudouard, permite a divisão do forno em duas zonas. Estas zonas possuem características tão distintas que é possível tratá-las como reatores diferentes, a saber:

- a) Zona de preparação: onde o carbono do coque praticamente não reage, constituindo um material inerte;
- b) Zona de elaboração: onde o carbono do coque reage com o CO₂ restituindo o poder redutor do gás através da reação de Roudouard.

A existência de uma temperatura crítica do ponto de vista cinético, abaixo da qual o carbono do coque não reage com os gases, é importante pelo fato de o coque ser o maior componente de custo do gusa. É interessante, portanto, transferir o máximo possível de oxigênio da carga ferrífera aos gases, antes que o carbono passe a ser gaseificado, ou seja, na zona de preparação.

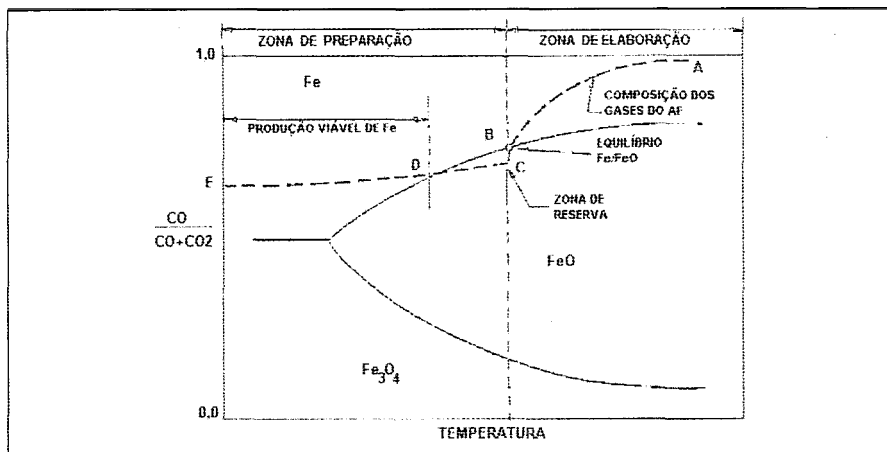
A delimitação entre as zonas de preparação e elaboração pode ser melhor entendida observando-se a Figura 3.23, que mostra, em um diagrama de equilíbrio "Fe-C-O", as variações típicas das condições internas do alto-forno, na forma de uma linha pontilhada, desde a zona de combustão até o topo do forno. O ponto "A" na Figura corresponde ao gás que sai da zona de combustão com alto potencial redutor. A medida que as reações de redução se processam, o potencial redutor do gás cai, bem como a temperatura, e o gás que entra na zona de preparação, cuja composição é representada pelo ponto "B", está localizado exatamente sobre a linha de equilíbrio "FeO-Fe", no caso de haver tempo suficiente para a redução completa dos óxidos de ferro para wustita na zona de preparação. Existindo a zona de reserva térmica, onde a temperatura é constante, o gás, ao reduzir a carga ferrífera, atinge o ponto "C". Continuando sua ascendência no forno, o gás continuará a se resfriar a partir do ponto "C", estando ainda sobre o campo de estabilidade da wustita. Ao atingir o ponto "D" o gás volta a penetrar no campo de estabilidade do ferro e havendo condições cinéticas favoráveis, pode ser produzida também alguma quantidade de ferro. O ponto "E" fornece a composição dos gases de topo do forno.

Redução de Minério de Ferro em Altos-fornos

- a) A Zona de preparação na parte superior do forno, pode ser considerada como um reator em contracorrente que tem a finalidade de secagem, preaquecimento e pré-redução da carga pelos gases ascendentes. Outras reações que podem ocorrer na zona de preparação são: a vaporização da água de hidratação; a reação de deposição do carbono ($2CO \rightarrow C + CO_2$); e a reação de formação do gás de água ($CO_2 + H_2 \rightarrow CO + H_2O$).

A evaporação da umidade da carga é feita de maneira violenta; pois o gradiente de temperatura nos sólidos é elevado, com a temperatura superando os $100^\circ C$ em poucos minutos.

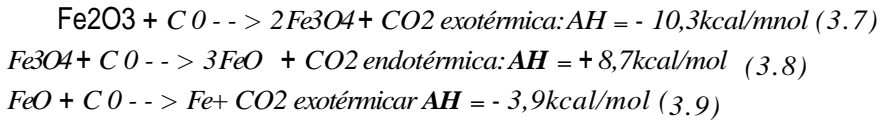
FIGURA 3.23 - Diagrama de equilíbrio Fe-C-O, indicando a composição dos gases (CAMPOS, 1984).6



- b) A Zona de elaboração é um reator em contracorrente ainda mais complexo. Os gases provenientes da combustão do coque (essencialmente CO e N_2) deixam a zona de combustão em temperaturas elevadas e trocam calor com o gusa e a escória na zona de gotejamento. Prosseguindo o movimento ascendente, os gases penetram na zona de amolecimento e fusão onde há um forte gradiente térmico pois aí ocorre a fusão da carga ferrífera; boa parte da redução final do FeO a Fe , e gaseificação do coque pela reação de Bourdourard.

Na estreita faixa da zona granular que pertence a zona de elaboração, logo acima da zona coesiva, sucedem grande parte das reações de redução da carga ferrífera e da gaseificação do coque, sendo portanto uma região de alta endotermicidade, com elevado gradiente de temperatura.

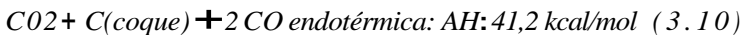
A redução da hematita Fe_2O_3 , a Fe é realizada em estágios, conforme as seguintes equações:



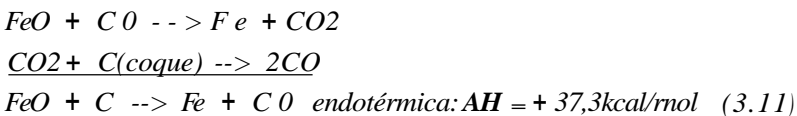
Observando o diagrama Fe-C-O na Figura 3.23, nota-se que a redução da wustita (3.9) necessita de um elevado potencial de gás redutor. Este gás, após a redução da wustita, ascende no forno e reduz facilmente a magnetita (3.8) e a hematita (3.7) devido ao baixo potencial redutor necessário a estas reações. Assim, a redução da wustita (3.9) é de capital importância no forno, principalmente, porque 69% do oxigênio contido na hematita estará presente na sob a forma de wustita.

As equações (3.7), (3.8) e (3.9) são chamadas reações de redução indireta e o produto é o CO_2 . Globalmente, a redução indireta é levemente exotérmica. Como o CO_2 representa o produto final da combustão do carbono, a utilização da energia química do carbono será mais completa quanto maior a quantidade de oxigênio removido pelas reações de redução indireta.

Entretanto, acima da temperatura crítica, em torno de $950^\circ C$ para o coque, na entrada da zona de elaboração, passa a ocorrer a gaseificação do coque, vista anteriormente como equação (3.2). Assim; o CO_2 produzido pela redução indireta é rapidamente reduzido pelo carbono de acordo com a equação (3.10), conhecida como reação de Boudouard ou *solution-loss*.



Combinando as equações (3.9) e (3.10), tem-se:



Redução de Minério de Ferro em Altos-Fornos

A equação (3.11) é chamada reação de redução direta e é altamente endotérmica em contraste com a redução indireta e, além disso, consome e degrada o coque. A vantagem da redução direta é que ocorre com consumo menor de carbono para cada mol de oxigênio removido, porque, o produto da reação é o CO , que pode realizar novas reações de redução.

Para minimizar as necessidades térmicas do alto-forno é vantajoso que a redução indireta ocorra preferencialmente à redução direta, já que a primeira gera calor e a segunda consome calor. A introdução do hidrogênio, como um componente do combustível injetado, move as condições de equilíbrio entre as reações na direção da redução indireta.

Além da redução direta, outras reações que podem ocorrer na zona de elaboração são a redução direta dos óxidos das impurezas, dessulfuração do gusa, reação de formação de gás d'água, combustão do carbono, redução da umidade do sopro etc.

A Tabela 3.5 resume as principais reações químicas e o comportamento térmico das várias regiões do alto-forno.

TABELA 3.5 -
Comportamento químico e térmico nas várias zonas do alto-forno

REGIÃO	COMPORTAMENTO QUÍMICO	COMPORTAMENTO TÉRMICO
Homem Morto (Cadinho e Rampa)	Saturação do gusa com carbono e redução final dos óxidos de impurezas.	O gotejamento de gusa e escória transfere calor para o cadinho.
Zona de Combustão	O carbono do coque é oxidado para CO_2 e então para CO .	Grande geração de calor pela combustão do coque.
Zona de Gotejamento (Rampa e Ventre)	Óxidos de impurezas são reduzidos e o ferro absorve carbono durante a percolação através do leito de coque.	Transferência de calor dos gases ascendentes para o coque e as gotas de ferro e escória descendentes.
Zona Coesiva (Rampa e Ventre e Baixa Cuba)	Formação e fusão da escória, redução final do FeO a Fe e formação das gotas de metal líquido.	Transferência de calor dos gases ascendentes para os sólidos em fusão.
Início da Zona de Elaboração (Baixa Cuba e Ventre)	Redução do FeO e Gaseificação do Coque (Bourdouard).	A temperatura do gás ascendente cai rapidamente devido à endotermicidade da Gaseificação do coque (Bourdouard).
Zona de Reserva Térmica (Média e Baixa Cuba)	Ocorre predominantemente a redução indireta do FeO .	Varição mínima de temperatura ao longo da região, pois a redução indireta da wüstita é fracamente exotérmica.
Região Superior da Zona Granular (Alta e Média Cuba)	Redução do Fe_2O_3 e Fe_3O_4 para FeO .	A temperatura dos gases diminui rapidamente devido à transferência de calor para os sólidos carregados. A evaporação da umidade da carga também rouba calor.

3.3.3 Reações de Incorporação dos elementos de Liga

A Figura 3.24 mostra esquematicamente um diagrama com as principais transferências de elementos químicos entre o gusa, a escória e o fluxo gasoso na região inferior do alto-forno. Observa-se que a cinza do coque desempenha um papel fundamental para a incorporação do enxofre e do silício no gusa.

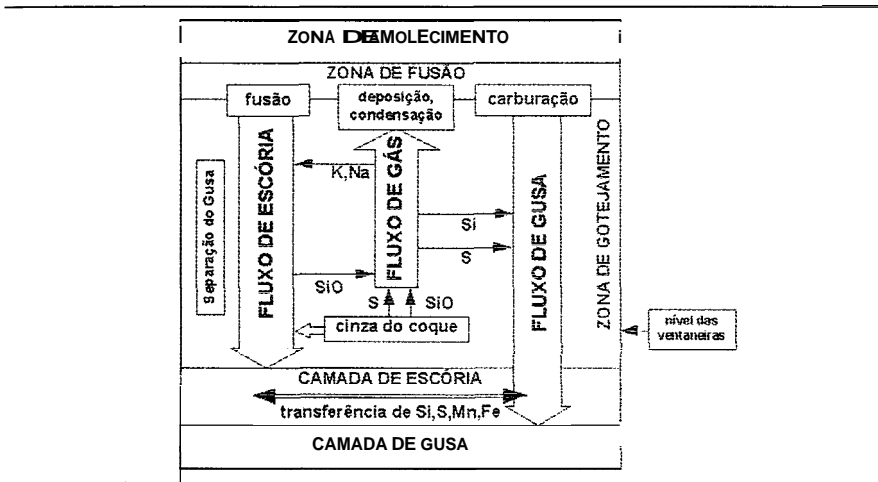


FIGURA 3.24 - Diagrama esquemático indicando as transferências de elementos químicos na região inferior do forno (OMORI e NIHON, 1987).10

3.3.3.1 Mecanismos de transferência do silício

O silício é o elemento de liga mais importante do ferro-gusa do ponto de vista do controle térmico do processo, pois variações de nível térmico afetam diretamente sua incorporação ao gusa.

As duas grandes fontes de SiO₂ no alto-forno são o gangn dos minérios e a cinza do coque. As contribuições de cada fonte dependem dos tipos de minérios e de coque, bem como do *colze rntc*.

Dois mecanismos para a transferência de Si para o gusa podem ser considerados: diretamente da escória para o gusa, através de reações metal-escória,



e indiretamente, onde o Si é transferido da escória ou da cinza do coque para a fase gasosa como SiO; o SiO, então, reage com o carbono do ferro gusa, incorporando o silício.



Estudos cinéticos das reações metal-escória, de vários autores, concluíram que a reação (3.12) é muito lenta, portanto, a transferência de silício via SiO, reações (3.13) e (3.14), é a principal rota de transferência no alto-forno. A reação (3.13) é fortemente favorecida pelo aumento da temperatura e, pelo princípio de Le Chatelier, ela é deslocada no sentido das fases condensadas com a elevação da pressão, ou seja, ocorre redução da geração de SiO com a elevação de pressão. Isto explica a influência positiva da elevação do nível térmico e negativa da elevação da pressão de base do alto-forno sobre o teor de silício do gusa. A reação (3.14) é favorecida pelo aumento da zona de gotejamento, ou seja, pela elevação da zona coesiva, o que aumenta o tempo disponível para a reação.

Vários autores também concluíram que existem condições de oxidação do silício pelo MnO e pelo FeO da escória no cadinho. A reoxidação do silício se dá segundo as reações:



Considerando o mecanismo de incorporação do silício através do gás SiO e também a reoxidação do silício no cadinho do alto-forno, a Figura 3.25 relaciona na forma de um diagrama tipo "espinha de peixe", os principais fatores que afetam o silício do gusa.

Na parte superior da Figura, temos os fatores que afetam o mecanismo de incorporação de silício, descrito pelas reações (3.13) e (3.14). Neste caso, todos os parâmetros do processo que afetam o nível térmico do forno, a altura e o formato da zona coesiva, a geração do gás SiO e o contato gás/sólidos são importantes para o controle da incorporação de silício.

Na parte inferior da Figura, temos os fatores que afetam o mecanismo de reoxidação do silício no cadinho, descrito pelas reações (3.15) e (3.16). Neste caso, os parâmetros do processo mais importantes são: o tempo de residência das gotas de gusa na camada de escória, as condições de pressão e temperatura; a presença dos agentes oxidantes (FeO e MnO); e a espessura da camada de escória que sobrenada a camada de gusa no cadinho.

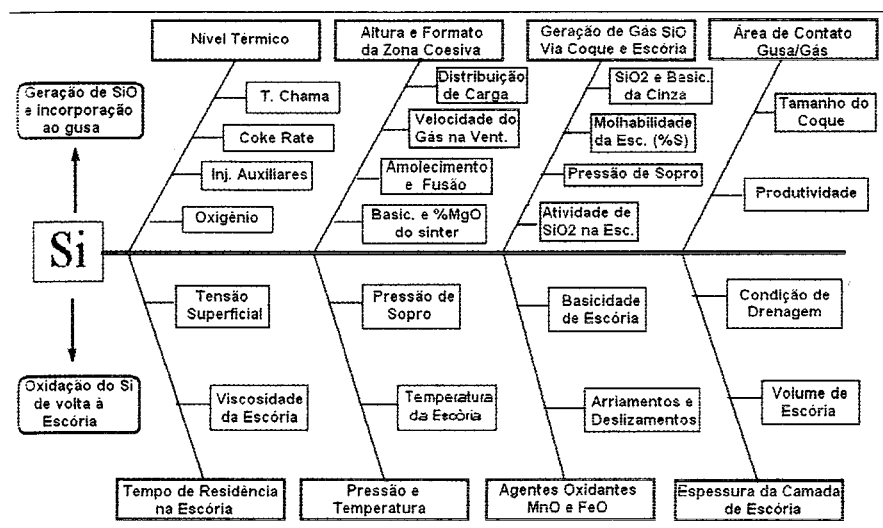


FIGURA 3.25 - Espinha de peixe para os fatores que afetam o silício do çusa (COMPANHIA SIDERÚRGICA PAULISTA, 2001).¹

3.3.3.2 Transferência de outros elementos para o gusa

Os minérios e o coque contêm inúmeras outras impurezas e grande parte delas são reduzidas no alto-forno. Estas impurezas ou são dissolvidas no gusa, ou são removidas via escória ou pelo gás de topo. Algumas destas impurezas, tais como o enxofre e o fósforo, são altamente indesejáveis, pois são bastante prejudiciais à qualidade dos aços produzidos e sua remoção externa ao alto-forno tem custo elevado.

Óxidos de metais, tais como, níquel, cobre e chumbo, embora presentes em pequena quantidade, são facilmente reduzidos, de modo que estes são inteiramente dissolvidos pelo gusa. O óxido de fósforo necessita de maiores temperaturas e a redução só é completada na região inferior do forno. A redução do óxido de manganês é mais difícil e ocorre apenas em regiões de

temperatura elevada, de modo que a extensão de sua redução varia entre 50% a 75%, dependendo do nível de temperatura atingido, e o restante é removido pela escória. Portanto, o controle deste elemento no gusa se dá basicamente pelo controle da quantidade carregada

A maior parte do enxofre carregado no alto-forno está presente na forma do coque. Durante a descida da carga, na cuba e na rampa, o enxofre é absorvido pelo gusa e pela escória formada, e a sua distribuição entre eles é definida pelas condições no cadinho. A limitação do teor de enxofre do gusa é feita inicialmente pelo controle da quantidade carregada, limitando-se a sua presença na cinza do coque *c/ou* reduzindo o *coque rate*. No processo de alto-forno as principais ações são para favorecer a sua incorporação à escória tais como, elevação da basicidade da escória e aumento do volume de escória.

3.4 Injeção de Carvão Pulverizado em Altos-fornos

3.4.1 Efeito da injeção de carvão pulverizado na operação do alto-forno

Teoricamente, qualquer material que contenha alta porcentagem de hidrocarbonetos é passível de ser injetado pelas ventaneiras do alto-forno. A lista de materiais já testados é grande, e inclui: plásticos picotados; óleo combustível; álcool; alcatrão; gás natural; borras oleosas; coque de petróleo; carvão vegetal e carvão mineral pulverizados, entre outros. A escolha do material mais adequado passa, obviamente, pelos aspectos práticos e econômicos desta injeção.

Praticamente todos altos-fornos brasileiros, que usam injeção de combustíveis auxiliares, utilizam o carvão (vegetal ou mineral) pulverizado. Injeção de Carvão Pulverizado (ICP) tem como objetivo básico a substituição de parte do coque carregado, objetivando redução de custos. O coque exerce basicamente três funções no alto-forno:

- * Fonte de calor pela reação com o oxigênio do ar injetado.
- * Fonte de gases redutores pela reação com o oxigênio do ar injetado e pela subsequente reação de gaseificação do coque pelo CO₂, produzido pela redução em altas temperaturas.

* Leito permeável para suportar os materiais da carga, particularmente nas regiões inferiores do alto-forno, através do qual o metal e a escória líquidos podem percolar para o cadinho e os gases ascenderem.

O carvão pulverizado injetado pelas ventaneiras pode desempenhar duas das três funções básicas do coque: prover uma fonte de calor e servir como fonte de gás redutor. A ICP não pode prover um leito permeável no alto-forno, como no caso do coque. O uso da ICP pode propiciar os seguintes benefícios:

- * Redução de custos pela substituição de coque por carvões não-coqueificáveis de baixo custo, além de redução do consumo energético.
- * Grande elevação de produtividade, devido a possibilidade de elevação do enriquecimento do ar soprado com oxigênio.
- * Extensão da vida útil das baterias de coqueificação, devido à redução da demanda de coque.
- * Maior estabilidade de qualidade do gusa e redução do teor de de silício.

O carvão é injetado diretamente dentro da zona de combustão através das ventaneiras, juntamente com o ar quente, que pode ser enriquecido com oxigênio. O carvão é injetado, absorve calor, desvolatiliza-se e inicia a combustão logo que deixa a lança de injeção. A Figura 3.26 mostra a injeção do carvão por meio de uma lança, inserida no sistema de sopro de ar quente, de modo que o fluxo de carvão se mistura com o fluxo de ar injetado, facilitando a sua combustão.

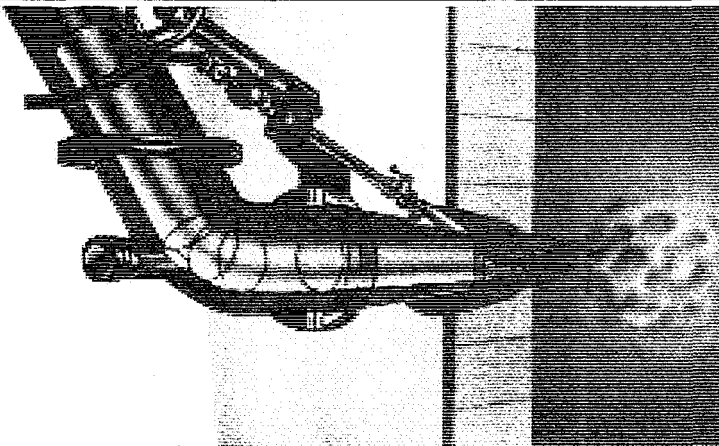


FIGURA 3.26 - Injeção de carvão pulverizado através de uma lança inserida na ventaneira (COMPANHIA SIDERÚRGICA PAULISTA, 2001).1

Todas as usinas objetivam injetar a máxima quantidade possível de carvão, de modo a reduzir custos. Porém, à medida que a taxa de injeção aumenta, ocorre uma tendência de elevação da quantidade de carvão não-queimado (char) e da energia cinética do sopro, causando:

- * Variações no formato da zona de combustão e instabilidade a zona de combustão.
- * Redução da permeabilidade do coque nas vizinhanças da zona de combustão.
- * Aumento da degradação do coque na zona de combustão.
- * Variações na distribuição de temperatura da zona de combustão.

Além destes fenômenos que ocorrem na zona de combustão, a elevação da ICP resulta em redução significativa do *coke rate*, ou seja, a coluna de carga do forno conterá cada vez mais carga metálica e menos coque. A Tabela 3.6 resume os fenômenos que ocorrem no alto-forno operando, com baixo coke rate, em função de elevadas taxas de ICP.

Existe um consenso entre os usuários da ICP que, até taxas de 100 Kg/t ou mesmo de 150 kg/t para alguns, não há necessidade de alterações significativas nos procedimentos operacionais. Porém para taxas mais elevadas, existe a necessidade de se experimentar com a distribuição de carga, com o enriquecimento do ar com oxigênio e com os critérios de qualidade das materias-primas, antes de se obter uma operação estável.

3.4.2 Vantagens da injeção de carvão pulverizado no alto-forno

A motivação para a injetar carvão pulverizado no alto-forno advém tanto por razões econômicas quanto por razões operacionais. Ao substituir carvão metalúrgico, que tem de ser processado para coque, por carvão tipo vapor, o operador do alto-forno não apenas utiliza um combustível mais barato como também evita os custos da coqueificação para aquela quantidade injetada.

Utilizando preços internacionais para o ano de 200, as razões econômicas podem ser entendidas por meio de balanço econômico simplificado, como se segue:

- * O custo do carvão para injeção fica aproximadamente na faixa de US\$ 90 a US\$ 100/t, dependendo dos custos de transportc e da disponibilidade no próprio país.

TABsIA 3.6 - Fenômenos que ocorrem na operação com baixo coke rate

OPERAÇÕES		FENÔMENOS		
Aumento da relação minério/coque	Redução do ângulo de repouso médio da carga	Aumento da quantidade de minério na região central	Supressão do fluxo gasoso central	Aumento do fluxo gasoso periférico e de deslizamentos
	Redução da permeabilidade nas zonas seca e coesiva			Aumento da queda de pressão total
	Aumento de espessura da zona coesiva			Redução da capacidade de fusão
	Redução da queima de coque na zona de combustão	Redução da velocidade relativa de descida da carga	Aumento da relação de fluxo térmico	Aumento das perdas térmicas pelas paredes
	Aumento do volume de gás nas ventaneiras			Aumento da queda de pressão nas ventaneiras
Operação com baixo coke rate devido aumento da ICP	Redução da temperatura de chama	Redução da temperatura do homem morto		Redução da permeabilidade do homem morto
		Aumento da temperatura do gás de topo		Relação de substituição é reduzida
		Aumento do volume de gás de rampa		Aumento da queda de pressão na rampa
Aumento da taxa de injeção de carvão	Redução da relação de fluxo térmico	Elevação do nível da zona coesiva		Aumento das perdas térmicas e do Si do gusa
	Aumento da entrada de H ₂			Aumento da redução pelo H ₂
	Prolongamento do ciclo de renovação do homem morto			Aumento do fluxo periférico e da temperatura do homem morto

Redução de Minério de Ferro em Altos-Fornos

- O custo do carvão coqueificável varia em, uma faixa ampla e sofre influências de oscilações sazonais, porém, seu custo fica aproximadamente cotado na faixa de 100 U\$/t a U\$ 140/t.
- * Os custos de conversão de uma planta de coqueificação ocidental típica ficam na faixa de U\$ 35-45 por tonelada de coque produzido. Considerando uma média de 1,4 t de carvão coqueificável necessário para produzir uma tonelada de coque para alto-forno, o produto do preço do carvão metalúrgico (U\$ 100/t a U\$ 140/t) vezes 1,4 resulta em U\$ 140-196 por tonelada de coque. Adicionando mais U\$ 35-45, devido à conversão, dá um preço final de coque na faixa de U\$ 175-241. O coque também pode ser comprado no mercado internacional nesta faixa de preço.
- Adotando 0,8 como uma relação de substituição de coque típica, significa que cada tonelada de carvão injetado, ao custo de U\$ 90/t a U\$ 100/t, está substituindo 0,8 t de coque (U\$ 175-241), ou seja, está substituindo um custo de U\$ 140/t a U\$ 193/t.
- Portanto, a economia fica na faixa de U\$ 50 a U\$ 93 por tonelada de carvão injetado, não incluindo os custos operacionais da planta de ICP. Entretanto, estes custos operacionais são mais que suplantados pelas vantagens operacionais da injeção (ver a seguir).
- O capital para instalação de uma planta de ICP gira em torno de U\$ 50-60 por tonelada anual de capacidade, ao passo que, para uma nova planta de coqueificação, estes custos giram em torno de U\$ 220-240. Estima-se, de modo geral, que o retorno do investimento em uma instalação de injeção é de um ano e meio a dois anos.

Além das vantagens econômicas, descritas, podem, também, ser listadas algumas vantagens operacionais advindas da ICP:

- A ICP dá maior flexibilidade operacional do que a operação *all coke* permitindo melhor ajuste da temperatura teórica de chama.
- A injeção de vapor, utilizada na operação *all coke*, deixa de ser necessária.
- A produtividade do forno pode ser elevada, especialmente quando a ICP é acompanhada pelo enriquecimento com oxigênio.
- A vida útil da bateria de coqueificação pode ser estendida através da redução do ritmo operacional.
- As taxas de injeção podem ser modificadas rapidamente, enquanto a

produção da planta de coqueificação não pode ser facilmente alterada em curto espaço de tempo.

* Comparado com o óleo e gás natural, o carvão é mais barato e tem maior disponibilidade global, variando do linhito ao antracito.

* O carvão pode ser injetado em taxas mais elevadas que o óleo e o gás natural, devido a sua menor redução da temperatura teórica de chama em relação aos outros combustíveis.

3.5 A Produtividade dos Altos-Fornos

A produtividade de um alto-forno, medida em toneladas de gusa produzidas por dia (tgusa/dia), depende da quantidade de combustíveis queimados nas ventaneiras por unidade de tempo e da quantidade de combustíveis (coque, carvão etc.) necessária para produzir uma unidade de ferro gusa, ou seja, do fuel rate, conforme ilustra a equação (3.17)

$$\text{Produção (tgusa / dia)} = \frac{Q (\text{tcombustíveis / dia})}{K (\text{tcombustíveis / tgusa})} \quad (3.17)$$

onde, K : "fuel rate"

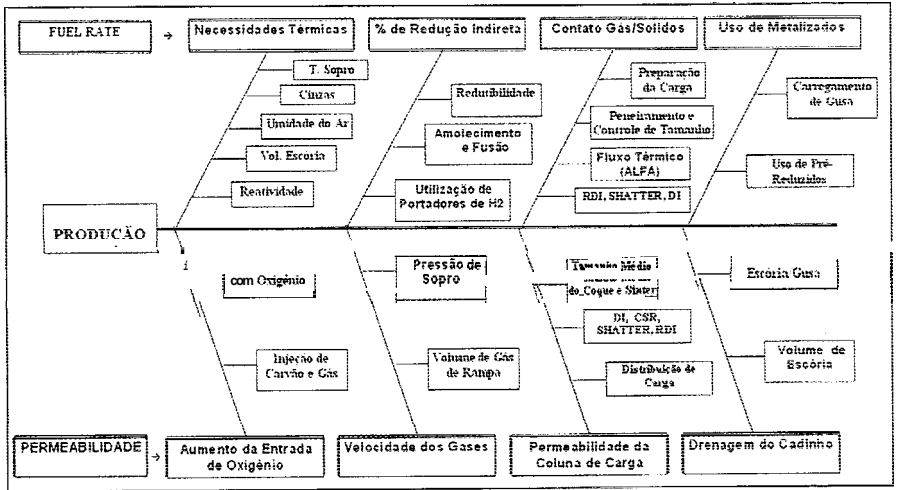
Q : consumo diário de combustíveis

Portanto, a produção de um alto-forno pode ser elevada através de medidas que aumentem a quantidade de combustíveis queimada e/ou reduzam o fuel rate. A Figura 3.27 mostra, na forma de diagrama "espinha de peixe", os fatores que afetam a produção de um alto-forno.

Para incrementar a quantidade de coque queimado, utiliza-se basicamente a elevação da quantidade de oxigênio injetada nas ventaneiras, via aumento do enriquecimento do ar ou da vazão de ar. Para se conseguir isto, é necessário que haja permeabilidade na carga do alto-forno, ou seja, a coluna de carga deve aceitar o aumento de volume de gases ascendentes, mantendo a operação estável. Esta elevação de permeabilidade da coluna de carga passa por medidas, tais como, melhoria da qualidade das matérias-primas, ações de distribuição de carga e melhor controle da drenagem do cadinho.

Redução de Minério de Ferro em Altos-Fornos

FIGURA 3.27 - Espinha de peixe para os fatores que afetam a produção do alto-forno (COMPANHIA SIDERÚRGICA PAULISTA, 2001).¹



A utilização do enriquecimento do ar soprado tem sido a técnica mais utilizada pelas usinas para elevação da produção, visto que a elevação da vazão de ar implica um aumento muito grande do volume de gases, em razão da presença do nitrogênio (79% de N_2 no ar). Como a utilização de taxas de enriquecimento elevadas (> 3%) causa a elevação exagerada da temperatura de chama, esta técnica tem sido aliada à injeção de carvão pulverizado, que tem efeito oposto sobre a temperatura de chama. Portanto, é comum hoje em dia observar altos-fornos operando com elevadas taxas de enriquecimento (> 6%) e altas taxa de injeção de carvão (> 150 kg/t), obtendo, assim, alta produtividade e baixo custo de combustíveis.

A outra via para a elevação da produtividade consiste no abaixamento do *fuel rate*, que passa por uma maior eficiência na redução dos óxidos de ferro. Uma maior eficiência de redução, ou seja, maior taxa de redução indireta que não consome coque, pode ser obtida, pela maior utilização de cargas preparadas (sínter e pelotas); melhor distribuição de carga; melhoria no contato gás-sólidos, através da redução da velocidade dos gases, usando-se maior contra-pressão no topo. A redução das necessidades térmicas do processo (menor volume de escória, menor umidade do ar etc.), também, contribui para o abaixamento do *fuel rate*. Uma técnica eficiente para se obter redução do *fuel rate*, apesar do custo elevado, consiste no carregamento de carga pré-metalizadas.

REFERÊNCIAS

- 1 COMPANHIA SIDERÚRGICA PAULISTA. *Relatórios internos*. Cubatão, 2001.
- 2 AMERICAN IRON AND STEEL INSTITUTE. *Steel works: the online resource for steel: how a blast furnace works*. Disponível em: <http://www.steel.org/AM/Template.cfm?Section=How_Steel_Is_Made&CONTENTID=8497&TEMPLATE=/CM/ContentDisplay.cfm>. Acesso em: 24 out. 2006.
- 3 PLIBRICO JAPAN CO. Disponível em: <<http://www.plibrico.co.jp>>. Acesso em: 2 out. 2006.
- 4 MCNALLY, R.; ROULET, F.; KUSTER, W.; SCHOENNAHL, J.; LÜCKE, D. *Advances and advantages with ceramic cup technology*. [S.l.]: Saint-Gobain industrial Ceramics, 199-?.
- 5 ENCONTRO DE ESPECIALISTAS DA REDUÇÃO DO 1º QUADRIMESTRE DE 2005, Ipatinga. *Relatórios*. [S.n.t.]
- 6 CAMPOS, V. F. *Tecnologia de fabricação de ferro-gusa em alto-forno*. Belo Horizonte: UFMG, 1984. [Apostila].
- 7 AMELING, D. Winds of change in the steel industry. In: INTERNATIONAL MEETING ON IRONMAKING, 2., 2004, Vitória-ES. *Anais...* São Paulo: ABM, 2004.
- 8 HOT BLAST STOVE TECHNOLOGY. *Catálogo da Hoogovens Technical Services*. Ijmuiden, Netherlands, 1970.
- 9 METALLICA ASSESSORIA E PLANEJAMENTO LTDA. Disponível em: <<http://www.metallica.com.br>>. Acesso em: 2 out. 2006.
- 10 BISWAS, A. K. *Principles of blast furnace ironmaking*. Brisbane, Austrália: Cootha Publishing House, 1981.
- 11 OMORI, Y.; NIHON, T.K. *Blast furnace phenomena and modeling*. London: Elsevier, 1987.

BIBLIOGRAFIA

- 1 ARAÚJO, L. A. *Manual de siderurgia*. São Paulo: Editora Arte & Ciência, 1997. v. I -

- 2 ASSIS, P.S. *Injeção de carvão pulverizado em alto-forno*. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 1995. [Apostila]
- 3 FIGUEIRA, R. M.; CASTRO, I. F. A., TAVARES, R. P. *Controle do teor de silício do gusa*. Belo Horizonte: Fundação Chistiano Ottoni, 1989.
- 4 GUDENAU, H. W.; KREIBICH, K. On the csesive zone phenomena in the blast furnace. *Scandinavian Journal of Metallurgy*, v. 11, n. 3, p. 11-114, 1982.
- 5 HAGÀ, T. The latest of ironmaking technology in Japan relining of Oita nº 2 BF (the largest BF in the world). In: INTERNATIONAL MEETING ON IRONMAKING, 2., 2004, Vitória - ES. *Anais..* São Paulo: ABM, 2004.
- 6 HUNDERTMARK, A. Perspectivas sobre as tecnologias do futuro. *Metalurgia e Materiais*, v. 52, n. 460, p. 704-706, dez.1996.
- 7 OZTURK, B.; FRUEHAN, R. J. Silicon transfer in blast furnace. In: INTERNATIONAL IRON AND STEEL CONGRESS, 5., 1986, Washington, DC. *Process technology proceedings...* [S.l.]: ISS, 1986. v. 6, Book 3.
- 8 TAMBASCO, M.J.A. *Redução de minério de ferro em altos-fornos*. 4.ed. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 1980.
- 9 TAMURA, K.; ICHIDA, M.; UENO, H.; YAMAGUCHI, K. Optimisation si high-rate coal injection operation of blast furnace from viewpoint of formation of raceway and disintegration of coke. In: MCMASTER IRON AND STEELMAKING SYMPOSIUM, 1991, Hamilton, Ontário. Canadá, McMaster üiversity.
- 10 TUWKDQGAN, E.T.; KOR, G. J. W.; FRUEHAN, R.J. Studies of blast-furnace reactions. *Ironmaking & Steelmaking*, v. 7, n. 5, p. 268-280, 1980.

Redução de Minérios de Ferro por Redução Direta e Processos Alternativos

Capítulo

04

Marcelo Breda Mourão

A produção de ferro primário obtida em altos-fornos a coque está fortemente estabelecida, apresentando características técnicas e econômicas excepcionais. Desenvolvimentos recentes visam aprimorar ainda mais o desempenho da rota coqueria-sinterização-alto-forno, dentre os quais, podem-se citar: injeção de altas taxas de carvão e/ou gás natural; enriquecimento de sopro; operação com 100% de oxigênio; reciclagem do gás de topo; além do desenvolvimento de novos processos de aglomeração e coqueificação, mais flexíveis em relação às matérias-primas e menos danosos ao meio ambiente.

Apesar das enormes vantagens apresentadas pela rota tradicional, há espaço para a existência de processos alternativos de obtenção de ferro primário. Os fatores que favorecem a escolha por um processo alternativo estão relacionados a algumas características intrínsecas do processo em alto-forno, como, também, à disponibilidade de agentes redutores e à própria destinação do produto da redução.

As características do processo em alto-forno, que podem impedir ou inviabilizar a sua aplicação dentro de certas circunstâncias, são:

- alta escala de produção (maior que 1,5 Mt/ano);
- necessidade de aglomeração do minério;
necessidade de coque metalúrgico;
- degradação do meio ambiente; e
- alto custo de capital.

Em relação aos redutores, regiões geográficas que dispõem de abundância de gás natural apresentam vantagens competitivas para a implantação de processos de redução direta, baseados neste insumo. Processos capazes de produzir ferro primário, empregando qualquer tipo de carvão, têm forte atrativo por não dependerem da disponibilidade de carvões coqueificáveis, mais raros e geográfica e desigualmente distribuídos.

Atualmente, os processos que produzem ferro primário, além dos altos-fornos, podem ser divididos em duas grandes classes, de acordo com o produto obtido: processos de redução direta, cujo produto é sólido, e processos de fusão-redução, cujo produto é líquido.

4.1 Processos de Redução Direta de Minérios de Ferro

4.1.1 Conceituação

Entende-se por Processos de Redução Direta aqueles nos quais a redução do minério de ferro a ferro metálico é efetuada sem que ocorra, em nenhuma fase do processo, a fusão da carga do reator. Assim, o produto metálico é obtido na fase sólida, e é chamado de ferro-esponja (em inglês, de DRI, iniciais de *Direct Reduced Iron*). Em geral, o ferro-esponja é usado posteriormente em fornos elétricos, onde é fundido para obtenção de aço.

A redução no estado sólido de minério de ferro por carvão é praticada desde a Antiguidade, tendo sido o principal processo de obtenção de ferro até o desenvolvimento dos altos-fornos. Os primeiros desenvolvimentos dos processos de redução direta, como os que conhecemos hoje, tiveram início na década de 1930, e, desde então, literalmente centenas de processos foram propostos e/ou desenvolvidos, mas a grande maioria já deixou de existir. Apenas a partir de 1970 a produção de ferro-esponja passou a ser significativa, e no início do século XXI a capacidade instalada das diversas usinas ultrapassou 50 Mt/ano (MIDREX CORPORATION, 2005).¹

Uma das características vantajosas do ferro-esponja como carga para fornos elétricos de fabricação de aço é sua superioridade em relação à sucata em termos de pureza: elementos de liga contidos na sucata podem dificultar o atendimento à especificação do aço a ser produzido.

Podem-se dividir os processos atuais de redução direta em duas classes, com base no tipo de redutor: redutor sólido (carvão), em torno de 10% da produção mundial de ferro-esponja, ou redutor gasoso, que responde por aproximadamente 90% da produção de ferro-esponja. O esquema geral destes dois tipos de processo é dado na Figura 4.1.

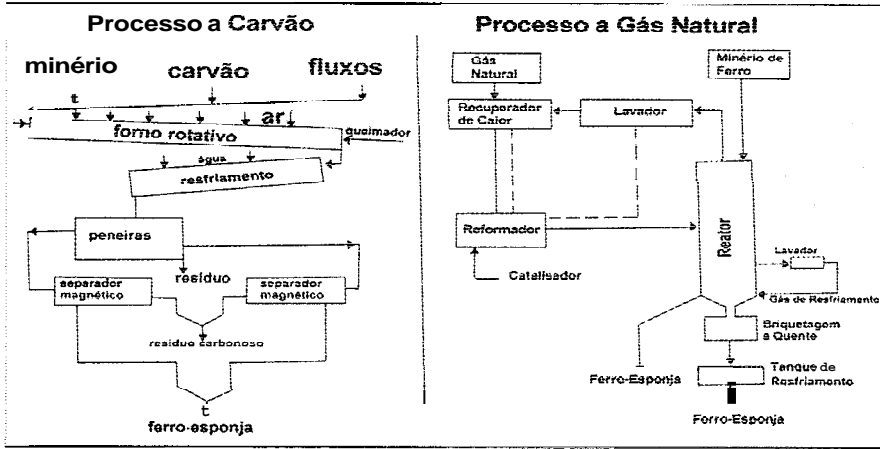


FIGURA 4.1 - Esquema dos processos de redução direta a carvão e a gás natural.

4.1.2 Processos a carvão

Os processos a carvão empregam tipicamente fornos rotativos como reator de redução. Os processos comerciais em operação são: CODIR; DAV; DRC; TISCO e SL/RN, sendo este último o mais difundido. A Figura 4.2 apresenta esquema do SL/RN.

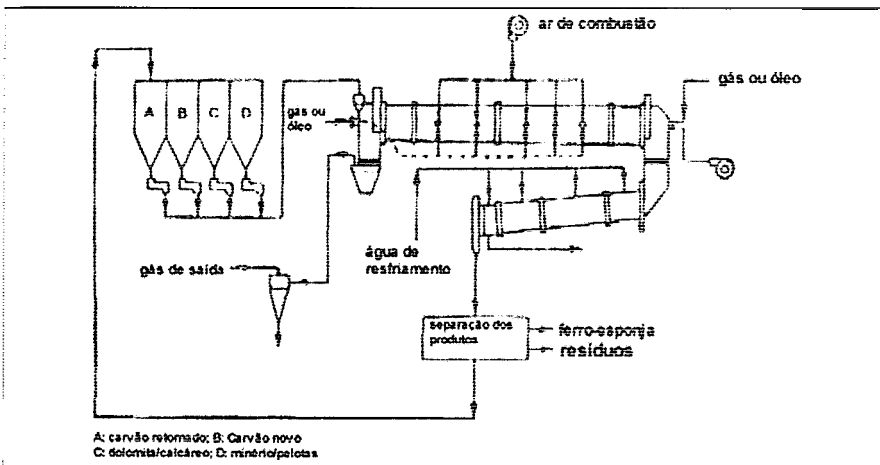


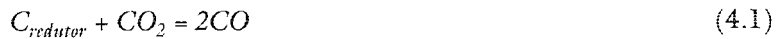
FIGURA 4.2 - Esquema do processo SL/RN (WALKER, 1986).²

Nestes processos, um forno cilíndrico rotativo (*kiln*), com revestimento refratário, com 4 m a 6 m de diâmetro e 60 m a 125 m de comprimento, com rotação de 0,4 a 1,25 rpm, é carregado com minério de

ferro bitolado ou na forma de pelotas, redutor sólido (carvão fóssil, antracito, coque de baixa temperatura etc.) e fluxante (cai, dolomita), com o objetivo de absorver o enxôfre liberado pelo redutor. Na extremidade oposta à de carregamento, um queimador promove a combustão de gás ou óleo como uma das fontes de energia para o processo, e as entradas de ar ao longo do comprimento do forno promovem a queima do monóxido de carbono gerado na redução e da matéria volátil, eventualmente, liberada pelo redutor, complementando o requerimento energético do processo.

A redução do minério de ferro ocorre através de dois subprocessos:

a) formação de gás redutor:



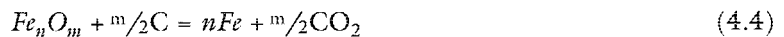
b) redução dos óxidos de ferro:



O ar admitido ao longo do forno queima o CO:



A reação global é então:



A reação de Boudouard (reação 4.1) é muito endotérmica, o que torna o processo de redução por carbono sólido endotérmico; transporte de calor para a zona redutora é importante, e o forno rotativo é adequado para isto: a região de combustão acima da carga aquece o refratário, que transfere o calor para a zona de redução quando passa pela região inferior.

É importante que o redutor tenha alta reatividade, pois a etapa de geração de gás é a controladora do processo. A temperatura de início da reação de Boudouard é função da reatividade do redutor, e está entre 850° C a 900° C. Esta temperatura só é atingida em torno da metade do comprimento

do forno, de modo que a primeira metade é uma zona de preaquecimento, e a metade final é a zona de redução.

Ao final do forno, a carga é transferida a outro cilindro rotativo, refrigerado a água, no qual a carga é resfriada antes de ser descarregada, pois o ferro-esponja a alta temperatura, em contato com ar, reoxida-se rapidamente. Após o descarregamento, o ferro-esponja é separado magneticamente da sobra de carvão (*char*) e do fluxante.

O maior problema deste tipo de processo é a tendência à formação de anéis em fornos rotativos, que processam a altas temperaturas materiais susceptíveis à abrasão: o pó gerado pela movimentação da carga deposita-se na parede do forno e a ela se adere devido à alta temperatura. Estes anéis dificultam a passagem da carga, chegando a obstruir o forno. É importante, por isto, a quantidade e a composição das cinzas do carvão: a sílica reage com óxidos de ferro, formando silicatos de baixo ponto de fusão, com tendência a agregarem-se aos anéis. Em geral, fornos deste tipo operam abaixo da sua capacidade máxima, tendo produtividade relativamente baixa.

4.1.3 Processos a redutor gasoso

Os redutores gasosos comuns dos óxidos de ferro são o monóxido de carbono e o hidrogênio. Pode-se pensar em produzir estes gases de diversas maneiras, por exemplo, eletrólise da água para obter-se hidrogênio (provavelmente com o desenvolvimento da fusão nuclear este seja um processo viável economicamente), ou por gaseificação de carvão (um dos primeiros processos de R-D, o processo Wiberg fazia isto). Entretanto, a fonte mais barata destes gases é o gás natural, composto basicamente por metano (CH_4). O metano não pode ser usado diretamente como redutor, pois se decompõe acima de 500°C . Deve, então, ser transformado em CO e H_2 , através da operação de reforma.

- *Reforma de gás natural*

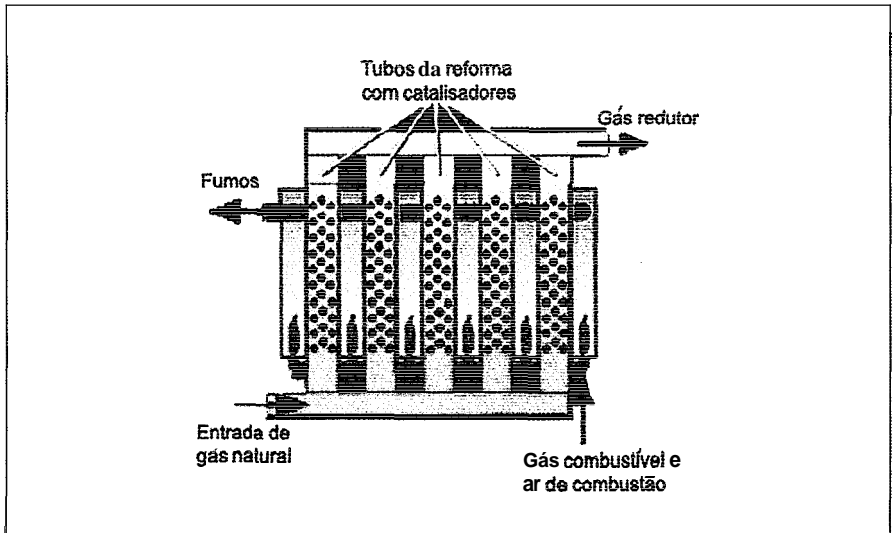
Na reforma, o gás natural reage com CO_2 e H_2O através das reações:



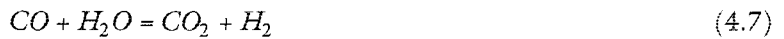
Redução de Minérios de Ferro por Redução Direta e Processos Alternativos

Estas são reações endotérmicas (247 kJ/mol e 206 kJ/mol, respectivamente) e, portanto, favorecidas termodinamicamente a altas temperaturas. Em geral são realizadas entre 950° C e 1.000° C na presença de catalisadores de níquel, com o objetivo de obter-se maior rendimento. A Figura 4.3 apresenta esquema de equipamento para reforma de gás natural. O enxofre contido no gás diminui a eficiência do catalisador, e o gás deve ser dessulfurado a no máximo 1 ppm de enxofre. Em processos de redução direta, os gases produto da redução, que contêm CO₂ e H₂O, podem ser recirculados e usados nas reações de reforma. Nestes casos, se o minério contiver enxofre, a dessulfuração destes gases é obrigatória.

FIGURA 4.3 - Esquema de funcionamento de reformador de gás natural.



A proporção entre CO e H₂ no gás reformado pode ser controlada pela proporção de CO₂ e H₂O no gás reagente, com as limitações impostas pela reação:



Esta reação é exotérmica ($\Delta H^\circ = - 35,7$ kJ/mol), e portanto tende a deslocar-se no sentido da formação de hidrogênio a baixas temperaturas, e no sentido de formação de CO a altas temperaturas.

- *Processos em reatores verticais*

Os principais processos industriais de redução direta são aqueles que utilizam gás natural em processos realizados em reatores verticais. O processo Midrex responde por aproximadamente **73%** da produção de ferro-esponja, enquanto o processo HyL III tem 21,5% da produção.

O processo Midrex tem várias versões, mas sua concepção básica é ilustrada na Figura 4.4, a seguir:

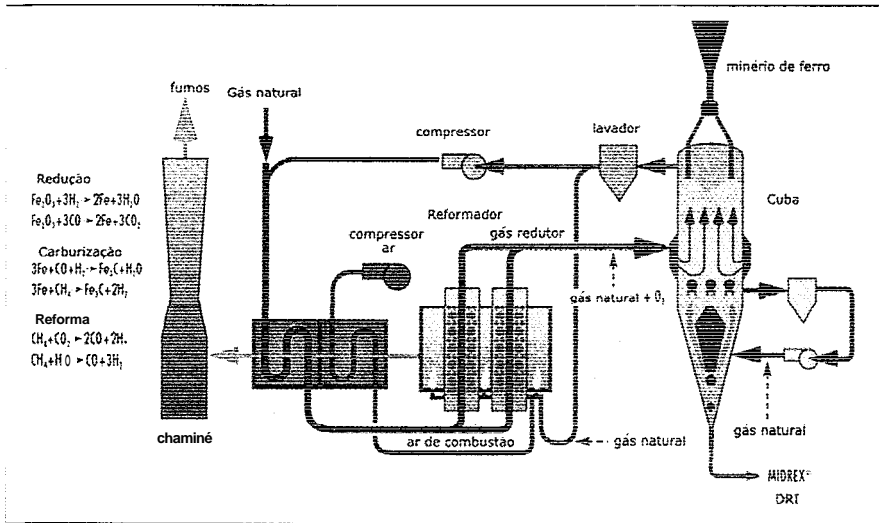


FIGURA 4.4 - Esquema do processo Midrex (MIDREX TECHNOLOGIES INC., 2006).³

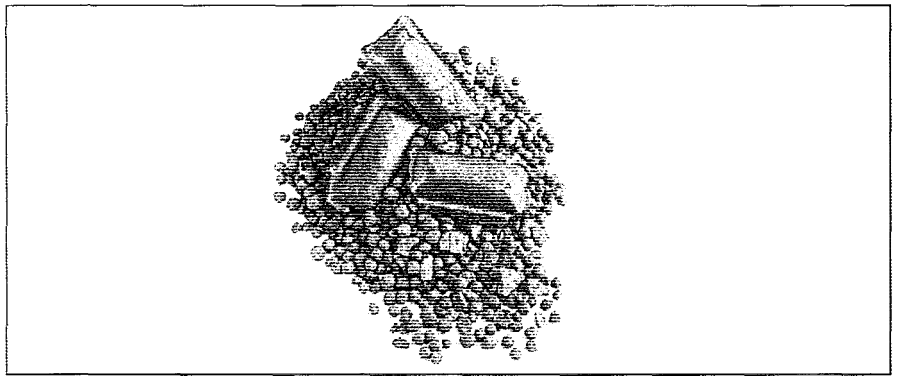
O gás natural é transformado em $CO + H_2$ no reformador, usando-se como combustível o próprio gás natural. O gás redutor, contendo acima de 95% de $CO + H_2$ com relação H_2/CO de 1,5 a 1,6, é introduzido no reator a temperaturas entre $860^\circ C$ e $900^\circ C$. Na cuba, o gás ascende em contracorrente com a carga (minério bitolado ou pelotas), que é carregada pelo topo. A carga descendente é aquecida e reduzida pelos gases, que saem no topo. O gás de topo contém ainda em torno de 70% de $CO + H_2$, mais os gases produzidos pela redução, CO_2 e H_2O . Este gás retorna ao reformador como gás reagente e/ou combustível.

O ferro-esponja produzido deve ser resfriado antes da descarga, pois é muito reativo (alta superfície específica) e reoxidaria instantaneamente ao ar. A cuba inferior é a região de resfriamento/carburização do ferro-esponja.

Redução de Minérios de Ferro por Redução Direta e Processos Alternativos

que é efetuada com mistura gasosa formada a partir de gás de saída lavado (para remoção de H_2O) com gás natural. É possível, assim, carburar o ferro-esponja com teores entre 1,4% e 1,7% de carbono, o que diminui a possibilidade de reoxidação e auxilia na etapa posterior de fusão em forno elétrico. Alternativamente, pode-se fazer a briquetagem a quente do ferro-esponja, obtendo-se briquetes de ferro metálico, mais convenientes ao manuseio, transporte e fusão. A Figura 4.5 mostra os produtos obtidos por redução direta.

FIGURA 4.5 - Ferro-esponja e briquetes produzidos por redução direta (MIDREX TECHNOLOGIES INC., 2006).³



O grau de metalização (G_m) do ferro-esponja é definido como a porcentagem de ferro metálico obtido em relação à quantidade total de ferro contido no produto. É um parâmetro que indica o grau de redução dos óxidos de ferro. Em geral, procura-se obter um $G_m > 92\%$, ou seja, é aceitável “sobrar” algum ferro oxidado no ferro-esponja, pois para se atingir G_m próximo de 100%, o tempo de permanência da carga no reator seria muito alto.

Os tempos de permanência usuais neste tipo de reator estão em torno de 6 horas. A produtividade dos processos de reatores verticais a gás varia de 9 a 12 t/m³/dia.

O processo Danarex (SIMIONATO e MARTINS, 2002)⁴ (Figura 4.6) recentemente desenvolvido, inclui uma cuba de redução semelhante aos processos tradicionais, mas com um vaso externo para resfriamento do produto, liberando, com isto, a porção inferior do reator (o chamado cone) para promover a carburação do ferro-esponja, obtendo-se então carvão de ferro como produto.

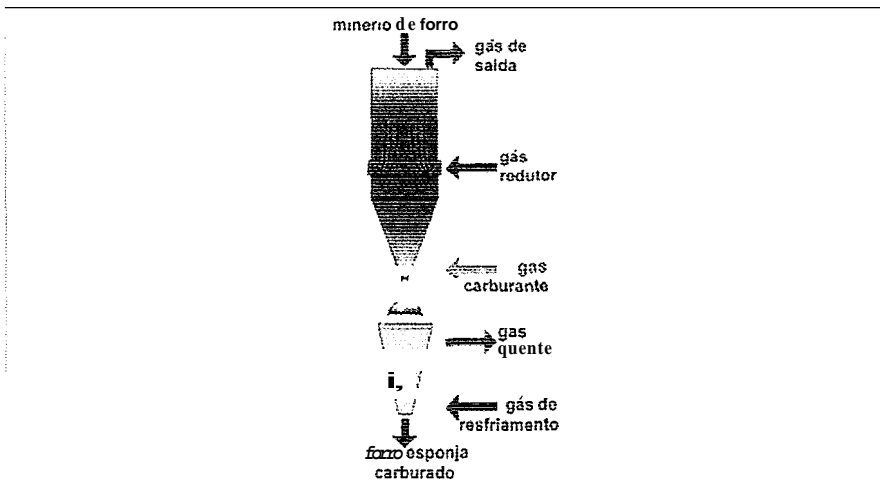


FIGURA 4.6
Representação
esquemática do processo
Danarex (SIMIONATO e
MARTINS, 2002) ⁴

• *Processos em Leito Fluidizado*

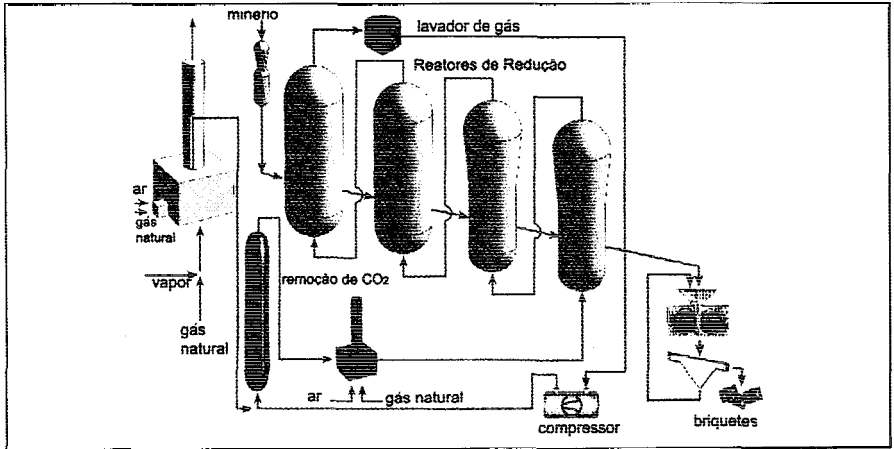
Neste tipo de processo, o minério de ferro fino é reduzido em uma série de reatores de leito fluidizado, nos quais o fluxo de gases é tal que a perda de carga na camada iguala o peso desta, por unidade de área, causando a expansão da camada sólida (aumento de porosidade) e a flutuação das partículas no fluxo gasoso. Isto permite um ótimo contato gás-sólido, e altas velocidades de reação, devido ao alto coeficiente de transporte de massa e à alta área da superfície de reação.

Este princípio foi aplicado ao processo FIOR, que foi recentemente aperfeiçoado, resultando no novo processo FINMET. Neste processo (HASSAN e WHIPP, 2004),⁵ os reatores de redução trabalham a pressões entre 10 e 12 bar; o minério é preaquecido no primeiro reator pelo gás proveniente do reator precedente na série. Após um certo tempo de permanência, o minério parcialmente reduzido é transferido ao reator seguinte por linha de transporte. O minério é, progressivamente, reduzido e aquecido em cada reator subsequente, até que o grau de metalização desejado (entre 91% e 92%) seja alcançado. E então descarregado e briquetado a quente.

O gás de processo é gerado pela reforma catalítica de gás natural com vapor d'água, e é aquecido a 830°C antes de entrar na série de reatores em direção oposta àquela do minério. Após sair do sistema, o gás é lavado e resfriado antes de ser reciclado no processo. A Figura 4.7 ilustra o processo.

Redução de Minérios de Ferro por Redução Direta e Processos Alternativos

FIGURA 4.7 - Esquema do processo FINMET (HASSAN e WHIPP, 2004) ⁵



4.2 Processos de Fusão-Redução (*Smelting-Reduction Processes*)

4.2.1 Conceituação

Processos de fusão-redução são aqueles nos quais o minério de ferro é submetido à redução e o produto metálico é fundido, obtendo-se ferro no estado líquido. Esta é uma classificação bastante geral; notar que o próprio alto-forno, dentro destes critérios, é um processo de fusão-redução. Dentre os processos emergentes cujo produto é ferro líquido, destacam-se três, com princípios bem diferentes, como a seguir.

4.2.2 Processo Corex

O processo Corex (LÉONARD e BERTLING, 1999)⁶ tem como principal conceito a divisão do alto-forno em dois: um reator realiza a redução quase total do minério de ferro a ferro metálico, no estado sólido, e este material reduzido é carregado em reator que realiza a fusão do ferro metálico; a energia para o processo é fornecida pela queima de carvão no mesmo reator de fusão, gerando ainda o gás redutor a ser usado no reator de redução. Basicamente, isto equivale a dividir ao meio um alto-forno, com a vantagem de evitar-se a formação de zona coesiva, pois não há região de temperaturas intermediárias entre as de redução e de fusão (Figura 4.8).

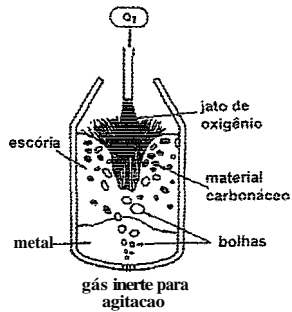


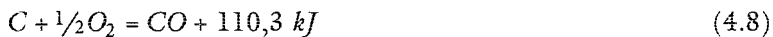
FIGURA 4.10 - Principais regiões de reator de redução em fase líquida (KATAYAMA, IBARAKI e FUJITA, 1992).⁸

Nos propostos processos de fusão-redução, a alta produtividade esperada tem origem não apenas na alta velocidade específica das reações de redução mas, também, na criação de uma grande área de interface de reação. A escória contém de 10% a 20% de gotas de Fe-C (chegando a mais de 50% próximo à interface metal-escória) e carvão clesvoitilizado até 20% em peso.

A espumação da escória pode ser controlada pela quantidade de carvão presente na escória e pela taxa de carregamento de minério de ferro. Como grande parte das reações ocorrem nesta escória emulsificada, a velocidade aparente de reação é função direta do peso da escória.

É importante ressaltar a conceituação diversa entre os processos em banho líquido e os processos tipo Corex ou alto-forno.

Em um alto-forno e no Corex, a maior parte da redução é efetuada a baixa temperatura, com CO passando a CO₂, e a geração de calor é feita com C passando a CO nas ventaneiras. Ocorre que na etapa CO → CO₂, a capacidade de geração de calor é 2.5 vezes maior que na etapa C → CO,



Em um processo de fusão-redução em banho líquido, o objetivo é operar de maneira inversa ao alto-forno, isto é, efetuar a redução na etapa C → CO e usar a combustão do CO a CO₂, para gerar calor, em um Único reator, ou seja, em condições de não-equilíbrio. A necessidade de se efetuar a combustão do CO no mesmo reator decorre da alta endotermicidade das reações de redução pelo carbono.

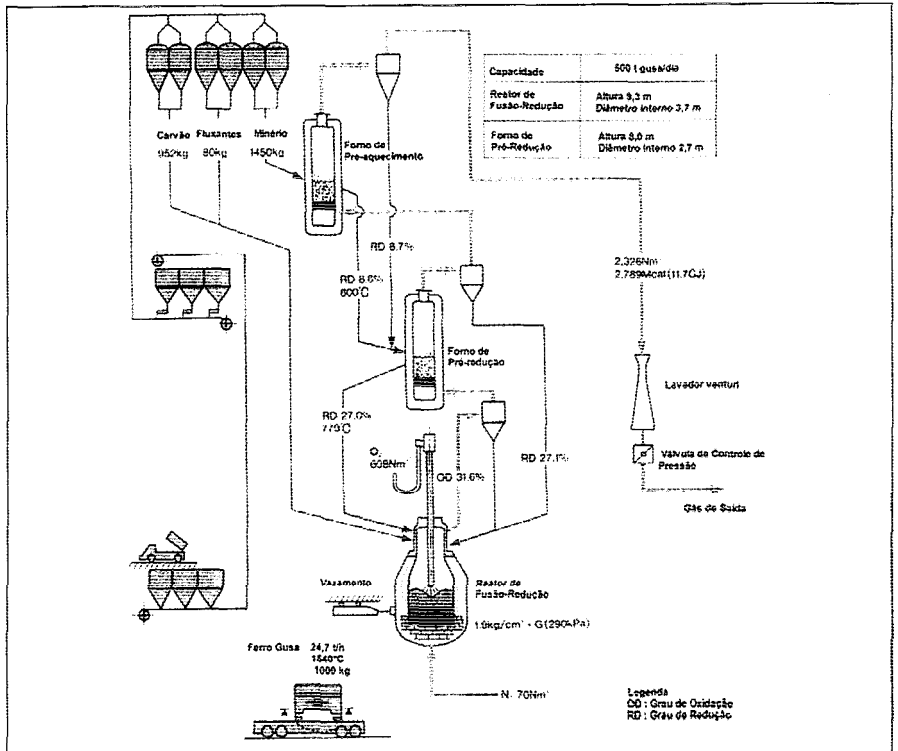
Redução de Minérios de Ferro por Redução Direta e Processos Alternativos

Outra característica de um processo de fusão-redução em banho líquido é que toda ou a maioria das reações de redução ocorrem no estado líquido.

Para que um processo de fusão-redução em banho líquido possa funcionar é necessário que o calor gerado na combustão do CO a CO₂ seja diretamente aproveitado para promover as reações de redução, que são fortemente endotérmicas, caso contrário não seria possível fechar o balanço térmico. Isto é conseguido na prática com a pós-combustão dos gases, gerados na zona redutora, em uma zona oxidante, e com a transferência do calor gerado para a zona de redução. Desse modo, um reator de fusão-redução em banho líquido deve, necessariamente, trabalhar em condições de não-equilíbrio.

Processos de Fusão-redução em banho líquido foram desenvolvidos no Japão (processo DIOS), nos Estados Unidos (processo AISI/DOE) e na Austrália (processo HISmelt). Nenhum é ainda comercial. O processo DIOS, cujo desenvolvimento foi concluído e está à disposição para comercialização, é ilustrado na Figura 4.11.

FIGURA 4.11 - Esquema do processo DIOS (SAWADA, 1995).⁹



O processo HiSmelt (*High Intensity Smelting*), também, se enquadra entre os processos de redução em fase líquida; minério de ferro e carvão pulverizados são injetados diretamente no interior do banho de ferro líquido. O carvão dissolve-se no ferro, e o carbono dissolvido reduz os óxidos de ferro; a Figura 4.12 apresenta as principais características do processo.

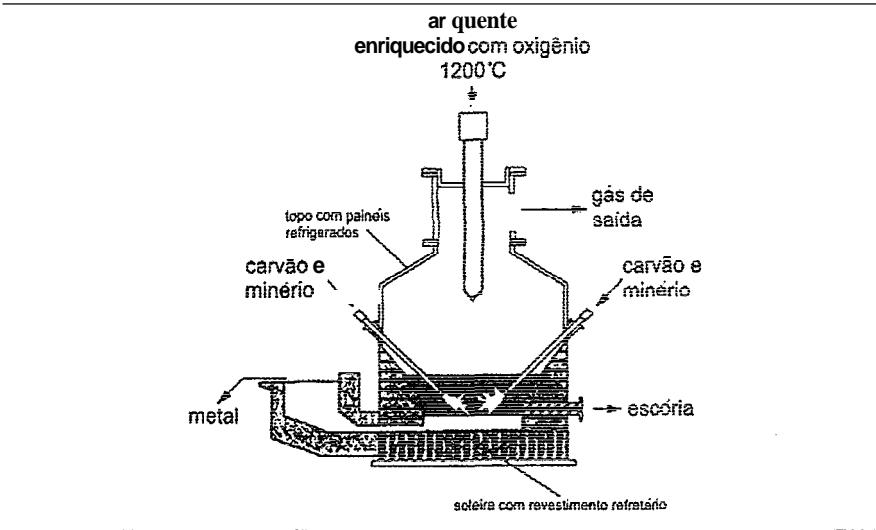


FIGURA 4.12 - O processo HiSmelt (STEFFEN e LUNGEN, 2004).¹⁰

4.3 Processos da Auto-Redução

4.3.1 Conceituação

Os processos bascados na tecnologia de auto-redução são aqueles que empregam aglomerados, nos quais o minério de ferro (ou resíduos contendo óxidos de ferro) é aglomerado conjuntamente com material carbonáceo (carvão vegetal, moínna de coque, carvão fóssil, biomassa eis. j que terá a função de redutor dos óxidos. Podem-se empregar briquetes ou pelotas auto-redutoras. Diversos estudos comprovaram que este tipo de aglomerado apresenta vantagens cinéticas significativas sobre a redução convencional por gases. A dificuldade de desenvolver um processo que aproveite de maneira integral esta vantagem reside no fato de que estes aglomerados não podem se: queimados para fornecer resistência mecânica,

pois esta queima acarretaria a combustão do material carbonáceo. Assim, ou o processo não exige mecanicamente dos aglomerados, ou este deve ter em sua composição um aglomerante hidráulico (cimento Portland, escória de alto-forno etc.) que forneça resistência a frio. Os processos que empregam a auto-redução são processos baseados no uso de carbono sólido como redutor, podendo-se empregar virtualmente qualquer tipo de material carbonáceo, não necessitando de coque. Dois processos, cada qual em uma destas linhas, apresentam-se como os mais promissores: o processo Tecnoled, desenvolvido no Brasil, e o processo Fastmet. A seguir serão brevemente descritos.

4.3.2 Processos de auto-redução em fornos de cuba

No processo Tecnoled (CONTRUCI et al., 2005),¹¹ desenvolvido no Brasil, peiotas auto-redutoras aglomeradas a frio são carregadas em forno de cuba semelhante a um forno cubilô modificado, no qual o combustível sólido requerido pelo processo é carregado lateral e diretamente na zona inferior, de modo que a cuba principal conrenha apenas as peiotas auto-redutoras. Ar quente é introduzido através de ventaneiras, promovendo a combustão do material carbonáceo (carvão, coque etc.) e gerando gases quentes que ascendem para a cuba central, aquecendo as pelotas auto-redutoras e fornecendo o calor necessário para a redução dos óxidos de ferro pelo carbono, que é endotérmica. No fim da cuba central, existem ventaneiras secundárias que injetam ar frio com o objetivo de gerar calor adicional pela queima completa dos gases ascendentes, gerando assim zona de alta temperatura onde as peiotas, já aglomeradas e metalizadas, fundem-se. O material líquido percorre, então, a cama de material carbonoso, indo depositar-se no cadinho, onde a ganga forma um escória e o metal, que absorve carbono na descida, é vazado de tempos em tempos como um ferro-gusa.

A Figura 4.13 apresenta um esquema do processo Tecnoled. A altura da carga na cuba central varia entre 2 m e 3 m, de modo que a pelota necessita uma certa resistência mecânica, porém muito inferior àquela requerida por um alto-forno.

O processo está em fase de implantação comercial!

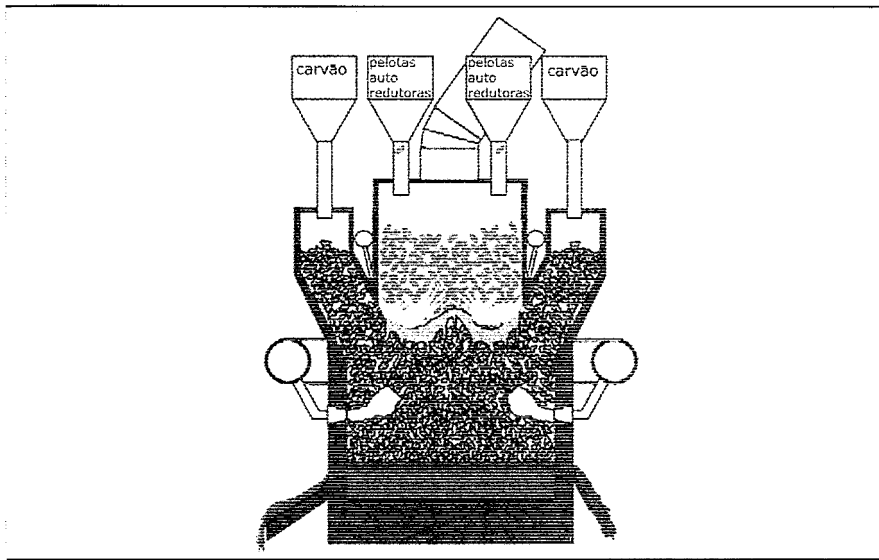


FIGURA 4.13 - O processo TecnoRed (CONTRUCI et al., 2005).¹¹

4.3.3 Processos de auto-redução em fornos de soleira rotativa

Este tipo de processo baseia-se no emprego de um forno de soleira rotativa para promover a redução de pelotas auto-redutoras, dispostas sobre uma soleira em camadas de apenas 1 ou 2 pelotas, de modo que estas não sofram solitação mecânica durante o processo, não necessitando, assim, ter alta resistência mecânica (MIYAGAWA et al.,¹² 1998). A Figura 4.14 apresenta um corte transversal de forno de soleira rotativa. Com isto, a pelota não precisa de aglomerantes hidráulicos, que implicam tempos de cura longos (7 a 28 dias) e maior quantidade de ganga no produto final.

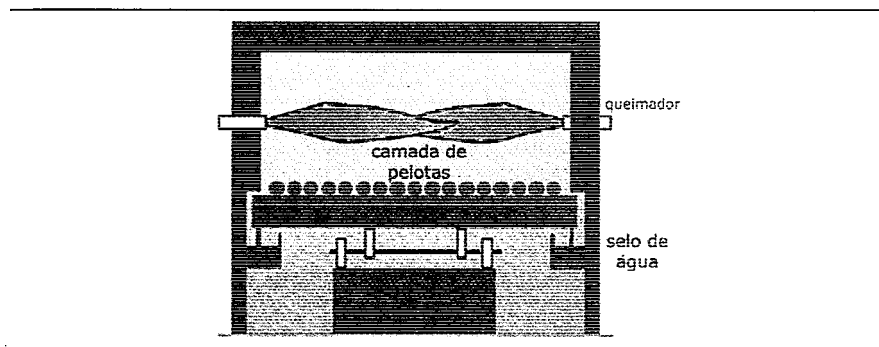
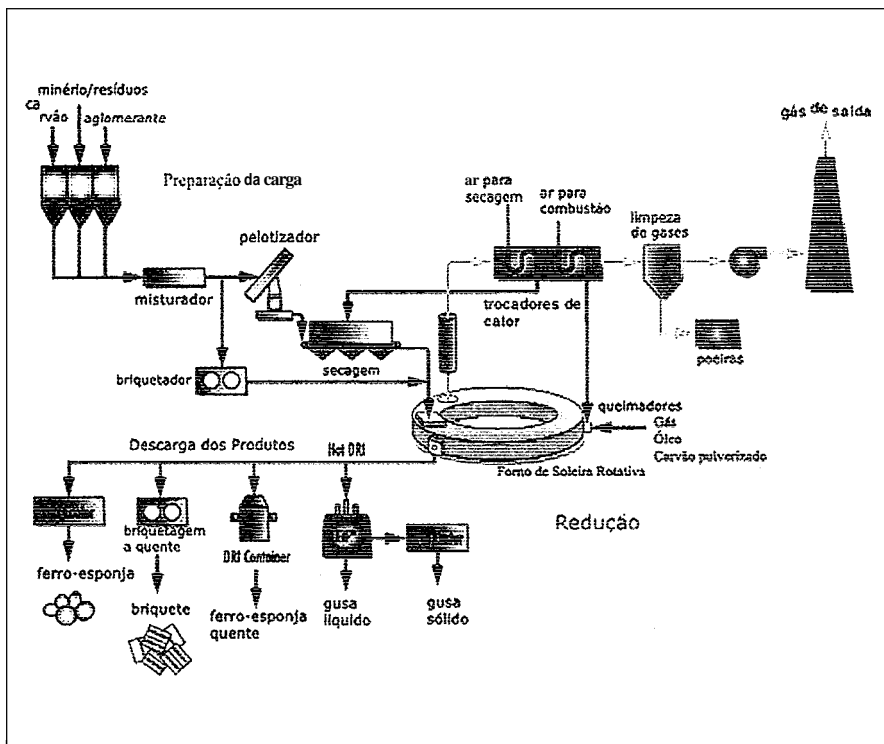


FIGURA 4.14 - Corte transversal de forno de soleira rotativa com camada de pelotas auto-redutoras (FEINMAN, 1999).¹³

Redução de Minérios de Ferro por Redução Direta e Processos Alternativos

A matéria-prima (minério de ferro, redutor e aglomerante, necessário apenas para permitir o manuseio das pelotas) é misturada com água e carregada em disco ou tambor de pelotamento. As pelotas cruas são imediatamente transferidas para secagem e, em seguida, carregadas no forno de soleira rotativa. O forno é aquecido pela queima de gás, ou carvão pulverizado, atingindo entre 1.250°C e 1.350°C . A estas temperaturas as reações no interior da pelota auto-redutora são muito rápidas, e os tempos de residência das pelotas no forno variam de 9 a 12 minutos, após o que as pelotas já metalizadas são descarregadas a temperaturas entre 900°C e 1.000°C . Estas pelotas podem ser submetidas à briquetagem a quente, produzindo-se briquetes de ferro (HBI, *hot briquetted iron*), ou transferidas quentes diretamente para forno de fusão, ou ainda resfriadas produzindo-se o ferro-esponja. Dentre os processos comerciais que empregam fornos de soleira rotativa, encontram-se o Inmetco e o Fastmet, representado na Figura 4.15.

FIGURA 4.15 - Representação esquemática do processo Fastmet (MIYAGAWA et al.,¹² 1998).



O recém-desenvolvido processo ITmk3 é muito semelhante ao Fastmet, com a diferença fundamental de que opera a temperaturas mais altas que este, em 1.350°C e 1.450°C , de tal forma que o ferro formado absorve carbono e funde ainda dentro do forno de soleira rotativa, e o produto final é formado por nódulos de ferro-carbono separados da escória.

4.3.4 Processos que empregam misturas não aglomeradas de carvão e minério de ferro

Recentemente, foram desenvolvidos processos que empregam misturas não-aglomeradas de carvão e minério de ferro ou resíduos contendo óxidos de ferro. O material particulado é aquecido a temperaturas que promovem a rápida reação de redução carbotérmica, e o produto obtido, por ser particulado, deve ser briquetado ao fim do processo. O processo Primus (PRIMUS, PAUL WURTH, s.d.)¹⁴ (Figura 4.16) emprega forno de patamares, tradicionalmente usado em operações de ustulação de minérios sulfetados, para efetuar a reação.

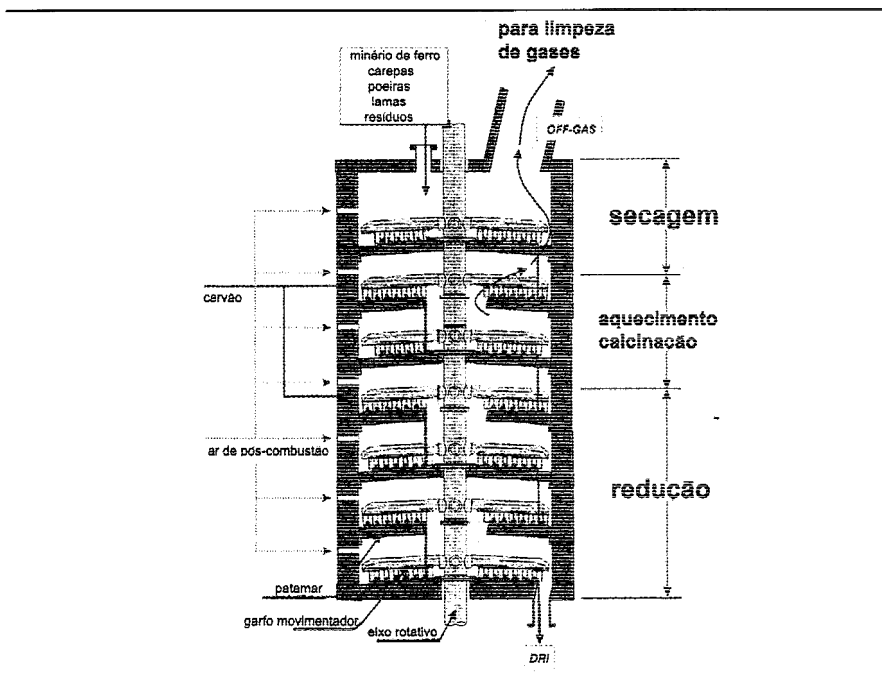


FIGURA 4.16 - Processo Primus (PRIMUS® PAUL WURTH, s.d.).¹⁴

4.4 Comparação entre os Diversos Processos

A Tabela 4.1, a seguir, apresenta dados comparativos dos processos descritos no texto. A última linha apresenta uma estimativa do consumo energético líquido para os diversos processos; observa-se que aqueles processos que produzem metal líquido apresentam um consumo energético um pouco maior, por tonelada de produto, que aqueles nos quais o produto é sólido. Deve-se levar em conta que o metal líquido apresenta vantagens importantes, inclusive energéticas, sobre o produto sólido. Nos processos em que o gás de saída contém ainda um apreciável crédito energético (caso do Alto-Forno, Corex e Dios), este foi descontado do consumo bruto. Finalmente, cabe destacar que consumo energético apenas não é critério definitivo, pois o custo da energia produzida de diferentes fontes (carvão, gás natural, eletricidade, coque) varia com a localização geográfica. Nesse modo, a seleção de um processo alternativo ao Alto-Forno requer detalhados estudos de viabilidade econômica e técnica.

TABELA 4.1 - Alguns parâmetros de processos de redução de minérios de ferro

	ALTO-FORNO	COREX	TECNORED	DIOS	MIDREX	FINMET	FASTMET
processo	cuba 1 estágio	cuba/ gaseificador- fundidor, 2 estágios	cuba 1 estágio	cuba/reator, 2 estágios	cuba 1 estágio	leito fluidizado 4 estágios	seleira rotativa 1 estágio
estágios preliminares	coqueificação aglomeração	aglomeração fábrica oxigênio	pelotização cura		reforma do gás aglomeração	reforma do gás	pelotização
reductor/ combustível							
coque (kg)	320	-	-	-	-	-	-
carvão p/ injeção (kg)	160	-	-	-	-	-	-
carvão vapor (kg)	-	1000	520	950	-	-	250-380
gás natural (GJ)	-	-	-	-	10	12,5	2,5
oxigênio (m ³)	30	560	-	610	-	-	-
eletricidade (kWh)	58	75	-	-	120	150	60-120
aglomerante (kg)	-	-	150	-	-	-	50

Fonte: LÜNGEN e STEFFEN, 1998¹⁵ e TENNIES, METIUS e KOPFLE, 2000.¹⁶

REFERÊNCIAS

- 1 MIDREX CORPORATION, INC. World direct reduction statistics. *Direct from Midrex*, 2005.
- 2 WALKER, R.D. *Modern ironmaking methods*. London: The Institute of Metals, 1986.
- 3 MIDREX TECHNOLOGIES, INC. *Midrex process*. Disponível em: <<http://www.midrex.com/uploads/documents/Direct%20Reduction%20Brochure1.pdf>>. Acesso em: 06 out. 2006.
- 4 SIMIONATO, G.; MARTINIS, A. Danarex pilot plant proves sponge iron quality. *MPT International*, v. 25, n. 1, p. 44-51, Feb. 2002.
- 5 HASSAN, A.; WHIPP, R. The Finmet process: ai? operational and technical update. *Stahl und Eisen*, v. 124, r. 4, p. 53-58, 2004.
- 6 LÉONARD, G. ; BERTLING, R. Latest comissioning and operationai results of Corex C-2000 plants. In: IRONMAKING CONFERENCE PROCEEDINGS, 58., 1999, Chicago, lil. Warrendale, Pa: Iron & Stell Society, 1999. p. 355-360.
- 7 EICHBERGER, E., FREYDIRFER, H., BRAUER, F., HOLASCHKE, P. First operational results of the Corex plant ai Jindal Vijayanagar Steel. *MPT International*, v. 23, n. V, p. 56-60, 2000,
- 8 KATAYAMA, H.; IBARAKI, T.; FUJITA, M. Reaction and heat transfer in bath smelting of iron and ferroalloys. In: SAVARD/LEE INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON BATH SMELTING, 1992, Montreal. Warrendale, PA: TMS, 1992, p. 431-443,
- 9 SAWADA, T. The start-up of the DIOS pilot plant. IRONMAKING CONFERENCE PROCEEDINGS, 54., 1995, Nashville. Warrendale, Pa: Iron & Stell Society, 1995. p. 499-506.
- i 0 STEFFEN, R.; LUNGEN, H.-B. State of the art technology of direct and smelting reductisn of iron ores. *Revue de Métallurgie*, rl. 3, p. 171-181, Mar. 2004.
- i 1 CONTRUCCI, M.A.; COSTA, P.C.; MARCHEZE, E.; NOLDIN, J.H.; D'ABREU, J.C.; CELLISSEN, T.; COX, I.J.; MEIJER, K. Tecnored: the first full scale furnace. In: AISTECH 2005, Charlotte, NC. *Proceedings...* Warrendale, PA: Iron and Steel Society, 2005. v. 1, p. 219-225.

- 12 MIYAGAWA, K.; MATSUMURA, T.; TAKENAKA, Y.; SHIMIZU, M.; KOBAYASHI, I.; HARADA, T.; MEISSNER, D. Development of the Fastmet as a new direct reduction process, IRONMAKING CONFERENCE PROCEEDINGS, 57., 1998, Toronto. Warrendale, Pa: Iron & Steel Society, 1998. p. 977-881.
- 13 FEINMAN, J. Direct reduction and smelting processes. In: WAKELIN, D.H. (ed.), *The making, shaping and treating of steel*, 51. ed. Pittsburgh: The AISE Steel Foundation, 1999. p. 790.
- 14 PRIMUS, PAUL WURTH. *Catálogo*. [S.n.t.]
- 15 LÜNGEN, H. B.; STEFFEN, R. Comparison of production costs for hot metal and sponge iron. *Metallurgical Plant and Technology*, n. 5, p. 54-66, Oct. 1998.
- 16 TENNIES, W.L.; METIUS, G.E.; KOPFLE, J.T. Direct reduction technology for the new millennium. *Metallurgical Plant and Technology*, n. 6, p. 60-65, Dec. 2000.

BIBLIOGRAFIA

- 1 CUINNINGHAM, B.; STEPHENSON, J. Direct reduction processes, IE: FEINMAN, J.; MACRAE, D. (Ed.) *Direct reduced iron: technology and economics of production and use*. Warrendale, PA: Iron and Steel Society, 1980. p. 64-95.
- 2 DANCY, T.E. Solid state reduciion of iron ores. In: THE ELLIOTT SYMPOSIUM, 1990, Cambridge. *Proceedings...* Warrendale, PA: Iron and Sieel Society, 1990. p. 11-31.
- 3 FEINMAN, J. Direct reduction and smelting processes. In: WAKELIN, D.H. (ed.). *The making, shaping and treating of steel: ironmaking volume*. 11.ed. Pittsburgh: AISE Steel Foundation, 1999. p. 763-801.
- 4 FRUEHAN, R.J. New steelmaking processes: drivers, requirements and potential impact. *Ironmaking and Steelmaking*, v, 32, n. 1, p. 3-8, Feb. 2005.
- 5 FUKUSHIMA, T. *On DRI - technology of today: lecture at IPT*. São Paulo, 1997. [Palestra]
- 6 NAVA, A. C. Revisión y evaluación de procesos alternativos al horno alto. *Revista de Metalurgia*, v. 36, n. 6, p. 420-434, Nov.-Dez. 2000.

Fabricação de Aço Líquido em Conversor a Oxigênio

5.1 O Que é Aço?

Capítulo

05
=d

Aço é uma liga metálica que contém geralmente de 0,002% a 2,0% do peso em carbono, além de outros elementos de liga nas mais variadas quantidades.

Os aços-carbono possuem na sua composição apenas quantidades limitadas dos elementos carbono, silício, manganês, cromo, enxofre e fósforo. Outros elementos existem apenas em quantidades residuais.

A quantidade de carbono presente ~; o aço define a sua classificação: os baixo-carbonos possuem no máximo 0,30% de carbono; os médio-carbonos possuem de 0,30% a 0,60%; e os alto-carbonos possuem de 0,60% a 1,00%.

Os aços, em geral, são classificados em Grau, Tipo e Classe. O Grau normalmente identifica a faixa de composição química do aço. O Tipo identifica o processo de desoxidação utilizado, enquanto a Classe é utilizada para descrever outros atributos, como nível de resistência e acabamento superficial.

A designação do Grau, Tipo e Classe utiliza uma letra, número, símbolo ou nome. Existem vários sistemas de designação para os Aços, como o SAE (*Society of Automotive Engineers*), AISI (*American Iron and Steel Institute*), ASTM (*American Society of Testing and Materials*) e ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas).

5.2 Processo de Obtenção do Aço Líquido

5.2.1 Um pouco de história

O ano de 1856 é considerado o ano da invenção do processo Bessemer, por Henry Bessemer. Bessemer, além de inventar o conceito de conversão do gusa em aço usando o oxigênio do ar, também concebeu o processo de lingotamento contínuo do aço; ele era engenheiro civil e trabalhava numa empresa de administração de patentes.

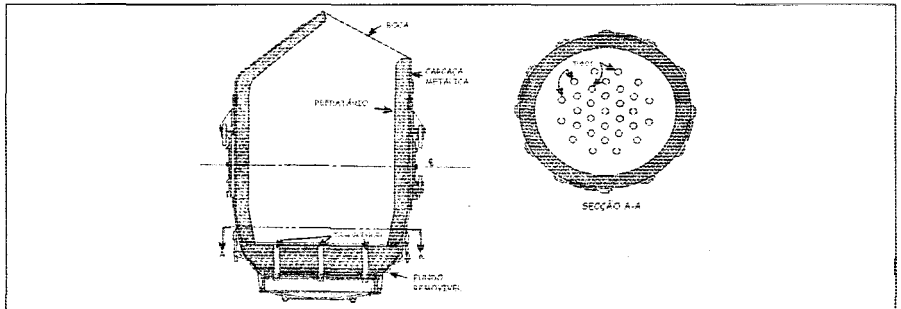
Antonio Malynowskyj

Fabricação de Aço Líquido em Conversor a Oxigênio

Até essa época, o aço era fabricado basicamente pelo processo do forno de pudlagem; era bastante ineficiente e de baixa produção.

Com a invenção do processo Bessemer este cenário mudou. Pela insuflação de ar através do gusa líquido conseguiu-se oxidar o carbono (C), o silício (Si) e o manganês (Mn) nele contido e ter energia suficiente para elevar a temperatura do gusa, que era de no máximo 1.300°C , para o patamar de 1.600°C , obtendo-se aço líquido neste reator, mostrado na Figura 3.1 (KOR, 1977).¹

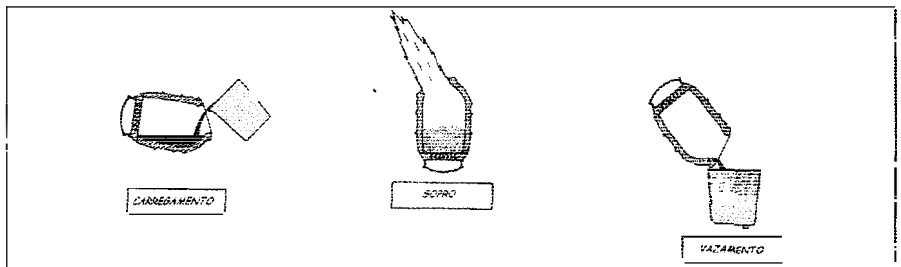
FIGURA 5.1- Processo Bessemer (esquemático) (KOR, 1977).¹



Com um tempo de aproximadamente 15 minutos, fabricavam-se 2 toneladas de aço com pouca mão-de-obra, o que era altamente vantajoso em relação ao processo citado anteriormente.

A seqüência operacional pode ser observada na Figura 5.2.

FIGURA 5.2 - Fluxo do processo Bessemer (WAKELIN, 1964).²



Isso abriu perspectivas imensas para a industrialização, pois nessa data também se conhecia a máquina a vapor e já existia o transporte ferroviário. Tal cenário acelerou o desenvolvimento industrial de países como a Inglaterra, Alemanha e Estados Unidos, pois havia a possibilidade de transporte fácil da matéria-prima e produtos manufaturados.

Outra data importante na Siderurgia é a de 1879, quando foi desenvolvido o processo Thomas (Sydney Gilchrist Thomas) para eliminar o fósforo e obter-se aço de melhor qualidade.

Até aí o aço de boa qualidade deveria provir de matéria-prima isenta de fósforo. Para eliminação do fósforo, era necessário utilizar uma escória básica, contendo CaO na forma de cal.

A adição de CaO no conversor Bessemer originaria, porém, o ataque de seu revestimento refratário ácido, que era de sílica (SiO_2). O processo Thomas teve um desenvolvimento muito grande, porque todas as jazidas de minério de ferro da região central da Europa eram fosforosas.

Depois do desenvolvimento do processo Bessemer, começaram a aparecer grandes quantidades de sucata. Dever-se-ia aperfeiçoar um método para refundir esta sucata e obter-se novamente o aço. O desenvolvimento de um processo que fundisse a essa temperatura, era um problema. Em 1868 foi inventado o processo Siemens-Martin.

Siemens desenvolveu um sistema de recuperação de calor nos fornos, que fazia que os fumos expelidos passassem por um empilhamento de tijolos, aquecendo-os. A seguir, o ar era introduzido no forno e passava por esse empilhamento, preaquecendo-se, conforme mostra a Figura 5.3.

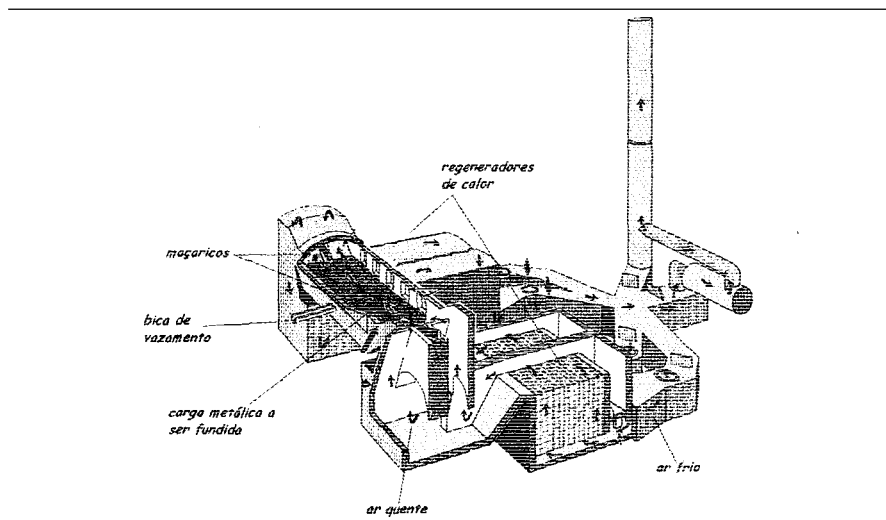


FIGURA 5.3 – Processo Siemens-Martin (WAKELIN, 1964).²

O francês Martin aproveitou esse sistema de recuperação de calor de Siemens no forno, que passou a ser conhecido como Siemens-Martin (*Open Hearth Furnace*), capaz de operar a uma temperatura maior, de forma a fundir a sucata.

O forno Siemens-Martin constituiu um avanço na Siderurgia pois permitiu fabricar aço através de sucata, uma vez que nos processos Bessemer e Thomas, o balanço térmico do sistema não permitia a adição de mais que 10% de sucata.

Fabricação de Aço Líquido em Conversor 2 Oxigênio

Outro advento importante na Siderurgia foi a invenção do forno elétrico Héroult que data de 1899. Teve expressão industrial a partir da Primeira Guerra Mundial, quando houve necessidade de desenvolver a fabricação dos aços inoxidáveis.

Em 1952 apareceu o conversor a oxigênio, ou LD. Esse processo permitiu fabricar aço com menor investimento de capital, e com uma produtividade muitas vezes maior que nos fornos Siemens-Martin, que passaram então a decair. Hoje em dia, esses fornos já se tornaram obsoletos, e foram substituídos pelos fornos LD.

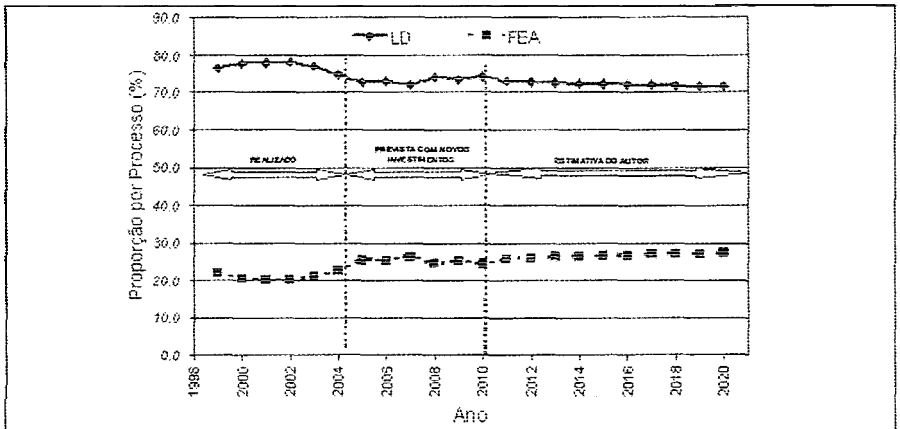
Os novos processos desenvolvidos recentemente não são definitivos. A tecnologia evolui e novos tipos de processos deverão ser desenvolvidos com o decorrer dos anos, atendendo a necessidades específicas cada vez mais sofisticadas.

Existe uma linha de desenvolvimento de cenários fizru-~~os~~os da Siderurgia que aposta na compactação das Usinas Siderúrgicas Integradas; nas quais, as unidades de redução seriam consideradas em somente um equipamento (por exemplo, Corex); o conversor não teria grandes modificações; e a área de solidificação e conformação mecânica seriam substituídas pelo conceito de lingotamento Near Net Shape (placas finas e laminação contínua de tiras a quente).

5.2.2 Produção de aço líquido por tipo de processo

A Figura 5.4 mostra a produção brasileira de aço líquido por tipo de processo. Observa-se a prevalência do processo LD sobre o Forno Elétrico.

FIGURA 5.4 – Proporção dos processos de produção de aço bruto no Brasil (INSTITUTO BRASILEIRO DE SIDERURGIA, 1997).³



5.2.3 Tipos de aço

Os principais tipos de aços são os planos e os longos.

Os aços planos são geralmente produzidos em processo LD de refino primário e lingotamento contínuo de placas, e podem ser assim classificados:

- Acalmados ao alumínio;
- Acalmados ao Silício;
- Acalmados ao Alumínio e Silício; e
- Aços inoxidáveis.

Os aços lingotados continuamente podem ser divididos em dois grandes grupos, quanto à composição química :

- Aços ao carbono; e
- Aços ligados.

Estes por sua vez, em função do teor de carbono, podem ser subdivididos em:

- de ultra-baixo teor de C (UBC) : $C \leq 0,01\%$;
- de baixo teor de carbono (BC) : $C \leq 0,10\%$;
- de médio teor de carbono (MC) : $0,10\% \leq C \leq 0,24\%$; e
- de alto teor de carbono (AC) : $C \geq 0,25\%$.

5.2.3.1 Produtos originários de aços planos

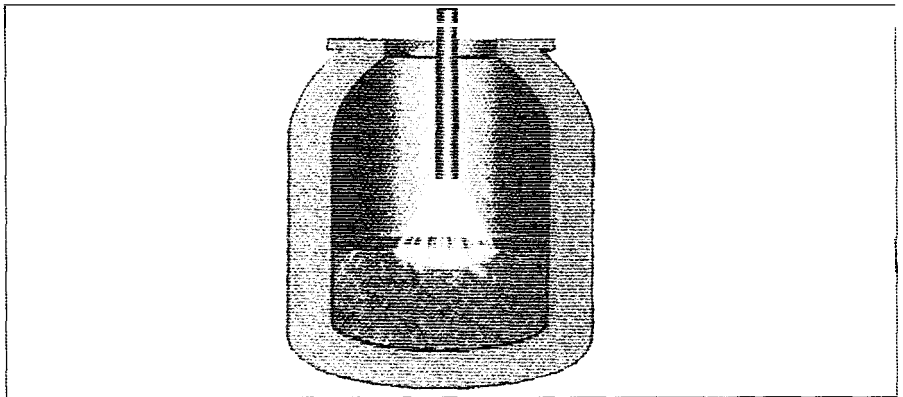
Tipo	Aplicação Final
<i>Chapas grossas</i>	Uso geral; estrutura geral; estrutura soldável; naval, tubo; vaso de pressão e caldeira; longarina; cuba de galvanização etc.
<i>Tiras a quente</i>	Uso geral; estrutura geral; estrutura soldável; naval, Plataforma; tubo; longarina; estampagem; botijão; cuba de galvanização; rodas etc.
<i>Tiras a frio</i>	Estrutura; estampagem média e profunda; indústria automobilística; estrutura soldável; aplicações eletromagnéticas; siliciosa etc.

5.3 Fabricação de Aços Planos ao Carbono

5.3.1 O processo LD e suas variantes

O processo LD, até 2005 foi responsável por cerca de 77% da produção brasileira de aço. O rápido crescimento desse processo na produção brasileira e mundial deve-se às suas características de alta produtividade, custos adequados e grande flexibilidade metalúrgica, podendo fabricar economicamente a maior parte dos tipos de aços. Uma apresentação esquemática deste processo é apresentada na Figura 5.5.

FIGURA 5.5 - Processo LD simples - esquemático
- LÖCKNER & CO.,
1977



Como o processo é relativamente novo, estão sendo feitos desenvolvimentos ponderáveis não só na parte de equipamentos como, também, na prática operacional, prevendo-se que nos próximos anos sua contribuição à produção mundial de aço deverá aumentar ainda mais.

A utilização do oxigênio na conversão do gusa em aço foi sugerida por Bessemer há mais de cem anos, porém, ela não se concretizou até mais recentemente, devido ao elevado custo da separação do oxigênio do ar.

Durante a Segunda Guerra Mundial ele se tornou disponível a preços suficientemente baixos para tornar atrativa a sua adição ao sopro de conversores Thomas, que até então utilizavam ar.

Com base nesse trabalho, foram instalados conversores experimentais de 15t na usina de Linz e de 10t na usina de Donawitz, na Austria. Os resultados se mostraram satisfatórios, sendo então construídos duas Aciarias

nessas cidades, a de Linz entrou em operação em novembro de 1952 e a de Donawitz, em maio de 1953, conforme apresentado na Figura 5.6.

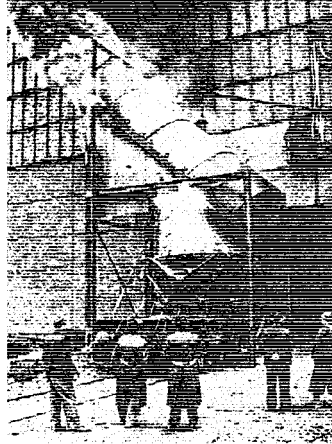


FIGURA 5.6 – Primórdios do processo LD em Linz, Áustria (VOEST-ALPINE, 2006).⁵

Em agosto de 1954 entrou em operação a primeira Aciaria LD (de Linz e Donawitz) fora da Austria, na usina da Dominion Foundries, em Hamilton, Canadá (KRANJC, 1966).⁶

Apesar do desenvolvimento quase explosivo do processo em cerca de meio século de existência, os seus princípios básicos permaneceram praticamente constantes. Entretanto, desenvolvimentos consideráveis foram efetuados, não só no que diz respeito à capacidade do forno, que alcança hoje valores na ordem de 400 toneladas, mas também na sua forma, dispositivos de sustentação e basculamento, na forma e no número de bocais para sopro de oxigênio, na qualidade dos refratários, ao lado do aprimoramento das técnicas operacionais.

A rápida seqüência das operações de refino em conversores de alta capacidade e a operação simultânea de dois conversores conferem às Aciarias LD uma grande produtividade.

Por outro lado, com aplicação de práticas de sopro adequadas, quase todas as reações de refino podem ser obtidas, com o que o processo ganha grande versatilidade metalúrgica. Essas duas características, aliadas às condições favoráveis de custos, tanto de investimento quanto operacional, foram responsáveis pela rápida evolução da participação do processo LD na produção mundial de aço.

Fabricação de Aço Líquido em Conversor a Oxigênio

O processo LD foi rapidamente introduzido no Brasil, através da Cia Siderúrgica Belgo Mineira, cuja Aciaria LD da usina de Monlevade entrou em funcionamento em 1957, menos de 5 anos após a de Linz. Em 1963 iniciaram a sua operação as usinas da Cia Siderúrgica Mannesman, em Belo Horizonte, e Intendente Câmara, da Usiminas, em Ipatinga. Logo em seguida entrou em operação a Aciaria LD da Cosipa, em 1965.

A fabricação do aço através do refino do gusa pelo oxigênio não está limitada ao processo LD; aiém de processos tradicionais como o r, LD-AC, Rotor e Kaldo, novos métodos de insuflação de oxigênio pelo fundo dos conversores vêm sendo desenvolvidos nos últimos anos, como o AOD, OBM (Q-BOP).

O processo LD-AC caracteriza-se pela injeção de cal pulverizada junto com oxigênio, pela lança, sendo utilizado no refino de gusa fosforoso, devido às suas melhores condições de formação de escória. Os processos Kaldo e Rotor utilizam fornos rotativos e injeção de oxigênio em condições que permitem a maior combustão de CO dentro do conversor, possibilitando a utilização de maior proporção de sucata na carga.

O processo AOD (*Argon Oxygen Decarburization*) foi desenvolvido pela Linde, uma divisão da Union-Carbide, introduzido comercialmente em 1968, destinado à fabricação de aços inoxidáveis. O forno tem forma que lembra o conversor Bessemer e a mistura Argônio-Oxigênio é injetada no banho através de ventaneiras laterais situadas próximas ao fundo.

O processo CLU desenvolvido em conjunto pela Creusot - Loire e Uddeholm é o mais novo processo de refino de aços inoxidáveis. É baseado na injeção, pelo fundo, de uma mistura de oxigênio e vapor d'água em um banho metálico com elevado teor de cromo.

O processo OBM (*Oxygen Bottom Blowing Max-Hütte*) foi desenvolvido na Alemanha. Ao mesmo tempo foi desenvolvido um processo semelhante na Bélgica. Foram, então, reunidas as patentes, surgindo o processo OBM, no qual é injetado o oxigênio pelo fundo, juntamente com um hidrocarboneto gasoso. Após o fim do refino, é injetado no forno um gás inerte para desgaseificação, o que permite a obtenção de aços com elevado grau de limpeza. Além disso, a injeção de cal pulverizada junto com o oxigênio fornece excelentes condições de controle metalúrgico.

Em 1971, a United States Steel assinou acordo com a Max-Hütte para os direitos de aplicação do processo OBM, rebatizando-o de Q-BOP (*Quick* ou *Quiet-Basic Oxygen Process*).

O processo LWS (*Loire-Wendel-Sprunck*) foi desenvolvido na França a partir de 1968, e assemelha-se muito ao OBM, sendo, entretanto, utilizado óleo combustível em vez de hidrocarboneto.

De uma forma geral estes processos são chamados de Processo LD com sopro combinado, que consiste no sopro por ventaneiras montadas rio fundo refratário do conversor de gases inertes e não-inertes dos mais variados tipos, como mostra a Figura 5.7.

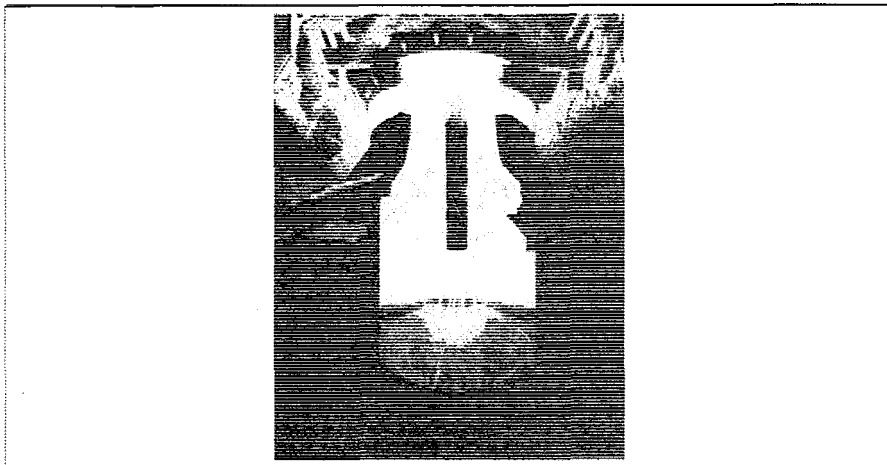


FIGURA 5.7 – Processo LD com sopro combinado (VOEST-ALPINE, 2006).⁵

5.3.2 O Processo LD e suas matérias-primas

As principais matérias-primas utilizadas na fabricação de aço pelo processo LD são o gusa líquido, gusa sólido, sucatas de aço e ferro fundido minério de ferro, cá, fluorita e oxigênio.

Podem ser utilizados calcário e outros fundentes, como o dolomito cru e a fluorita. A carepa de laminação e o sinter podem, também, ser utilizados como refrigerantes em substituição ao minério de ferro, e a adição de minério de manganês para este fim é vantajosa do ponto de vista econômico, pois possibilita o aumento do teor de Mn no fio de aço, economizando, assim, na quantidade de ferroligas a serem adicionados durante a metalurgia de panela (refino secundário).

Gusa líquido - Constitui a parte predominante da carga metálica, sendo seu aporte térmico, em termos de temperatura e composição química, responsável pela quase totalidade do fornecimento de calor ao processo.

O gusa líquido deve apresentar características físico-químicas adequadas e com a menor variação possível, a fim de permitir uma operação regular do conversor. Sem isso, a produtividade diminui em muito, devido à necessidade constante de ajustar o processo (vazão e altura de lança) às condições anormais, que são praticamente identificadas pela temperatura do gusa baixo (menor que 1.230°C) e pelos teores muito alto de Si no gusa (acima de 0,9%) ou muito baixo (inferior a 0,1%). A especificação da composição química do gusa, normalmente, varia pouco conforme as peculiaridades regionais e a operação dos alto-fornos.

A proporção de gusa líquido na carga ao conversor depende de sua composição e temperatura (aporte térmico); da qualidade do aço a ser produzido; do volume das adições de cal, do minério e da carepa; e em parte, das dimensões do conversor. Normalmente, varia de 70% a 85%.

Sucata - A sucata de aço constitui a maior parte da carga sólida de um conversor LD. Do ponto de vista do rendimento metálico, é vantajoso o consumo de uma proporção alta de sucata, uma vez que seu teor de ferro é superior ao do gusa. É usada sucata de retorno da própria usina (em maior proporção) e, também, sucata comprada externamente à usina.

No aspecto da composição química, a sucata de retorno é constituída principalmente de ferro, não apresentando de maneira geral, problemas quanto a impurezas.

As dimensões da sucata devem ser tais que permitam a sua completa fusão durante o sopro e não causem estragos ao revestimento do conversor quando do carregamento. Além disso, deve estar completamente seca, para evitar o risco de explosões durante o enformamento do gusa líquido, feito após o carregamento da carga sólida.

A sucata de ferro fundido, especialmente de lingoteiras e assentos, é outra matéria-prima muito utilizada na carga metálica dos conversores LD. Apresenta maior conteúdo térmico do que a sucata (devido a seus teores elevados de "C" e "Si"), mas em contrapartida o rendimento em ferro diminui, e ocorre aumento do volume de escória durante a sua utilização.

Cal - A adição de cal no conversor LD é necessária para a escorificação da sílica formada pela oxidação do silício da carga metálica e para a remoção do fósforo e enxofre. Além disso, uma quantidade extra de CaO (na forma de cai) deve ser suficiente para diminuir o ataque do refratário pelo SiO₂, que deve ser mantido na escória na forma preferencial de silicatos complexos de cálcio e ferro.

Sendo a CaO a principal componente da escória, a boa operação metalúrgica do processo dependerá em grande parte da sua qualidade, que, por sua vez, está ligada ao calcário de origem, às condições de calcinação e ao tratamento posterior.

A cal utilizada no processo deve ser de alta reatividade. Esta se relaciona com as características físicas e químicas da cal obtida.

O calcário de origem deve ter um teor em carbonato o mais alto possível. Particularmente, os teores de sílica e enxofre deverão ser os menores possíveis.

As características físicas da cal (densidade aparente e tamanho dos cristais, e portanto, sua superfície específica) governam a velocidade de sua dissolução durante o processo de formação da escória no sopro da corrida no conversor LD. Dessa maneira, uma boa cal deve ter estrutura esponjosa. A superfície específica dos poros de uma pedra de cal chega a ter 3m² por grama.

O tamanho dos pedaços de cal é também importante para a sua dissolução, sendo esta tanto mais rápida quanto menor for. Entretanto, existe um limite inferior, abaixo do qual as perdas de finos durante o carregamento se tornam excessivas, sendo arrastadas pelo sistema de exaustão de gases do conversor durante o sopro.

Fluorita - A fluorita, constituída basicamente por fluoreto de cálcio (CaF₂), é utilizada como fundente da cal, para acelerar a sua dissolução e aumentar a fluidez de escórias muito viscosas. Seu consumo varia bastante de acordo com a qualidade da carga, tipo de aço e prática operacional, geralmente sendo da ordem de 100 a 200kg por corrida para conversores de 160 t por corrida (KOR, 1997).¹

Outros fundentes podem ser utilizados em lugar da fluorita, por razões econômicas e devido à sua escassez cada vez maior no mundo. Entre eles podem ser citados os aluminatos (especialmente, bauxita) e boratos.

Minério de ferro - Sua utilização no conversor LD pode ter duas funções: acelerador da dissolução da cai, quando adicionado no início do sopro e/ou agente refrigerante, sendo, então, adicionado em qualquer etapa, mas principalmente no final do sopro, para controle da temperatura. Sendo o seu poder refrigerante bastante elevado, seu consumo deve ser o menor possível, para um maior rendimento térmico do forno, maior consumo de sucata e maior produção de aço. Deve-se notar, também, que a utilização de grande quantidade de minério aumenta o volume de escória e agrava o risco de projeções.

Freqüentemente, utiliza-se carepa de laminação em lugar de minério de ferro, tendo ela vantagens do ponto de vista econômico e do processo, pois é produto de recirculação interna (diminuição do passivo ambiental da usina) e não carrega consigo a ganga do minério.

Outras adições - O Fe-Si é adicionado para controle térmico do processo, cedendo calor ao sistema, devido à oxidação do Si em SiO_2 , ser uma reação altamente exotérmica (fornecedora de entalpia ou energia calorífica).

Para proteção do revestimento e em menor escala como agente refrigerante, usa-se a dolomita (caicinada ou crua).

O calcário pode ser usado como refrigerante, atuando também como doador de cal. Seu uso deve ser evitado, pois aumenta o volume de escória, elevando o risco de projeções, diminuindo assim o rendimento metálico.

O minério de manganês é, às vezes, utilizado como fluxante no conversor, acelerando a dissolução da cai, e em sopro combinado, favorece o aumento do manganês de final de sopro, economizando assim as adições de ferroligas.

Oxigênio - O processo LD normalmente utiliza oxigênio de alta pureza (maior que 99%), para evitar teores de nitrogênio mais elevados no aço, o que é extremamente danoso para sua qualidade.

O consumo de oxigênio varia com a prática operacional (tipo de lança, distância banho-lança, adições de minério e carepa, qualidade do gusa e proporção de sucata na carga), sendo um valor médio $50 \text{ Nm}^3/\text{t}$ de aço.

5.4 Processo LD – A Operação do Conversor

5.4.1 A macrovisão de uma aciaria LD

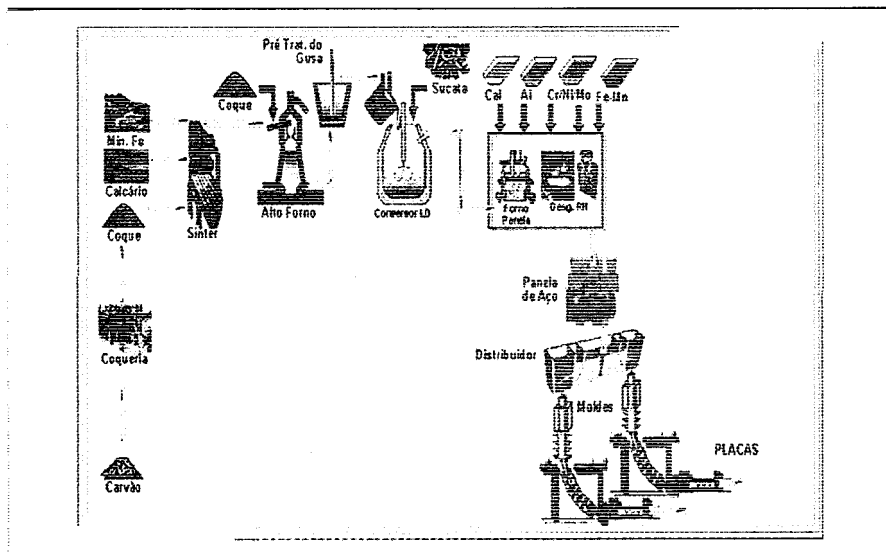


FIGURA 5.8 – Macrovisão de uma aciaria LD (VOEST-ALPINE, 2006).⁵

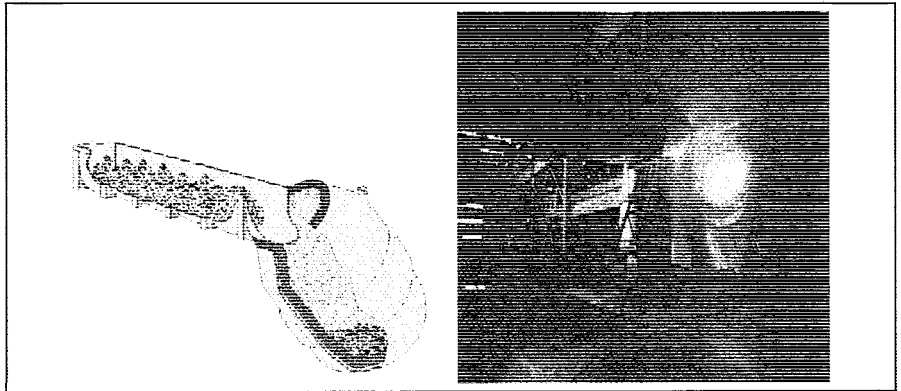
5.4.2 O ciclo operacional de um conversor: LD

O ciclo de operações de refino no LD envolve seis (6) etapas:

- Carregamento de carga sólida;
- Carregamento do gusa líquido;
- Sopros;
- Medição de temperatura e retirada de amostras;
- Vazamento; e
- Vazamento de escória.

Para o carregamento, o conversor é basculado para uma posição inclinada de cerca de 60° com relação à vertical. O carregamento da carga sólida (sucatas de aço e ferro; gusa sólido) é geralmente realizado através de recipientes adequados (calhas de sucata), que são manuseadas por pontes rolantes, conforme mostra a Figura 5.9.

FIGURA 5.9 –
Carregamento de sucata
no conversor LD
(COMPANHIA
SIDERÚRGICA
PAULISTA, 2006).⁷



O tamanho dessas calhas depende da capacidade do conversor e do confronto produtividade x investimento. A necessidade de duas calhas, para o carregamento de toda a carga sólida, aumenta de um a dois minutos o tempo de carregamento; por outro lado, calhas capazes de receber toda a carga sólida para conversores de grande capacidade implicam maiores custos de investimento.

A disposição de sucata na calha não é feita de maneira aleatória, mas por meio de um arranjo que permita a presença de sucatas mais finas na borda da calha de sucatas mais pesadas em seu fundo. Este procedimento visa proteger o revestimento do conversor, amortecendo o impacto pela queda inicial de sucata mais fina.

Após o carregamento de sucata, o conversor é retornado à posição vertical e oscilado em torno dela, para perfeito assentamento da carga; é então basculado novamente à posição de carregamento para receber o gusa líquido. Este é vazado dos misturadores ou carros torpedos em panelas especiais, com acentuado bico (muitas vezes denominadas panelas pelicano) onde é pesado.

Após medição de temperatura e amostragem, o gusa líquido é carregado no conversor (Figura 5.10), através da ponte rolante de carregamento principal. A panela de gusa tem dispositivo que permite o seu basculamento pelo gancho auxiliar da ponte durante a operação de carregamento.

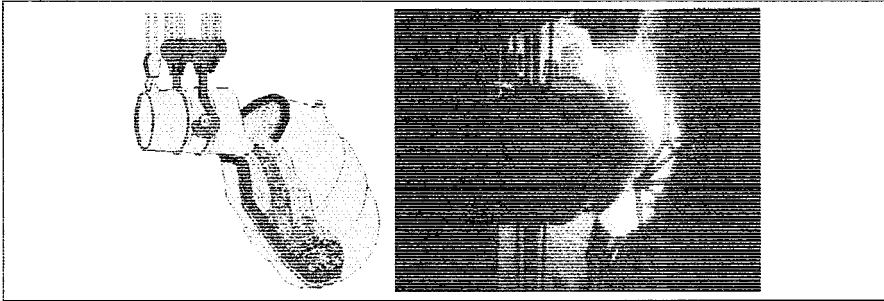


FIGURA 5.10 –
Carregamento do gusa líquido no conversor LD
– esquemático
(COMPANHIA
SIDERÚRGICA
PAULISTA, 2006).⁷

Terminado o carregamento do gusa líquido, o conversor é trazido novamente à posição vertical, a lança de oxigênio é baixada e o sopro iniciado (Figura 5.11) já durante a descida da lança. Após alguns segundos, produz-se uma chama que caracteriza o início das reações de refino.

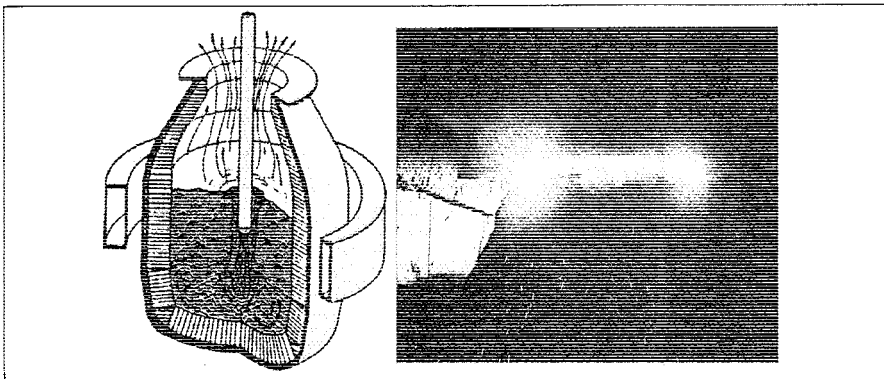


FIGURA 5.11 – Sopro de corrida LD (COMPANHIA
SIDERÚRGICA
PAULISTA, 2006).⁷

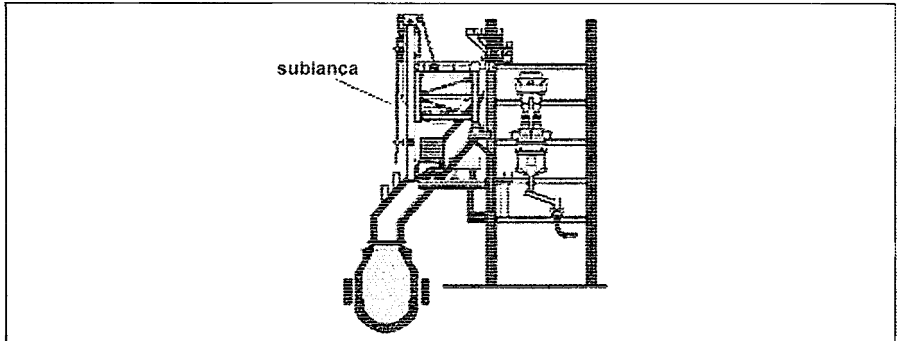
A duração do sopro depende basicamente da vazão específica de oxigênio, e a sua interrupção pode ser realizada com base na avaliação visual da temperatura e teor de carbono pelo soprador (operador que comanda o sopro), através de observação da chama. A parada do sopro pode, também, ser feita baseada na indicação do volume de oxigênio soprado, velocidade de descarburização, sublança (Figura 5.12) e outros.

As adições de cal e fundentes são realizadas totalmente no início do sopro, ou parceladas ~~em~~ durante seu transcurso. A altura de lança e vazão de oxigênio podem permanecer constantes ou sofrer modificações durante o sopro, de acordo com o padrão de sopragem previamente definido.

As adições de minério de ferro ou carepa para controle da temperatura devem ser realizadas na etapa final do sopro (CHAVES, 1976).⁸

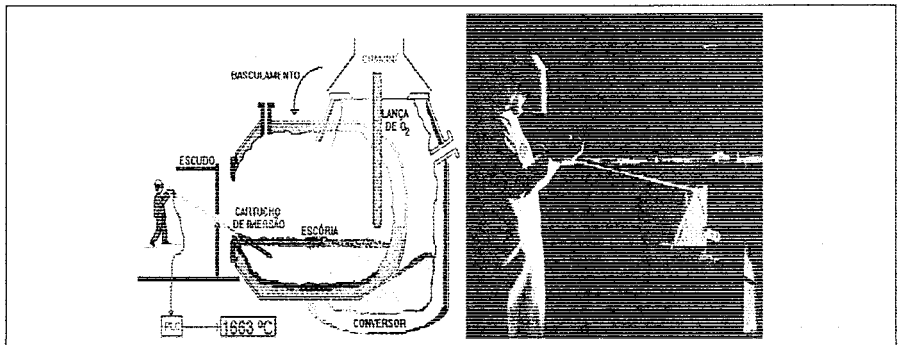
Fabricação de Aço Líquido em Conversor a Oxigênio

FIGURA 5.12 –
Amostragem automática
via sublança no
conversor LD
(temperatura e
composição química),
base do controle
dinâmico (COMPANHIA
SIDERÚRGICA
PAULISTA, 2006).⁷



Caso o conversor não tenha o recurso tecnológico da sublança, assim que o sopro é interrompido, este é basculado para uma posição aproximadamente horizontal, a fim de se medir a temperatura e retirar amostras de aço e escória (Figura 5.13). Se a composição química e a temperatura correspondem ao especificado, o conversor é basculado no sentido contrário para vazamento da corrida na panela de aço.

FIGURA 5.13 –
Amostragem manual no
conversor LD
(temperatura e
composição química)
(COMPANHIA
SIDERÚRGICA
PAULISTA, 2006).⁷



Se a temperatura estiver abaixo do previsto e/ou o teor de carbono acima do especificado, o conversor retorna à posição vertical, a lança é baixada e a corrida resoprada, fazendo-se as necessárias adições. No caso da temperatura estar acima do previsto, a corrida pode ser resfriada no conversor, com adição de minério de ferro, calcário, ou ainda aparas de sucata, neste caso, através de uma calha especial. Pode, também, ser resfriada na panela de aço, durante o vazamento, com adição de aparas de sucata.

O processo LD é oxidante, e portanto, o aço a ser vazado precisa ser desoxidado. Isto é feito durante o vazamento do conversor para a panela de aço, normalmente, por meio de alumínio e/ou silício, que são jogados

diretamente no jato de aço através de calhas direcionais. Durante o vazamento são adicionadas, ainda, as ferroligas, que irão conferir ao aço certas características desejadas. Esse material, na granulometria adequada, é adicionado através da mesma calha direcional mencionada.

O tempo de vazamento deve estar dentro de uma faixa adequada, para minimizar a passagem de escória para panela, evitar uma oxidação excessiva de metal pelo ar, bem como perdas elevadas de temperatura, de forma a permitir uma produtividade adequada. Para minimizar a passagem de escória do conversor para a panela de aço, utilizam-se dispositivos de retenção de escória que previnem eficazmente esta transferência de escória indesejada para a panela (Figura 5.14).

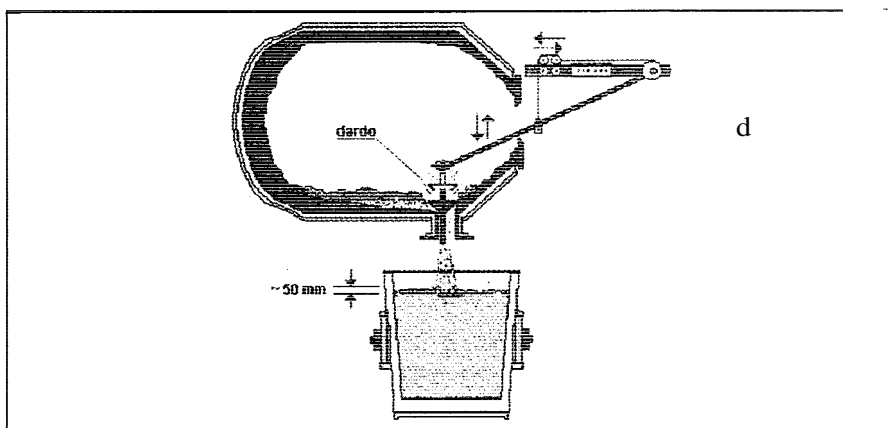


FIGURA 5.14 – Vazamento de aço líquido com dispositivo de retenção de escória (COMPANHIA SIDERÚRGICA PAULISTA, 2006).⁷

Após o vazamento, o conversor é basculado completamente para o lado de carregamento, e a escória é vazada no pote de escória, sela sua boca, e ele volta à posição inicial de carregamento, reiniciando o ciclo.

A panela de aço, após medição de temperatura, é encaminhada para as operações de metalurgia secundária, ou diretamente para o lingotamento contínuo.

5.5 Processo LD - Capacidade Produtiva de uma Aciaria LD

A capacidade produtiva de uma Aciaria LD depende basicamente da capacidade de seus conversores, de seu índice operacional e da duração média do ciclo de operação (tempo t_{ap} ou t_{tap}).

O ciclo de operação se inicia com o conversor na posição de receber a carga sólida e termina com sua colocação novamente nesta posição, após o vazamento de escória. Compreende os tempos de carregamento, sopro, retirada de temperatura e amostragem, vazamento do aço e vazamento da escória, e engloba, ainda, uma parcela devida a atrasos ocasionados por incidentes operacionais, tais como: resfriamento de corrida, resopro etc.

O tempo de carregamento da carga sólida pode ser considerado entre 1,5 minutos e 2 minutos, utilizando apenas uma calha de sucata. O tempo necessário ao carregamento do gusa líquido é também da ordem de 1,5 minutos a 2 minutos, e compreende o retorno do conversor à posição vertical. Assim, o tempo total de carregamento pode ser considerado de 3 minutos a 4 minutos.

O tempo de sopro está estritamente ligado à vazão específica de oxigênio e é influenciado pelo tipo de aço a ser produzido, carga utilizada e prática operacional adotada. Normalmente, a vazão de oxigênio é da ordem de 180-220 Nm³/h, com um tempo de sopro variando entre 16 minutos e 20 minutos.

Tais valores exigem, para conversores de maior capacidade, vazões de oxigênio que podem atingir mais de 50.000 Nm³/h, e que tornam o tempo de sopro praticamente independente da capacidade do forno.

A medição de temperatura, a amostragem e a análise do aço no final de sopro consomem um tempo bastante variável (5 minutos a 10 minutos), que é função da velocidade de amostragem, envio da amostra ao laboratório, análise química e transmissão do resultado. Estes tempos têm sido bastante reduzidos com o advento da utilização da sublança (Figura 5.12), que é um amostrador que pode ser utilizado em qualquer etapa do sopro, com o conversor soprando.

Em algumas aciarias é adotada a prática de análise visual dos teores de carbono e manganês e avaliação do grau de oxidação da corrida pelo aspecto da escória, para alguns tipos de aços, o que pode reduzir o tempo desta fase a cerca de 3 a 5 minutos. Mas isto é uma visão do passado; atualmente, os sistemas de automação e os modelos de carga e sopro (conhecidos como controle estático e dinâmico) são bastante aderentes à realidade do processo de sopro.

Grandes esforços vêm sendo desenvolvidos procurando acelerar o processo de amostragem e análise, visando aumentar a produtividade. Pode-se citar o dispositivo automático de amostragem e medição de temperatura (sublança), conforme dito anteriormente.

O tempo de vazamento é sensivelmente influenciado pelo diâmetro do furo de corrida (diâmetro inicial e vida do furo). A escolha do diâmetro do furo deve levar em consideração a produtividade, devendo ser, portanto, o maior possível, porém sem apresentar no final de vida uma vazão excessiva, o que acarretaria passagem de escória para a panela, e dificultaria a adição (e homogeneização) das ferroligas.

Para conversores com capacidade de 160 t a 180 t, o tempo médio de vazamento é da ordem de 7 minutos a 9 minutos. O tempo de vazamento da escória varia de 1,5 minutos a 2 minutos, totalizando um tempo de ciclo que pode variar de 35 minutos a 45 minutos.

Ao tempo de ciclo deve-se, ainda, acrescentar uma parcela, devida a não-conformidades e rotinas operacionais, como: resopro, resfriamento da corrida, medição da distância banho-lança. Normalmente, pode-se considerar a incidência dessa parcela da ordem de 2 minutos a 5 minutos por corrida.

O índice operacional de uma Aciaria LD adequadamente suprida de gusa líquido depende, grandemente, de seu *lay out*, dos equipamentos de manuseio de =até:-ias-primas e produto final, da qualidade dos refratários e técnicas de revestimento e reparo, da técnica de troca e reparo dos furos de corrida adotada, situando-se na faixa de 75% a 80%.

De importância fundamental é a existência de uma equipe de manutenção de tamanho adequado e com treinamento e experiência convenientes.

Quando se torna necessário uma maior produção para uma aciaria operando no sistema 2/1 (ou seja, dois conversores, um em operação e outro sendo revestido), normalmente, acrescenta-se outro conversor e a aciaria passa a operar no sistema 3/2. Com esta prática, o índice operacional decresce ligeiramente, com uma maior incidência de atrasos, devido à interferência de operação entre fornos, mas a produção é aumentada de 80% a 90%.

5.6 Processo LD - Controle Operacional

Os resultados operacionais de uma Aciaria LD podem ser avaliados através de três parâmetros: produtividade, rendimento e acerto de composição e temperatura do aço líquido ao término do sopro da corrida no conversor LD.

A produtividade é função da infra-estrutura de equipamentos e *lay out*, porém é influenciada negativamente por um inadequado controle operacional, que aumenta a incidência de corridas ressopradas ou resfriadas, paradas para a limpeza sob os conversores, devido a projeções, retirada de cascão da boca do conversor e outras anormalidades.

O rendimento em aço pode ser definido de várias maneiras; todavia, pode-se considerá-lo como a relação entre o peso de aço obtido e a soma dos pesos de gusa líquido, gusa sólido, sucata e minério de ferro adicionados (este último afetado por um coeficiente corretivo).

Utiliza-se, também, o rendimento placa/aço líquido, que pode ser considerado como a relação entre o peso de boas placas (que é igual ao peso de aço menos as perdas por cascão na pancia, sobre no distribuidor, perdas por ponta e cauda, carepa, amostra etc.) e a soma dos pesos de gusa líquido, gusa sólido, sucata, minério de ferro e ferroligas adicionadas na panela.

Quanto ao acerto da composição química e temperatura do aço, deve-se considerá-lo no final do sopro e na panela de lingotamento, após vazamento e adição de desoxidantes e ferroligas. O acerto no final de sopro é importante para possibilitar uma prática de desoxidação e adição de ligas em condições reprodutivas, evitando variações nos rendimentos dos diversos elementos. O acerto na panela define a composição final do aço e condiciona a qualidade do produto final.

Deve-se notar que o acerto de temperatura e composição no final de sopro está intimamente ligado à produtividade, pois o resopro de corridas ou seu resfriamento, além de prejudicarem a qualidade do aço, podem consumir um tempo da ordem de até 20% do tempo total do ciclo.

A finalidade do controle de processo é a obtenção, no final do sopro, do peso de aço visado, na temperatura e com a composição química desejada. Para isso, são utilizadas várias técnicas, com distintos graus de refinamento, dependendo das condições locais e opções técnicoeconômicas.

O controle de processo mais simples é o utilizado pelo soprador, que se apóia apenas em sua experiência pessoal para a condução de operação; na observação visual da chama para a avaliação do teor de C e temperatura; e na definição das medidas a serem adotadas para a interrupção do sopro no momento adequado.

Mais comumente, entretanto, utiliza-se um modelo matemático, que abrange um número variável (BARRETO, 1981)⁹ de parâmetros, e que fornece ao soprador subsídios para a condução do sopro. Esses modelos são classificados genericamente em estáticos, quando os cálculos são realizados a partir de dados levantados do início do sopro; e dinâmicos, quando utilizam informações colhidas durante o sopro e determinam ações corretivas.

O método de observação visual da chama é o tipo mais elementar de controle dinâmico, e possibilita a um operador treinado, o alcance dos índices de acerto de composição e temperatura razoavelmente altos.

A sua reprodutibilidade é influenciada basicamente pela vida do conversor, composição química e proporção do gusa, qualidade da sucata e condições de sopro, parâmetros que normalmente não apresentam grande variação em intervalos de tempo da ordem dos turnos de serviço.

5.7 Tipos de Aços Produzidos

O processo LD permite elaborar uma gama bastante elevada de tipos de aço, desde os baixo-carbono aos aços média-liga, e mesmo alguns altamente ligados.

No início de desenvolvimento do processo, notou-se que era possível obter teores baixos de N , C , e P , o que tornava o LD conveniente, sobretudo, à fabricação dos aços de baixo-carbono.

Os aços de alta qualidade, especialmente, os laminados a frio para estampagem, que devem satisfazer as especificações muito restritas, são hoje domínio quase exclusivo do processo LD, porém foram, também; desenvolvidas técnicas de fabricação que permitem a elaboração no LD de aços alto-carbono, e mesmo alguns tipos mais nobres, como aços estruturais de alta resistência, para vasos de pressão e caldeiras, aços para uso a baixas temperaturas e inoxidáveis.

A limitação do teor de S, imposta pelas condições de dessulfuração no conversor, foi eliminada pela dessulfuração do gusa, através de vários processos. A seleção criteriosa da matéria-prima e a utilização do gusa dessulfurado permitem a obtenção de teores muito baixos de enxofre.

O menor teor de carbono economicamente viável no processo LD é cerca de 0,03%. Teores menores podem ser alcançados apenas através da desgaseificação a vácuo do aço, por exemplo, o desgaseificador R.H.

O processo LD pode fabricar, entre outros, sem necessidade de posterior tratamento do metal na panela, os seguintes tipos de aço: estrutural, caldeira, alto-carbono, arame, mola baixa-liga para revenido, alta resistência, baixa-liga.

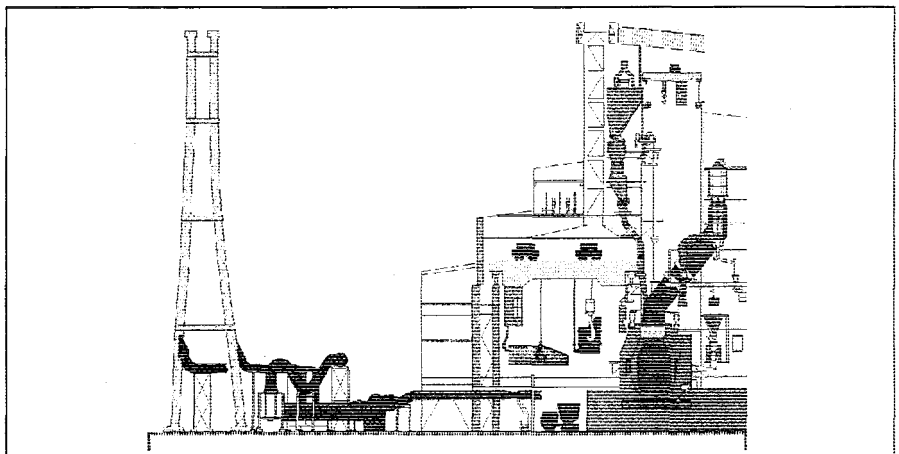
O desenvolvimento das modernas técnicas de metalurgia na panela, com a utilização de desgaseificação a vácuo, aliada à injeção de gases inertes ou de oxigênio e ao aquecimento sob vácuo do aço (por indução ou arco), além das técnicas de adição de ferroligas profundidas, permitem fabricar pelo processo LD, praticamente, todas as especificações de aço.

5.8 Equipamentos Principais

Os principais equipamentos de uma Aciaria LD equipada, convencionalmente, são mostrados na Figura 5.15.

O conversor é suspenso por um anel de sustentação, ligado ao sistema de basculamento (Figura 5.16).

FIGURA 5.15 – Lay out
típico de uma aciaria LD
(esquemático)
COMPANHIA
SIDERÚRGICA
PAULISTA, 2006).⁷



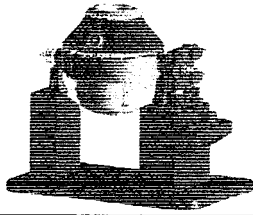


FIGURA 5.15 – Sistema de sustentação e basculamento de um conversor LD (esquemático) (VOEST-ALPINE, 2006).⁵

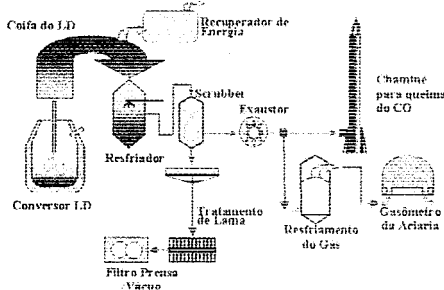


FIGURA 5.17 – Sistema típico de limpeza de gases de um conversor LD (esquemático) (NIPPON STEEL CORPORATION, 2001).¹⁰

Acima dele, encontra-se o sistema de captação de fumaça, que pode ser do tipo caldeira e queima de gases na chaminé, ou do tipo OG, com recuperação desses gases (Figura 5.17). Neste caso, após a lavagem, o gás é encaminhado a um gasômetro; quando não é queimado diretamente na chaminé.

As lanças de oxigênio ficam suspensas acima do conversor. Normalmente, duas lanças encontram-se ligadas aos sistemas de oxigênio e refrigeração, uma na posição de sopro (lança A) e outra de reserva (lança B), conforme mostra a Figura 5.18.

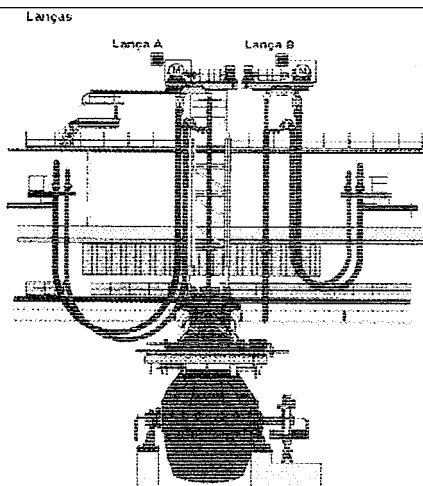
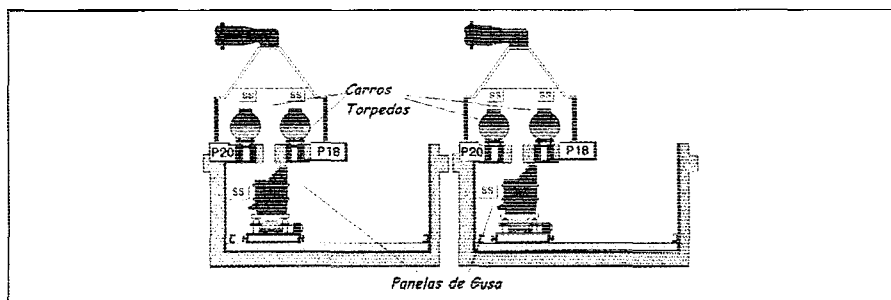


FIGURA 5.18 – Sistema de lanças de oxigênio de um conversor LD (esquemático) (COMPANHIA SIDERÚRGICA PAULISTA, 2006).⁷

A disposição dos silos de cal e outras adições, bem como os dispositivos de introdução desse material no conversor variam conforme a aciaria. O carregamento do gusa e sucata é, normalmente, realizado por pontes rolantes. As painelas de aço e os potes de escória se deslocam sob o conversor, em carros próprios e auto-acionados. As balanças de gusa, normalmente, são montadas em carros balança, sobre os quais se desloca a panela para receber o gusa do carro torpedão (Figura 5.19).

FIGURA 5.19 – Sistema de transferência de gusa do carro torpedão para panela de gusa e respectiva pesagem (esquemático) (COMPANHIA SIDERÚRGICA PAULISTA, 2006).⁷



As balanças de sucata são colocadas próximas às baias de estocagem, possibilitando colocar nas calhas de sucata, a quantidade requerida para a carga do conversor.

O equipamento de limpeza de gases permite reduzir a temperatura e o teor de sólidos dissolvidos na fumaça gerada pelo conversor, evitando a poluição atmosférica.

A adição de ferroligas durante o vazamento do conversor na panela de aço, é feita através de um equipamento localizado no piso de operação, ao lado do conversor.

O lingotamento do aço C feito com a utilização de pontes rolantes, que transferem a panela do carro até o refino secundário e lingotamento contínuo.

5.8.1 Carcaça do conversor

A carcaça do conversor é de chapas soldadas e, normalmente, se encaixa no anel de sustentação de maneira a facilitar a sua troca, e o eixo de rotação do forno é fixado nesse anel. Os perfis podem variar bastante para conversores de mesma capacidade, especialmente, no que diz respeito à profundidade e ao diâmetro do banho, em função dos critérios de projeto.

Os parâmetros básicos no projeto do conversor LD são o seu volume específico (volume útil/carga metálica), para o qual a tendência atual de projeto mantém entre $0,8 \text{ m}^3/\text{t}$ e $0,9 \text{ m}^3/\text{t}$, e a relação altura/diâmetro do conversor, que é mantida atualmente na faixa de 1,3 a 1,5.

5.8.2 Lança de oxigênio

A lança para injeção de oxigênio é constituída por três tubos de aço concêntricos, sendo o interior para o oxigênio e os dois externos para circulação de água de refrigeração. Na extremidade superior são acopladas nas lanças as mangueiras de oxigênio de sopro e água de refrigeração.

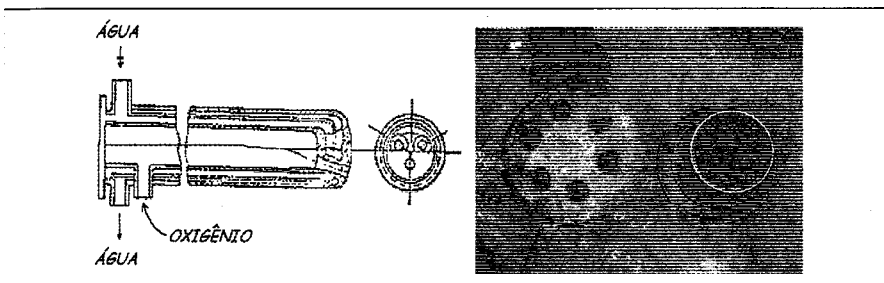


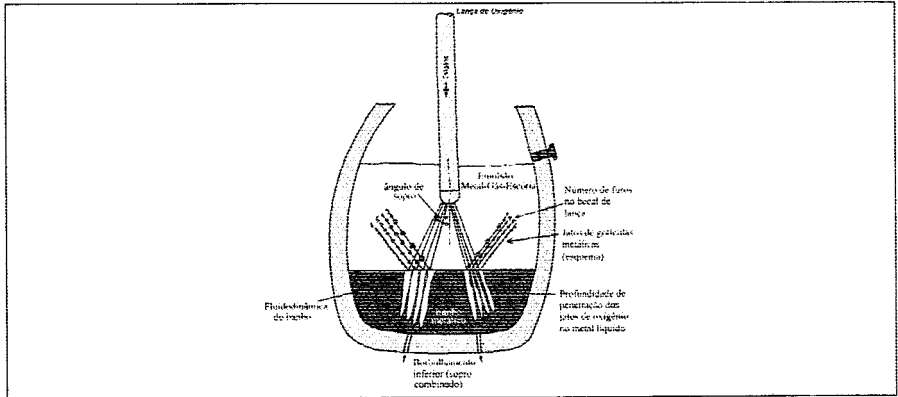
FIGURA 5.20 – Lança de oxigênio e bocais (COMPANHIA SIDERÚRGICA PAULISTA, 2006).⁷

A lança é sustentada, quando em utilização, por um carrinho movimentado verticalmente por um guincho, e normalmente existe um dispositivo de segurança que impede a queda da lança dentro do forno, no caso de ruptura dos cabos do guincho (Figura 5.18).

A prática normal é utilizar de 3 a 6 fusos no bocal da lança, permitindo uma distribuição mais uniforme do oxigênio sobre o banho (Figura 5.21). Eles são dispostos com seus eixos segundo as arestas de um triângulo equilátero, com ângulo de inclinação em relação ao vertical variando de 5% a 20%. O diâmetro dos furos varia de acordo com a pressão de trabalho e vazão desejadas.

Normalmente, utilizam-se perfis convergentes-divergentes, que permitem a injeção supersônica do oxigênio, possibilitando uma maior distância da lança ao banho para as mesmas condições de penetração do jato.

FIGURA 5.21 – Profundidade de penetração do sopro no banho em função do projeto do bocal de lança (BERRY METAL COMPANY, 2006).¹¹



5.8.3 Refratários

No conversor há dois tipos de revestimentos superpostos: o permanente, que é um revestimento de segurança, e o de trabalho, trocado periodicamente de acordo com o seu desgaste.

Os tijolos utilizados no forno LD são fabricados, normalmente, empregando-se a dolomita, niagesita ou misturas dolomita-magnesita ligadas com um tipo especial de alcatrão, e podem ser secados no forno depois de prensados. A duração do revestimento depende de numerosos fatores operacionais, bem como da qualidade dos tijolos utilizados.

5.9 Processo de Refino Primário: Teoria do processo LD

5.9.1 Reações de refino

Em Metalurgia, refino do metal é a eliminação das impurezas não desejáveis (PEHLKE, 1975).¹² Em Siderurgia, refino é usado em dois sentidos:

Químico - consiste na eliminação das impurezas indesejáveis. Assim, o refino do gusa corresponde à eliminação de C, Si, P e S, principalmente. Quando se fala em refino do aço, deve-se entender eliminação de C, P, S, como também dos gases H_2 , N_2 , O_2 , assim como eliminação das inclusões.

Físico (refino da estrutura) - consiste principalmente na eliminação das segregações (homogeneização da estrutura) e pode implicar inclusive a diminuição do tamanho de grão.

Assim, em aciaria, o sentido de refino é mais amplo. Nesta exposição, nos limitamos a falar do *refino químico*.

O gusa é uma liga impura do metal ferro. No processo de redução, no Alto-Forno, do óxido de ferro do minério (através do carbono do coque), são incorporadas à matriz líquida de ferro quantidades excessivas de silício, fósforo, enxofre, carbono, e mesmo manganês.

O processo de refino baseia-se em reações de oxidação dessas impurezas encontradas no gusa, verificando-se estas reações em sequência, de acordo com a afinidade pelo oxigênio. Exige-se, então, a adição de ingredientes imiscíveis ao metal líquido, para que neles se fixem as impurezas, dessa forma, removendo-as do metal.

Estes ingredientes constituem a escória, que por diferença de densidade se separa do metal, carregando as impurezas. Uma outra parte dessas impurezas é retirada do metal pelos gases formados nas reações de refino.

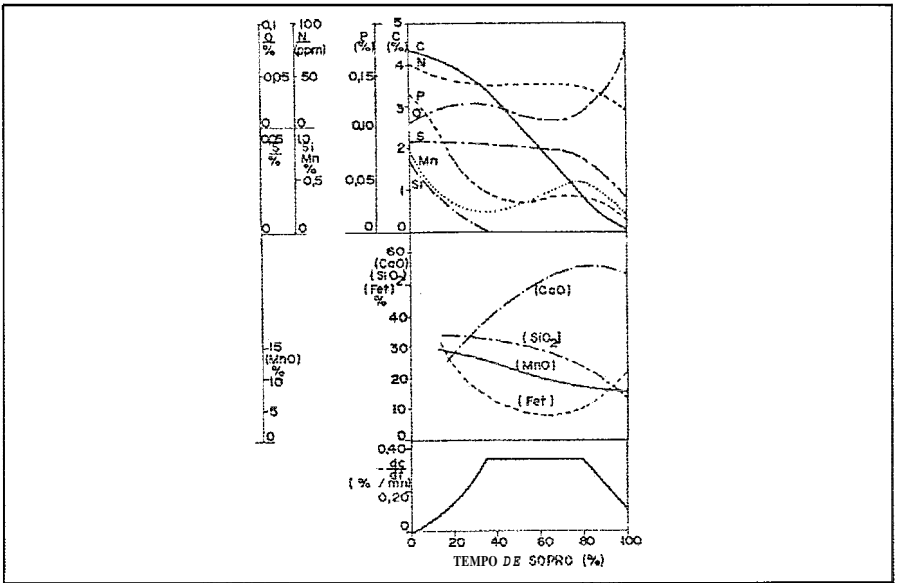
A característica essencial das reações de refino na fabricação do aço pelo processo LD é a oxidação parcial do carbono, manganês, silício, fósforo, e outros elementos porventura contidos no gusa líquido, e a redução do seu teor de enxofre. A formação de uma escória básica, além de neutralizar os óxidos ácidos formados, protegendo o revestimento refratário, acelera as reações de refino e permite a estabilização do enxofre e fósforo escorificados. Os outros elementos contidos na carga de sucata, como elementos de liga - Cr, V, Ti etc., ou como impurezas - Pb, Sn, serão ou não oxidados, sendo escorificados (isto é, incorporados à fase líquida de escória), dependendo de sua afinidade pelo oxigênio.

O oxigênio necessário às reações de refino é fornecido ao metal sob a forma gasosa, pelo jato de oxigênio da lança, contribuindo também o oxigênio contido nas adições de minério e carepa, porém, em menor escala. As reações não se dão, entretanto, apenas entre oxigênio gasoso e o metal líquido; ao contrário, a escória desempenha um papel importantíssimo no fornecimento de oxigênio ao banho.

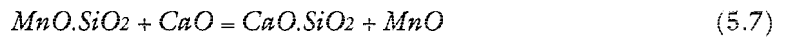
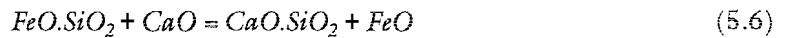
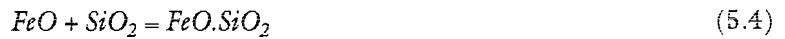
A evolução da composição química e temperatura do metal e da escória, durante o sopro, é mostrado na Figura 5.22, podendo se caracterizar a existência de três períodos distintos, de acordo com a variação da velocidade da reação de descarburção.

Fabricação de Aço Líquido em Conversor a Oxigênio

FIGURA 5.22 – Evolução da Composição Química do Metal Líquido, da Escória e da taxa de descarbonação em função do tempo de sopro de uma corrida L3 (MUNDIM, 1985).¹³



As reações podem ser assim descritas



Praticamente, todas as reações que ocorrem no processo LD são exotérmicas, isto é, liberam calor; principalmente as reações de oxidação do silício e manganês. Dessa forma, há uma elevação acentuada na temperatura da banha.

Terminada a oxidação do silício, o aumento da temperatura e a formação de uma emulsão metal-gás-escória, conforme mostra a Figura 5.23, criam condições em que a única reação importante é a descarbonação, cuja velocidade atinge valores só limitados pelo oxigênio disponível. As reações de descarbonação podem ser assim descritas:

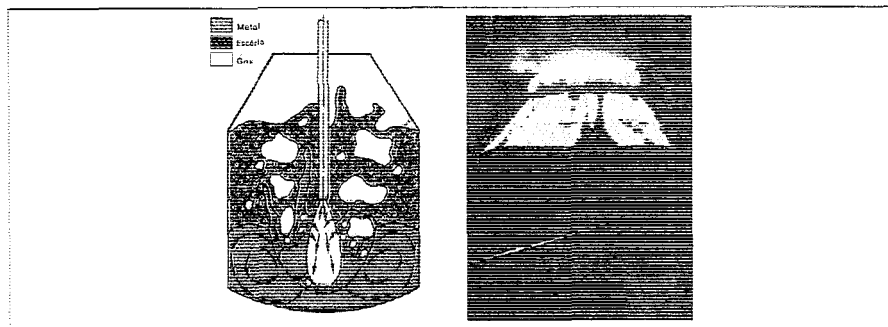


FIGURA 5.23 - Formação de emulsão gás-metal-escória durante o sopro LD (projeção) (COMPANHIA SIDERÚRGICA PAULISTA, 2006;⁸ NIPPON STEEL CORPORATION, 2001).¹⁰



Neste período, os óxidos de ferro e manganês da escória são reduzidos, revertendo esses elementos ao banho metálico, dando origem a um aumento do teor de manganês no metal (corcova do manganês). Estas reações são:

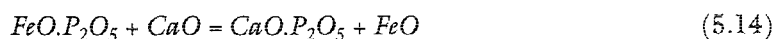
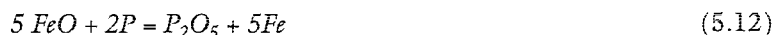


Este segundo período de sopro prossegue até o teor de carbono atingir um valor, a partir do qual a velocidade de descarburização passa a ser controlada não pela disponibilidade do oxigênio, mas pela difusão do carbono até a interface de reação.

A terceira etapa é caracterizada pela velocidade de descarburização decrescente e por um aumento gradativo da oxidação do manganês e do ferro, à medida que o teor de carbono do banho diminui.

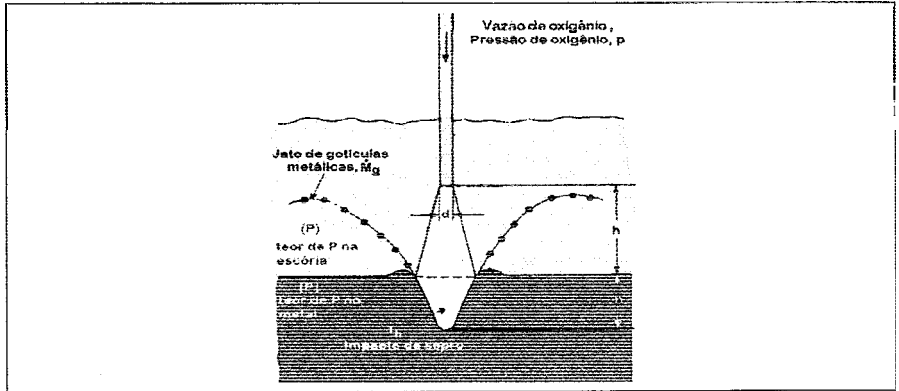
Nesta fase, a dissolução da cal é acelerada e a basicidade da escória que pode ser definida como a relação CaO/SiO_2 dissolvidos na escória aumenta acentuadamente.

A desfosforação é iniciada na primeira etapa, quando as condições de baixa temperatura e elevado teor de FeO na escória favorecem a reação de oxidação do fósforo. As reações de desfosforação no conversor são:



Fabricação de Aço Líquido em Conversor a Oxigênio

FIGURA 5.24 – Modelo de desfosforação em conversor LD (BERRY METAL COMPANY, 2006).¹¹



A Figura 5.24 mostra modelo clássico de desfosforação no conversor LD:

Na segunda etapa, a diminuição do teor de FeO da escória e o aumento da temperatura fazem que a reação de desfosforação seja interrompida, ou mesmo invertida, neste caso com aumento do teor de fósforo no metal. No período final, o aumento da dissolução da escória e o aumento da oxidação da escória fazem que a desfosforação prossiga atingindo taxas elevadas no fim de sopro.

A evolução da dessulfuração está intimamente ligada à evolução da dissolução da cal. De modo geral, ela apenas se processa de maneira mais efetiva na etapa final do sopro, quando a basicidade da escória se eleva, apesar de não atingir normalmente valores superiores a 50%. Deve-se notar, ainda, que a dessulfuração pela fase gasosa é responsável pela eliminação de cerca de 8% do enxofre carregado. As possíveis reações de dessulfuração no conversor são:



Como a dessulfuração nos conversores é limitada, deve-se preocupar com os teores de enxofre das matérias-primas que entram na fabricação do aço (principalmente o gusa), para evitar o aumento da introdução desse elemento no banho. Considerando que a obtenção de gusa líquido com baixos teores de enxofre pode prejudicar a produtividade dos alto-fornos, a tendência moderna é a dessulfuração intermediária do gusa entre o Alto-Forno e a Aciaria (em estações de dessulfuração ou durante a transferência do gusa do carro torpedo para a panela). É o que se chama de pré-tratamento do gusa.

O teor de oxigênio do banho se eleva inicialmente, devido às condições altamente oxidantes propiciadas pelo impacto do jato de oxigênio sobre o banho, atingindo valores superiores à saturação. Durante a segunda etapa, ele é reduzido pela intensa reação de descarburização, para aumentar rapidamente no final do sopro, guardando nítida relação com teor de carbono.

A variação do teor de nitrogênio do metal é o resultado das reações de desnitração do banho pela ação da reação de descarburização e oxidação dos nitretos (no primeiro período), além da nitrogação, devido ao teor de nitrogênio do oxigênio injetado.

O balanço dessas reações acarreta, geralmente, uma diminuição do teor de nitrogênio dissolvido no aço, no início e no final do sopro, porém se o teor de carbono final de sopro for inferior a determinado limite, a incorporação de nitrogênio no aço líquido pode ser significativa.

A temperatura do banho se eleva quase uniformemente durante todo o sopro, devendo-se, entretanto, notar que, mesmo com condições operacionais normais, o seu valor nas etapas iniciais apresenta uma dispersão bastante acentuada, devido às naturais oscilações de temperatura e composição do gusa e da cinética de dissolução da sucata. Na parte final do sopro, essa dispersão diminui acentuadamente.

As informações a respeito da variação da temperatura da escória são muito escassas. Há registros de medidas realizadas em condições normais, com altura de lança variável, tendo sido constatado que ela atinge valores 300° C acima da temperatura do banho, já nos primeiros minutos do sopro.

Esse gradiente decresce com o aumento de temperatura do banho e seu valor no final do sopro é da ordem de apenas 50° C.

5.9.2 Processos mecânicos ligados ao sopro

Na saída da lança, o jato de oxigênio se mistura, devido à turbulência na sua periferia, com a atmosfera circundante, que é arrastada na mesma direção.

A medida que se afasta do bocal, o jato sai perdendo energia cinética e se alargando de um ângulo de aproximadamente 16°, tomando a forma de um tronco de cone. Esse alargamento provoca uma queda de pressão de impacto do jato, do centro para a periferia. Na superfície de impacto, ele

impulsiona um dado volume de metal e forma, no banho, uma impressão cujo perfil corresponde ao das curvas de pressão. Essa profundidade de penetração não é constante, variando devido à instabilidade do movimento a partir de certo valor da pressão de impacto (MUNDIM, 1985).¹³

Essa instabilidade cria ondas superficiais que provocam a ejeção de partículas metálicas para a atmosfera circundante. Assim, em presença de uma quantidade suficiente de escória, forma-se uma dispersão escória-metal que irá desempenhar papel de primordial importância nas reações de refino.

A esses processos mecânicos se juntam reações químicas que modificam o desenvolvimento do refino.

A influência de profundidade de penetração sobre o desenrolar das reações de refino é utilizada praticamente na definição do padrão de sopragem. A maioria das aciarias adota valores variáveis de altura de lança, de acordo com as etapas do sopro e o tipo de aço a fabricar.

Assim, no início de operação, a lança fica mais alta, ocasionando um sopro macio (pouca penetração), de modo a possibilitar a rápida formação de uma escória reativa; na segunda etapa, a lança fica mais baixa (sopro mais duro) visando acelerar a reação de descarburização. No final do sopro, a altura de lança dependerá do tipo de aço a ser produzido, baixo ou alto-carbono, baixo-enxofre etc.

5.9.3 Formação da escória e evolução de sua composição (Figura 5.22)

A formação da escória envolve principalmente as reações da oxidação do Si, Mn e Fe e a dissolução da cal. Outros componentes são: Al_2O_3 , Cr_2O_3 , TiO_2 etc., provenientes das adições ou oxidação de elementos secundários da carga metálica; MgO proveniente do desgaste dos refratários ou de adições; CaF_2 proveniente da fluorita adicionada; e P_2O_5 e S, das reações de desfosforação e dessulfuração.

Um dos principais objetivos no refino LD é a formação rápida de uma escória reativa e rica em CaO, de maneira a evitar o ataque excessivo do revestimento refratário e acelerar as reações de desfosforação e dessulfuração. Por outro lado, a evolução da sua composição deve seguir um caminho adequado, a fim de possibilitar a correta formação da emulsão e minimizar o risco de proxeções.

No início do sopro ocorre a reação de oxidação direta do metal pelo jato de oxigênio no ponto de fogo. Forma-se, então, um óxido temporário (FeO), resultado da oxidação do ferro, pois o número de átomos desse elemento, que está em contato com o jato de oxigênio, nesse instante, é maior do que qualquer outro elemento presente no banho.

A seguir, o silício e manganês são oxidados pelo FeO formado. À medida que aumenta o volume de silício oxidado, a sílica formada começa a dissolver a cal, e com aumento do volume da escória, as reações passam a se processar no seio da emulsão metal-escória formada.

A emulsão, com partículas de cal não dissolvidas, favorece a formação de bolhas de CO e a reação de descarburagem se acelera. Ao final da oxidação do silício, ela atinge sua velocidade máxima, e o aumento de volume de CO gerado no meio da emulsão metal-escória cria as condições para a formação da emulsão metal-gás-escória. Nesta etapa, os óxidos de ferro e manganês são reduzidos da escória.

Na etapa final do sopro, com a diminuição da velocidade de descarburagem, o oxigênio em excesso irá oxidar o ferro e o manganês, cujos pesos na escória, especialmente o do óxido de ferro, apresentam um elevado crescimento, à medida que o teor de carbono do banho decresce.

5.10 Processo de Metalurgia de Peneira Primária - A Desoxidação

O oxigênio incorporado ao aço durante o refino no conversor, precisa ser retirado para evitar a evolução violenta de gás (CO) no lingotamento e a precipitação dos óxidos de ferro e manganês, durante a solidificação, que fragilizariam o aço.

A desoxidação é feita normalmente pela adição de elementos com maior afinidade pelo oxigênio que o carbono, principalmente alumínio.

O alumínio é adicionado na peneira de aço, durante o vazamento, em quantidades que dependem basicamente do nível de oxidação e tipo de aço. (MATOS et al., 1983).¹⁴

5.11 Pré-Tratamento do Gusa

O pré-tratamento de gusa tem sido utilizado para melhorar o método de refino primário no conversor e reduzir o seu custo.

Para melhorar a produtividade e a qualidade dos produtos, o pré-tratamento de gusa, consistindo de dessiliciação no canal de corrida e desfosforação e dessulfuração no carro torpedo, foi introduzido na usina de Mizushima, da Kawasaki Steel (Japão), em março de 1985.

Operacionalmente, o carro torpedo tornou-se um vaso de refino necessitando de mudanças no material refratário de seu revestimento.

5.11.1 Dessiliciação do gusa líquido

A crescente demanda por composição química exata e limpeza dos aços despertou várias inovações na tecnologia de aciaria, bem como deu origem a processos intermediários entre o Alto-Forno e a Aciaria denominados Pré-Refino do Gusa ou Pré-Tratamento do Gusa.

A dessiliciação pode ser realizada na calha de corrida do alto-forno ou em carros torpedo ou panela de gusa, com a simples adição de reagente ou pela injeção de reagentes com um condutor de gás como o nitrogênio dentro da panela.

Uma redução no conteúdo de silício no gusa proporciona um menor custo na fabricação do aço na Aciaria, além de melhorar sua qualidade. Por essa razão, uma nova tecnologia operacional, para obtenção de um baixo conteúdo de silício no gusa, foi desenvolvida bem como, um processo de pré-tratamento de gusa. Como uma destas tecnologias operacionais do baixo silício, o processo de injeção de fundente através das ventaneiras foi testado em algumas usinas no Japão.

5.11.2 Desfosforação do gusa líquido

O processo de desfosforação do gusa líquido foi desenvolvido não só para a produção de aços com teor extra-baixo de fósforo mas, também, para a redução do custo total de refino no processo siderúrgico.

No entanto, é essencial minimizar o custo do pré-tratamento do gusa líquido, através do desenvolvimento de um fundente barato e altamente eficiente.

Na maioria dos casos, o gusa produzido nas usinas não-integradas não passa por nenhum processo de refinamento adicional depois de sair do alto-forno. Portanto, a quantidade de alguns elementos não desejados presentes no gusa, como o fósforo, depende unicamente da qualidade das matérias-primas.

Na medida em que o processo de produção de gusa em alto-fornos não oferece condições termodinâmicas para a retenção de fósforo pela escória, toda a sua quantidade, entrando através de carvão vegetal e minérios de ferro, será alimentada ao gusa. A difícil disponibilidade de uma matéria-prima de alta qualidade, sem fósforo, atribui um valor de mercado cada vez maior ao gusa de baixo teor de fósforo.

5.11.3 Dessulfuração do gusa

Para redução do teor de enxofre, as usinas integradas utilizam estações de dessulfuração através da injeção de agentes químicos, à base de cálcio e magnésio em carros torpedo ou mesmo em panelas de gusa nas aciarias (Figura 5.25).

A maioria das usinas integradas utiliza esse pré-tratamento de gusa, pois o processo LD é de característica oxidante e não oferece condições termodinâmicas e cinéticas para remoção do enxofre.

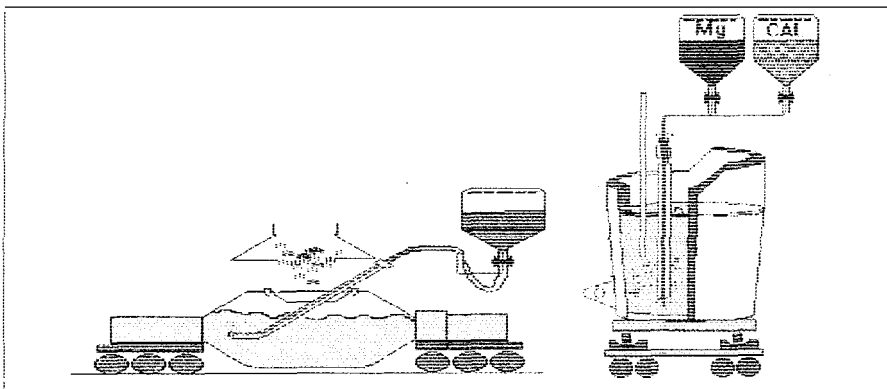


Figura 5.25 - Dessulfuração do gusa líquido em carro torpedo = sistema Kawasaki (à esquerda) e em panela de gusa (à direita) (COMPANHIA SIDERÚRGICA PAULISTA, 2006).⁷

REFERÊNCIAS

- 1 KOR, G. J. W. Effect of fluorspar and other fluxes on slag-metal equilibria involving phosphorus and sulfur. *Metallurgical Transactions B*, v. 8B, p. 107-113, Mar. 1977.
- 2 WAKELIN, D.H. (ed.). The pneumatic steelmaking processes. In: _____: *The making, shaping and treating of steel*. 8.ed. Pittsburgh: AISE Steel Foundation, 1964. Cap. 5, p. 444,
- 3 INSTITUTO BRASILEIRO DE SIDERURGIA. *Anuário Estatístico*. Rio de Janeiro, 1997.
- 4 KLÖCKNER & CO. *Stell glossary*. Disponível em: <http://www.kloeckner.de/metal_and_more/stahllexikon_en.html>. Acesso em: 9 out. 2006.
- 5 VOEST-ALPINE. *LD (BOF) steelmaking*. Disponível em: <http://www.vai.at/view.php3?r_id=709&LANG=EN&category=0&x=14&y=10>. Acesso em: 9 out. 2006.
- 6 KRANJC, A. Balanço material e térmico dos conversores a oxigênio. *Metalurgia*, v. 22, n. 137, p. 815-828, out. 1966.
- 7 COMPANHIA SIDERÚRGICA PAULISTA (COSIPA). *Aciaria Cosipa: quadro sinótico*. Disponível em: <Intranet Sistema Usiminas – Portal Cosipa – Fluxo da Produção – Quadro Sinótico>. Acesso em: 9 out. 2006.
- 8 CHAVES, C.A. *Coolants other than scrap in basic oxygen steelmaking*, 1976. Dissertação (Mestrado) – Universidade de Sheffield, Inglaterra. 1976. p. 7-9.
- 9 BARRETO, A.F.M. *Controle estático de fim de sopro do conversor LD*. 1981. 146p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica) – Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte. 1981. p. 1-8.
- 10 NIPPON STEEL CORPORATION. *Usina de Kimitsu: catálogo técnico*. [S.l.], 2001.
- 11 BERRY METAL COMPANY. *Catálogo técnico*. Disponível em: <<http://www.berrymetal.com/products/bof.htm>>. Acesso em: 09 out. 2006
- 12 PEHLKE, R. D. BOF steelmaking: introduction, theory and design. New York: AIME, 1975. v. 1, pt. 1, p. 256-258

- 13 MUNDIM, M. J. Aciaria LD. In: CAMPOS, V.F. *Tecnologia de fabricação do aço líquido*. 3.ed. Belo Horizonte : Universidade Federal de Minas Gerais, 1985. v. 2, p. 218-219.
- 14 MATOS, M.; CARVALHO, J.L.R.; ETRUSCO, G.; ANDRADE, S.L.; RAMOS, H.N.O. Metalurgia da caçamba. In: CAMPOS, V.F. *Tecnologia de fabricação do aço líquido*. 2.ed. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais, 1983. v. 4, p. 140-153.

BIBLIOGRAFIA

- 1 ANDRADE, S. L. *Análise da desfosforação no refino LD*. 1979. 67p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica) – Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 1979.
- 2 VALENTINI, R.; COLLA, V.; VANNUCCI, M. Neural predictor of the end point in a converter. *Revista de Metalurgia*, v. 40, n. 6, p. 416-419, nov./dez. 2004.
- 3 MCDONALD, C.; KOOPMANS, P.; DRUGGE, J.; VATANEN, J.; LUOMALA, M. Consistent basic oxygen steelmaking performance. *Revue de Métallurgie*, v. 101, n. 4, p. 275-284, abr. 2004.
- 4 KATO, Y., OKUDA, H. Reaction model for carbon, manganese, and oxygen in bottom blowing with mixed gas in final stage of steel refining in converter *ISIJ International*, v. 43, n. 11, p. 1710-1714, Nov. 2003.
- 5 STAUDINGER, G.; MULLER, J. Design aspects of an ideal oxygen steelmaking converter. *Iron & Steel Technology*, v. 1, n. 1, p. 45-51, Jan. 2004.
- 6 ZHI-GANG, H. A dynamic off-gas model on a 150t BOF. *Steel Times International*, v. 27, n. 3, p. 11-12, Apr./May 2003.
- 7 LUOMALA, M.J.; FABRITIUS, T.M.J.; VIRTANEN, E.O.; SIIVOLA, T.P.; HARKKI, J.J. Splashing and spitting behaviour in the combined blown steelmaking converter. *ISIJ International*, v. 42, n. 9, p. 944-949, 2002.
- 8 OGAWA, Y.; YANO, M.; KITAMURA, S.; HIRATA, H. Development of the continuous dephosphorization and decarburization process using BOF. *Steel Research*, v. 74, n. 2, p. 70-76, Feb. 2003.

- 9 LIU, C.-J.; ZHU, Y.-X.; JIANG, M.-F. Physical modelling of slag splashing in converter. *Ironmaking & Steelmaking*, v. 30, n. 1, p. 36-42, Feb. 2003.
- 10 WALLNER, F.; FRITZ, E. Fifty years of oxygen converter steelmaking. *Metallurgical Plant and Technology*, v. 25, n. 6, p. 38-43, Dec. 2002.
- 11 KIMURA, M.; NAKAJIMA, S.; MIMURA, T. Hot metal pretreatment utilizing recycled slag and dust at the Kakogawa Works. *Kobe Steel Technology Review*, n. 24, p. 21-25, Oct. 2001.
- 12 FABRITIUS, T.M.J.; MURE, P.T.; KUPARI, P.A.; JUNTUNEN, V.A.; HÄRKKÖ, J.J. Combined blowing with three-hole lance in a sidewall blowing converter. *Steel Research*, v. 72, n. 7, p. 237-244, July 2001.
- 13 LEE, T.; LEE, S. Improvement of converter operation at Daejeon No. 1 BOF shop; by applying a variable blow pattern. *SEAS Quarterly*, v. 29, n. 4, p. 48-53, Oct. 2000.
- 14 SCHMIDT, H.-U.; OPITZ, A.; MÜLLER, J.; PIRKBAUER, W. Experience with an offgas analysis system for process control in the LD converter. *Metallurgical Plant and Technology*, n. 5, p. 60-62, 65-67, Oct. 2000.
- 15 AMELING, D. New developments in integrated steelmaking in Europe. *MPT - Metallurgical Plant and Technology*, n. 6, p. 36-38, 40-42, Dec. 2000.
- 16 STONE, J.K. The origins of modern oxygen steelmaking. *Steel Times International*, v. 228, n. 9, p. 328-330, Sept. 2000.
- 17 MUELLER, H.; KLEIN, C.; SMITH, T. Converting VAS Donawitz to compact LD/BOF steelmaking. *Steel Times International*, v. 228, n. 9, p. 324-326, Sept. 2000.
- 18 JUNG, S.-M.; FRUEHAN, R.J. Foaming characteristics of BOF slags. *ISIJ International*, v. 40, n. 4, p. 348-356, 2000.
- 19 JONSSON, L.; ANDERSSON, A.M.T. Mathematical modelling of metallurgical processes. *Nordic Steel & Mining Review*, n. 3, p. 118-119, 1999.
- 20 NAITO, K.; OGAWA, Y.; INOMOTO, T.; KITAMURA, S.; YANO, M. Characteristics of jets from top-blown lance in converter. *ISIJ International*, v. 40, n. 1, p. 23-30, 2000.
- 21 ZAHORSZKI, F.; SPECHT, V. Slag detection by means of infrared technology. *Metallurgical Plant and Technology*, n. 1, p. 46-47, Feb. 2000.

- 22 YAMAMOTO, T.; UJISAWA, Y.; ISHIDA, H.; TAKATANI, K. Operation and design of scrap melting process of the packed bed type. *ISIJ International*, v. 39, n. 7, p. 705-714, 1999.
- 23 SORIMACHI, K. Recent activities in research of steelmaking. *Kawasaki Steel Technical Report*, n. 41, p. 11-15, Oct. 1999.
- 24 MAMDOUH, E. Parameters affecting manganese oxidation in top blown basic oxygen converter. *Steel Research*, v. 70, n. 1, p. 9-14, Jan. 1999.
- 25 OSHIMA, T.; NATSUMI, T.; KONDO, H. Reuse of LD converter slag as sinter feed. *Kawasaki Steel Giho*, v. 13, n. 4, p. 102-107, 1991.
- 26 AKINFIEV, V.I. Dephosphorization and desulphurization of metal in the converter using a pre-prepared molten slag. *Steel in the USSR*, v. 7, n. 1, p. 18-19, Jan. 1977.
- 27 SAKAMOTO, E. Decarburization control in an LD converter with a carbon and temperature determinator. *Ironmaking and Steelmaking*, v. 1, n. 2, p. 108-114, 1974.
- 28 TAKAWA, T.; MISAKA, Y.; TANIGUCHI, Y.; KATAYAMA, K.; TSUJIKAWA, H.; SAKURABA, K. Data analysis and mathematical model for LD converter process. *Transactions of the Iron and Steel Institute of Japan*, v. 20, n. 11, p. E-503, Nov. 1980.
- 29 NAGAI, I.; YAMOTO, T.; OHMORI, H.; TAKE, H.; TACHIBANA, R.; FUJIIYAMA, T. Dephosphorization of hot metal by lime base flux; development of top and bottom blowing converter-VI. *Transactions of the Iron and Steel Institute of Japan*, v. 21, n. 12, p. B-520, Dec. 1981.
- 30 TSUJINO, R.; MUKAI, T.; HIRAI, M.; NAKAMURA, K. A consideration of the post combustion mechanism in LD converter: study of post combustion in LD converter II. *Transactions of the Iron and Steel Institute of Japan*, v. 25, n. 11, p. B-293, Nov. 1985.
- 31 DORR, W. Possibility of obtaining information from the waste gas measured at the LD converter for the control and conduct of the process. *Stahl und Eisen*, v. 94, n. 9, p. 381-386, 1974.
- 32 ZINCHENKO, S.D. Behavior of nitrogen in making and teeming low carbon converter steel. *Metallurgist*, v. 24, n. 1/2, p. 12-14, Jan./Feb. 1980.

- 33 HIROHAMA, S., et al. Application of optimal control theory to LD converter process control. *Nippon Steel Technical Report*, n. 27, p. 27-34, Oct. 1985.
- 34 PRISYAZHNYUK, I.V.; TSERKOVNITSKII, N.S.; SERDYUK, S.M.; BOGUSHEVSKII, V.S. Automated system for controlling oxygen converter process at Krivorozhstal Iron and Steel Combine. *Steel in the USSR*, v. 15, n. 10, p. 507-508, Oct. 1985.
- 35 SURGUCHEU, G.D.; CHUDOV, A.L.; KOSAREV, V.A.; MOSALOV, G.I. Mathematical modelling of the oxygen-blown converter process. *Steel in the USSR*, v. 4, n. 9, p. 704-707, Sept. 1974.
- 36 KOLGANOV, G.S.; TARUTANI, Y. Action of the jet of oxygen on a converter bath. *Stal'*, n. 7, p. 599-601, 1972.
- 37 TURKENICH, D.I.; ROMANOV, Y.A.; RAVDEL, A.M.; GESKIN, E.S.; TOL'SKII, A.A.; STAROV, R.V. Decarburization features in the first period of a converter heat. *Steel in the USSR*, v. 2, n. 1, p. 29-31, Jan. 1972.
- 38 BLINOV, K.A. et al. The decarburization of metal with intensive blowing of the converter bath with oxygen through lances of various types. *Stal'*, n. 4, p. 407-408, 1972.
- 39 LAPIN, V.V.; SOBKIN, S.I.; YUGOV, P.I.; IZBEMBETOV, B.D. Slag formation and the mineral composition of converter slags with the use of different fluxing additions. *Metallurgist*, v. 22, n. 12, p. 810-817, Dec. 1978.
- 40 YUGOV, P.I.; PAK, Y.A.; SHAKHPAZOV, E.K.; VOROZHTSOVA, E.M.; KOLGANOV, G.S.; IVASHINA, E.I. Technological principles of blowing metal in a converter. *Metallurgist*, v. 22, n. 7, p. 465-467, July 1978.
- 41 ASAI, S.; MUCHI, I. Theoretical analysis by the use of mathematical model in LD converter operation. *Transactions of the Iron and Steel Institute of Japan*, v. 10, n. 4, p. 250-263, July 1970.
- 42 ISO, H.; ARIMA, K.; KANEMOTO, M.; UEDA, Y.; YAMANE, H. Prediction and suppression of slopping in the converter. *Transactions of the Iron and Steel Institute of Japan*, v. 28, n. 5, p. 382-391, May 1988.

- 43 KATO, Y.; GROSJEAN, J.-C.; REBOUL, J.-P. Influence of lance design and operating variables on post combustion in the converter with secondary flow nozzles. *Transactions of the Iron and Steel Institute of Japan*, v. 28, n. 4, p. 288-296, Apr. 1988.
- 44 TAKAWA, T.; KATAYAMA, K.; KATOHI, K.; KURIBAYASHI, T. Analysis of converter process variables from exhaust gas. *Transactions of the Iron and Steel Institute of Japan*, v. 28, n. 1, p. 59-67, Jan. 1988.
- 45 HIRAI, M.; TSUJINO, R.; MUKAI, T.; HARADA, T.; OMONI, M. Mechanism of post combustion in the converter. *Transactions of the Iron and Steel Institute of Japan*, v. 27, n. 10, p. 805-813, Oct. 1987.
- 46 NAKATANI, M. Recent advances in converter steelmaking. *The Sumitomo Search*, n. 22, p. 12-30, Nov. 1979.
- 47 NARUSE, Y.; FUJIMOTO, S.; KAMADA, Y.; ABE, M. Results of investigation of mag-carbon bricks used in converter, *Taikabutsu Overseas*, v. 3, n. 2, p. 3-7, June 1983.
- 48 NOZAKI, T.; TAKEUCHI, S.; HAIDA, O.; EMI, T.; MORISHITA, H.; SUDO, F. Mechanism of hot metal dephosphorization by injection lime base fluxes with oxygen into bottom blown converter. *Transactions of the Iron and Steel Institute of Japan*, v. 23, n. 6, p. 513-521, June 1983.
- 49 YOSHIMURA, S.; KONDO, T. Study of hot-gunning materials in LD converter. *Kawasaki Rozai Giho*, n. 9, p. 64-70; 1975.
- 50 CHERTOV, A.O.; YUGOV, P.I. Aerodynamic characteristics of oxygen converter lances. *Steel in the USSR*, v. 13, n. 1, p. 11-13, Jan. 1983.
- 51 CHERNYATEVICH, A.G.; ZARQUIN, E.Y. Hot modelling of oxygen converter process. *Steel in the USSR*, v. 8, n. 4, p. 204-206, Apr. 1978.
- 52 BOGDANDY, L.V.; GRECK, H.G.; GROSSMANN, J.R.; SCHAFER, K.; SELENZ, H.-J.; TURNER, R.E. Oxygen converter steelmaking with high scrap rates. *Iron & Steelmaker*, v. 13, n. 8, p. 14-22; Aug. 1986.
- 53 PARSHIN, S.I.; MOKROVA, V.P.; ZHURAVLEV, V.M. Distribution of oxygen between metal and slags in converter steelmaking. *Steel in the USSR*, v. 12, n. 1, p. 8-10, Jan. 1982.
- 54 STAROV, R.V. Low slag converter practice. *Steel in the USSR*, v. 19, n. 5, p. 206-208, May 1989.

- 55 KOROTKOV, A.P.; KREST'YANINOV, V.F.; GAVRILIN, E.F.; KRAVTSOV, N.F.; GALYAMOV, R.N. Automatic control of lance position in converter. *Steel in the USSR*, v. 11, n. 4, p. 209-211, Apr. 1981.
- 56 MIYAGAWA, Y.; HOSHI, F.; FUJII, K.; KATASE, D.; HIRAGUSHI, K.; YAMAMOTO, H; Improvement of MgO-C lining in BOF converter. *Taikabutsu Overseas*, v. 6, n. 1, p. 16-21, Mar. 1986.
- 57 CHEMERIS, O.N. Oxygen converter steelmaking with high scrap rates. Effectiveness of flame gunning converter lining. *Metallurgist*, v. 23, n. 11/12, p. 782-784, Nov./Dec. 1979.
- 58 CHAPELIER, P. Temperature control from converter to slab caster at Sollac Florance. *Revue de Metallurgie*, v. 86, n. 9, p. 687-696, Sept. 1989.
- 59 RECOVERING converter waste gas for economy and pollution control. *Steel Times*, v. 217, n. 5, p. 235, 238, May 1989.
- 60 CONVERTER design to maximize gas recovery. *Steel Times*, v. 210, n. 7, p. 322, 364, July 1991.
- 61 KATO, Y.; NAKANISHI, K.; NOZAKI, T.; SUZUKU, K.-I.; EMI, T. Wave motion of metal bath in bottom blowing converter. *Transactions of the Iron and Steel Institute of Japan*, v. 25, n. 6, p. 459-466, June 1985.
- 62 GENMA, N.; SOEJIMA, T.; KOBAYASHI, J.; MATSUMOTO, H.; MATSUI, H.; FUJIMOTO, H. Application of CO as bottom stirring gas in combined blow converter. *Transactions of the Iron and Steel Institute of Japan*, v. 27, n. 3, p. 185-189, 1987.
- 63 BAPTIZMANSKII, V.I. Technological and theoretical problems of modern converter steelmaking. *Steel in the USSR*, v. 9, p. 383-387, Sept. 1989.
- 64 KOJIMA, S.; IWATANI, T.; YOSHIDA, M.; HIROSE, M.. Vibration of a combined blowing converter. *Iron and Steel Engineer*, v. 64, n. 4, p. 25-30, Apr. 1987.
- 65 MINAEV, Y.A. Mechanism of slag erosion of converter linings. *Steel in the USSR*, v. 20, n. 4, p. 170-173, Apr. 1990.
- 66 NEDAR, L. Dust formation in a BOF converter. *Steel Research*, v. 67, n. 8, p. 320-327, Aug. 1996.

- 67 KLINGELHOFER, H.; REERING, J.G.; HOFFMANN, K. Improving the converter process by use of a substance. *Iron & Steel International*, p. 17-19, 1995.
- 68 EGUCHI, T.; ICHIYAMA, H.; YOSHIMURA, T.; KURODA, K.; KOGA, M. Properties of CaO rich grinding material for converter *Taikabutsu Overseas*, v. 2, n. 2, p. 44-46, June 1991.
- 69 KURATA, K.; MATSUI, T.; KONO, K. Oxidizing prevention of MgO-C bricks for converter *Taikabutsu Overseas*, v. 2, n. 2, p. 17-22, June 1991.

Fabricação de Aço em Fornos Elétricos a Arco

6.1 Alguns Aspectos sobre Fornos Elétricos a Arco

Capítulo 06

6.1.1 Histórico

A primeira notícia que se tem sobre o uso da energia elétrica na fabricação de aço data de 1878, quando W. Von Siemens patenteou um forno a arco indireto constituído de 2 eletrodos dispostos horizontalmente, através da parede de um cadinho. Os eletrodos formavam arco sobre a carga, aquecendo por irradiação. Em 1899, Heroult patenteou o forno elétrico de arco direto e, em 1909, surgiu o forno elétrico trifásico com carcaça com formato circular, que é aquele utilizado até os nossos dias. Desde então, o forno elétrico tem uma participação crescente entre os processos de fabricação de aço.

César Alves S. Leandro

No início, os fornos elétricos empregavam eletrodo de carbono amorfo e sem emendas. Em razão das dificuldades encontradas, desenvolveram-se os eletrodos com soquetes rosqueados, para que pudessem ser emendados. O primeiro eletrodo de grafite apareceu em 1920.

6.1.2 Crescimento do forno a arco na Siderurgia

A produção de aço via Aciaria Elétrica iniciou-se nos anos 40 e tornou-se cada vez mais popular (GOODWILL, 1991).¹ Inicialmente, a rota forno elétrico a arco (FEA) era principalmente empregada para a produção de produtos longos, devido ao maior teor de resíduos na sucata carregada e a outras características, tais como, longo *tap to tap* (tempo de corrida), menor porte de corrida etc. O desenvolvimento tecnológico fez que o FEA, em um período relativamente curto, se tornasse uma unidade de fusão em larga escala, rápida e econômica para o qual o advento da tecnologia de lingotamento em placas finas abriu o mercado de produtos planos.

Com a disponibilidade de se substituir a sucata de aço por ferro diretamente reduzido (DRI), chamado HBI em sua forma briquetada, ou ferro-gusa, viabilizou-se a rota no FEA, mesmo para produtos planos de alta qualidade e, dessa maneira, tornou-se um desafio real à rota pelo processo a oxigênio de produção de aço.

6.1.3 Produção via forno elétrico a arco

O aço produzido no FEA oferece várias vantagens a serem consideradas, quando se comparam as rotas dos processos e quando se procuram motivos para o percentual crescente desta alternativa da produção e aço.

Alguns aspectos importantes são:

- Maior quantidade de sucata pode ser reciclada em FEA, que é muito importante quando se leva em conta o excedente em sucata;
- A emissão de CO_2 é quatro vezes menor, mesmo quando se carregam 30% do metal quente;
- Quantidades elevadas de DRI e outros substitutos de sucata somente podem ser consumidos no FEA;
- Dependendo do preço da energia elétrica e devido aos custos de investimentos menores, o aço poderá ser produzido mais economicamente.

Originariamente, o FEA era simplesmente uma unidade de fusão para reciclar sucata de aço. Hoje devido a numerosas modificações, ele está se tornando um reator elétrico e químico combinado. Muitos esforços têm sido feitos, a fim de se minimizar o consumo de energia elétrica, diminuir o consumo de eletrodos e reduzir o *tap to rise*, ~.

Um grande passo para se reduzir o consumo de grafite, foi dado com a introdução do DC (fornos de corrente contínua). Redução do tempo *tap to tap* e menor consumo de energia foram conseguidos com a utilização de maçaricos e lanças supersônicas. A utilização de escória espumante, com a obseivação dos conversores LD, trouxe grande avanço à redução do consumo de energia elétrica e rendimento metálico.

O teor da ganga entrando no forno, quando se carrega DRI, também é responsável pela elevada demanda de energia; instalações de carregamento a

quente têm sido desenvolvidas para que a produção de aço com DRI seja mais econômica. Com a substituição por ferro-gusa, melhorou muito o desempenho dos fornos elétricos.

6.2 Componentes dos Fornos Elétricos a Arco

6.2.1 A carcaça

A carcaça é uma estrutura cilíndrica, com fundo abaulado, onde duas aberturas se destacam. Uma delas é a bica de vazamento, por onde sairá o metal em estado líquido de dentro do forno, e a outra é a porta de escória, por onde se realizam adições de matérias-primas, retira-se escória, injeta-se oxigênio, verifica-se temperatura, e outros. A Figura 4.1 traz um croqui de um forno elétrico simples.

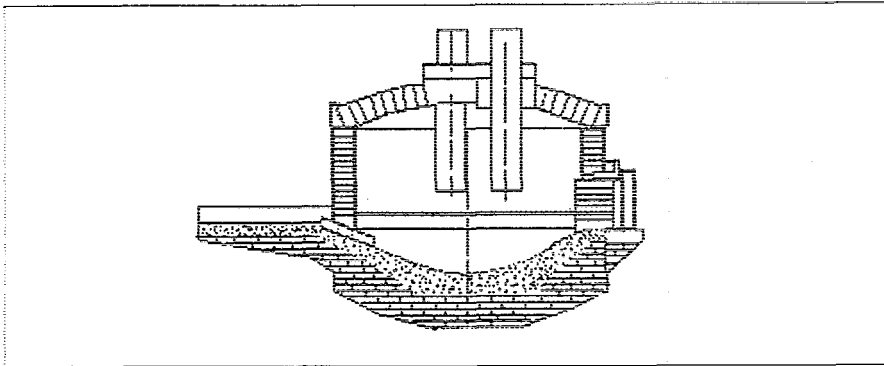


FIGURA 6.1 – Esquema de um forno elétrico simples (GIL, 1980).²

6.2.2 Abóbada

A abóbada pode ser tanto de tijolos refratários como de painéis refrigerados. A abertura da abóbada é necessária para permitir o carregamento. O movimento da abóbada se dá através de um cilindro hidráulico com o auxílio de uma estrutura giratória, que é constituída, basicamente, de duas bicas montadas sobre o forno. A abóbada fica suspensa nessa estrutura giratória e seus movimentos estão a ela condicionados.

6.2.3 Sistema de basculamento

Esse movimento do forno é necessário para permitir as operações de vazamento do metal líquido e retirada de escória. O conjunto pode ser basculado no sentido da bica de vazamento, para transferir sua carga líquida para panela. Os ângulos nesta operação são de 0 graus a 45 graus, enquanto para retirada da escória o basculamento se dá no sentido oposto, dentro de ângulos que variam de 0 graus a 15 graus. A Figura 6.2 apresenta um esquema das inclinações do forno

O movimento do forno, tanto no sentido de basculamento quanto no sentido oposto, dá-se através de dois cilindros hidráulicos dispostos na parte posterior do forno. A estrutura que permite o movimento do conjunto é constituída de dois suportes com formato de um semicírculo chamado berço, que está apoiado sobre os trilhos montados sobre bases de concreto.

Na operação de abertura da abóboda, o forno deverá estar na posição horizontal e travado, isto porque os cilindros de basculamento não suportam o peso do forno com a abóboda aberta. Mastro, garras e braços, são estruturas cuja função é sustentar e movimentar os eletrodos. O mastro ou coluna é responsável pelo movimento de subida e descida dos eletrodos; cada fase tem seu movimento independente uma da outra.

Os braços ou porta-eletrodos são acoplados no topo das colunas do mastro. Cada braço, com formato de tubo, sustenta dois cabos de alta corrente, e C fabricado em cobre eletrolítico. Os braços são isolados eletricamente das garras dos eletrodos e mastro.

As garras ou morsas estão localizadas na extremidade de cada braço. Os eletrodos são colocados verticalmente no interior dessa garra onde são presos através de um sistema de molas acionadas por dispositivo hidráulico. Normalmente, os braços e garras são refrigerados a água, para suportar o elevado calor existente sobre a abóboda do forno.

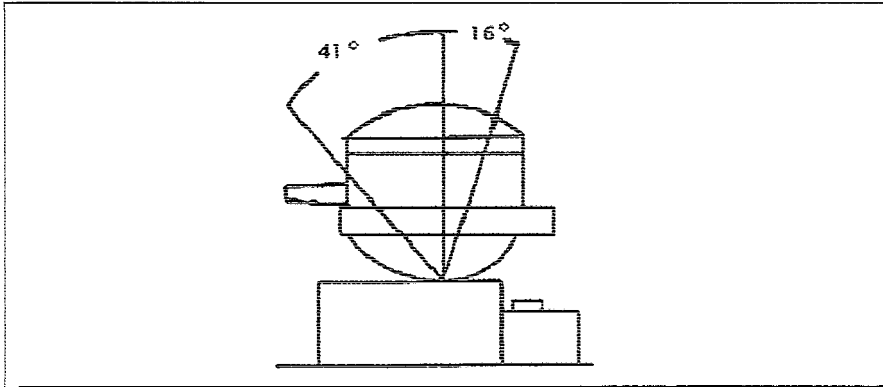


FIGURA 6.2 – Inclinação para basculamento do forno para frente e para trás.

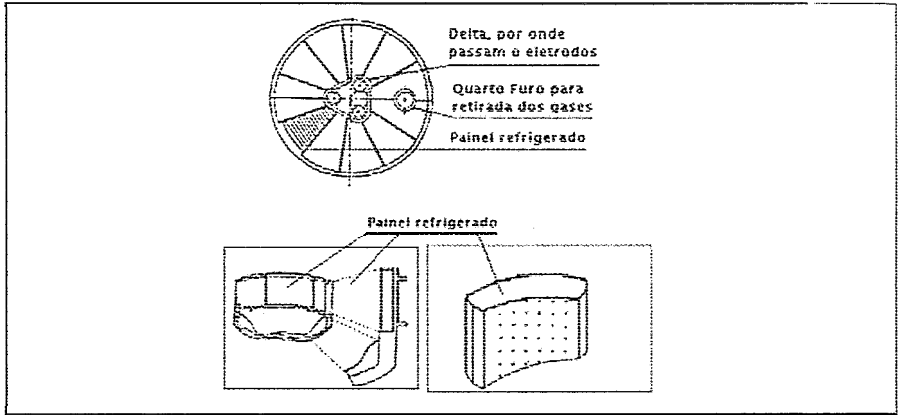
6.2.4 Painéis refrigerados

Os painéis refrigerados apareceram com os fornos de alta potência, porque se tornou necessário o desenvolvimento de um revestimento que suportasse os severos efeitos da radiação sobre os refratários. O desenvolvimento de painéis refrigerados a água, instalados nas laterais dos fornos elétricos a arco, resolveu, em grande parte, o consumo excessivo de refratários.

Os painéis podem cobrir mais de 70% da superfície lateral dos fornos. O emprego de abóbada refrigerada tem se expandido tanto no Brasil como no exterior. Como no caso dos painéis refrigerados, toda a área da abóbada, com exceção da região central, que contém os furos para passagem dos eletrodos de grafita, é refrigerada a água. Vale a pena ressaltar que 85% da área revestida com refratários em uma abóbada convencional é substituída por elementos refrigerados a água. Somente a área que contém os eletrodos é revestida de refratários, para evitar curto-circuito entre os eletrodos.

A Figura 6.3 apresenta um croqui do painel utilizado nas abóbadas e nas paredes de um forno elétrico a arco.

FIGURA 6.3 – Painel da abóbada e das paredes



6.2.5 Transformadores e eletrodos

Os transformadores dos fornos elétricos a arco vêm aumentando de potência com o aumento da produtividade e tecnologia. São projetados para operar em condições mais rigorosas do que aquelas utilizadas em outras aplicações, devido principalmente aos elevados esforços mecânicos decorrentes do início de fusão da carga metálica. Além disso, esses transformadores estão sujeitos a comutações de *taps*, por necessidade do processo. Esta mudança de *taps* acontece no transformador do forno.

Operador muda a potência de operação do forno através da comutação de *tap*. A mudança de *taps* do transformador é feita através do sistema de comutação sob carga, que permite que a mudança de *taps* seja feita com o forno em operação. Esse sistema minimiza os tempos mortos, aumenta a produtividade do forno e reduz o consumo específico de energia e outros.

O consumo dos eletrodos em operação é causado pelos seguintes fatores:

- *Erosão* - causada pela projeção de metal nos eletrodos, provocada pelas forças eletromagnéticas geradas pela alta corrente nos eletrodos.
- *Sublimação* - a temperatura de sublimação (passagem do estado sólido para gasoso) do carbono é da ordem de 3.800°C , que pode ser atingida na região do arco elétrico, o que faz que o consumo de grafita seja inevitável.
- *Oxidação* - a grafita começa a oxidar-se à temperatura da ordem de 400°C , e o consumo por oxidação aumenta à medida que a temperatura se eleva.

Outro ponto de desgaste, também, é através de oxigênio utilizado incorretamente pelos operadores.

- *Quebras* - decorrentes de trincas oriundas da fabricação do eletrodo.

Os eletrodos começam a sofrer um desgaste em direção às suas pontas, que estão mais próximas do banho metálico, onde as temperaturas são mais elevadas. O conteúdo de oxigênio normalmente presente na atmosfera do forno é inferior àquele no ar atmosférico. Todavia, ele é introduzido no forno da seguinte maneira: ar que entra através da porta de escória, regiões com vedação inadequada e sistema de exaustão, e pode ocorrer a geração de caminhos preferenciais dentro do forno ocasionando desgaste por oxidação mais acentuado em determinados pontos da coluna de eletrodos, que estejam mais próximos desta corrente gasosa.

As quebras, normalmente, estão relacionadas à má preparação da carga, falhas elétricas ou mecânicas do forno; falha no manuseio dos eletrodos; e outros problemas operacionais.

Um dos fatores que mais influencia o desempenho do forno elétrico a arco é o tipo de carga com a qual é alimentado e a maneira como está distribuída em seu interior. A sucata pesada de grande dimensão pode causar obstrução ao fechamento da abóbada, danos no refratário, painéis refrigerados; o tombamento de uma peça pesada durante o período de fusão pode causar a quebra de eletrodos.

Por outro lado, o uso de sucata leve conduz a um rendimento metálico mais baixo; como sua densidade é baixa, carrega-se normalmente um número maior de cestões, resultando em maior número de aberturas da abóbada e maior perda de energia.

6.2.6 Sistema hidráulico dos fornos

Pode-se considerar que o sistema hidráulico é basicamente o coração dos fornos elétricos. É através desse sistema que se consegue alterar a regulagem do comprimento do arco entre os eletrodos e o metal líquido, portanto, controlar o consumo de energia elétrica e de eletrodo. O sistema, através de um PLC, lê a corrente e a voltagem e, com isso, monitora o comprimento do arco. Por exemplo, no início da fusão, logo após a formação

do arco, este apresenta um valor de voltagem e amperagem para aquele determinado comprimento de arco. Devido à irradiação de calor a partir do arco, o metal a seu redor funde-se, aumentando a distância entre o eletrodo e a carga, ou seja, elevando o tamanho do arco e, com isso, os valores de corrente e tensão alteram-se. Esses valores de tensão e corrente são lidos por um PLC, que por sua vez, corrige o tamanho do arco, através do sistema hidráulico, movimentando os eletrodos a fim de encurtar sua distância com a carga. Desse modo os valores de tensão e corrente sempre ficam dentro de uma condição de trabalho preestabelecida. Dessa forma, o eletrodo aprofunda-se mais na carga, chegando próximo da soleira. A partir desse ponto, o arco forma-se sobre o metal líquido já derretido, iniciando-se a subida dos eletrodos até que toda a carga esteja fundida.

6.3 Custos Relativos na Operação dos Fornos Elétricos a Arco

A Tabela 6.1 mostra os custos relativos da fabricação de aço em fornos elétricos a arco, mostrando a importância da conservação de energia elétrica, para viabilizar e dar continuidade ao desenvolvimento desse processo de fabricação de aço.

TABELA 6.1 - Custos relativos na operação de um forno elétrico a arco

PARÂMETROS	CUSTO (%)	FAIXA (%)
Carga do Forno	71	60 - 80
Eleticidade	14,2	09 - 19
Eletrodos	11,3	07 - 16
Mão-de-obra	2,1	-
Refratários	1,4	-

6.4 Ciclo de Operação de um Forno Elétrico a Arco

Primeiro Carregamento - É realizado com a abóbada totalmente aberta para permitir que o primeiro cestão de sucata seja posicionado exatamente sobre o forno. Os cestões podem ser de fundo bipartido ou tipo casca de laranja.

O forno é então ligado, iniciando a perfuração da carga. Abre-se o arco entre os eletrodos e a carga metálica, furando a carga metálica até o fundo, formando então a primeira poça de aço líquido. Continuamente, essa poça de aço é aumentada até que a maior parte de carga metálica seja derretida.

Segundo Carregamento - Ainda com alguma sucata dentro do forno, faz-se o segundo carregamento e dá-se prosseguimento ao término da fusão. Quando a sucata estiver toda derretida com temperatura do aço líquido por volta de 1.570°C , inicia-se o período de refino. Conhece-se por refino o trabalho com o aço líquido onde se objetiva a limpeza do aço em termos de inclusões e o acerto de composição química, com remoção parcial das impurezas; esse período é acompanhado pela elevação de temperatura no forno e formação de escórias que ajudam a proteger o forno contra a radiação térmica. Essas escórias também colaboram na limpeza e purificação do aço.

Terceiro Carregamento - Neste estágio as reações exotérmicas com o oxigênio provocam energia excessiva, e o superaquecimento do banho é evitado pela adição de agentes refrigerantes. A lanca após a descarburacão é substituída pelos eletrodos, sendo a partir desse instante possível adicionar todos os elementos sólidos necessários para se chegar ao peso da corrida. No processamento da corrida, quando a temperatura estiver ajustada, o metal é vazado na panela previamente preparada

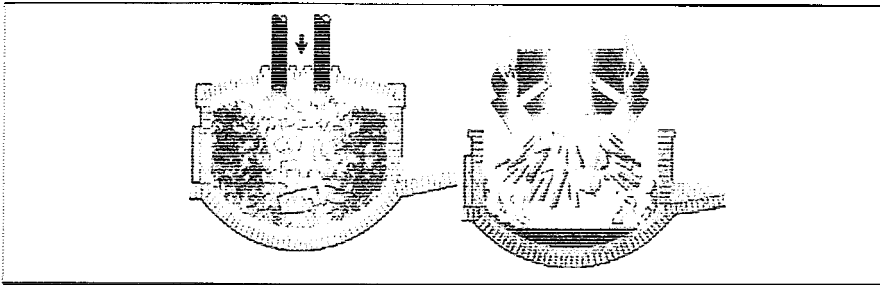


FIGURA 6.4a – Carregamento do forno e formação do primeiro arco (UCAR CARBON COMPANY, 2001).³

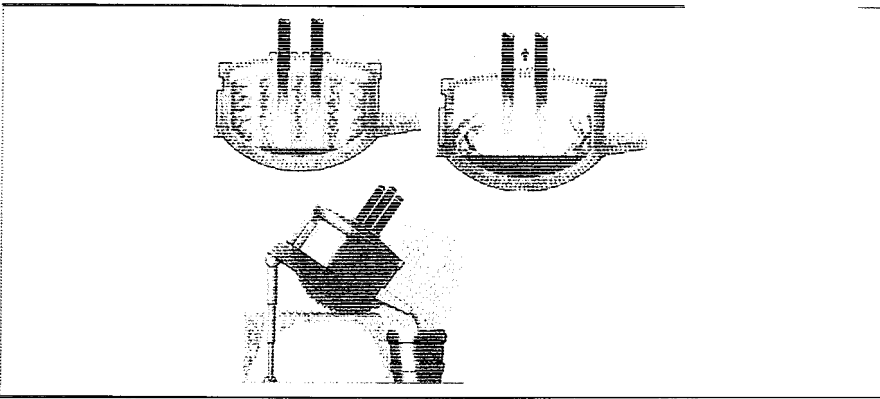


FIGURA 6.4b – Fusão total da carga e vazamento do forno elétrico a arco (UCAR CARBON COMPANY, 2001).³

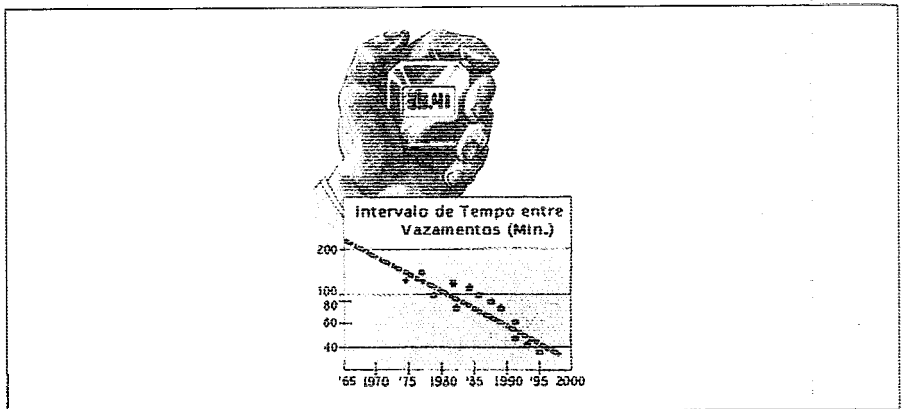
6.5 Produtividade

6.5.1 Principais fatores que afetam a produtividade

Sabe-se que a produtividade está intimamente ligada com redução de custos, portanto para aumentar a produtividade os pontos mais importantes são:

- Reduzir o tempo de *power on*;
- Reduzir o tempo de *power off*.
- Para reduzir o tempo de *power on* há necessidade de aumentar efetivamente a quantidade de energia elétrica em MW ou a energia química. O gráfico da Figura 6.5 mostra a evolução na redução do tempo de *tap to tap* através dos anos, ou seja, redução do *power on*. Uma das maneiras de aumentar a energia é aumentar o arco voltaico dos eletrodos pelo aumento da tensão de *tap* do transformador.

FIGURA 6.5 – Evolução do *tap to tap* ao longo dos últimos anos (GIL, 1980)²



Quanto mais alto for a reatância, melhor a efetividade do fator de potência, para trabalhar dentro de limites estáveis. Se o fator de potência torna-se muito alto, então, a operação elétrica torna-se instável durante a fusão da sucata. A grande vantagem da estabilidade elétrica é aumentar a reatância e diminuir o fator de potência. Se o forno tem baixa reatância (MADUELL e BOWMAN, 1992),⁴ somente é possível obter-se arco longo com fator de potência alto, e com isso aumenta a instabilidade do arco, conforme mostra a Figura 6.6. Assim, com potência alta tem-se melhor aproveitamento da energia.

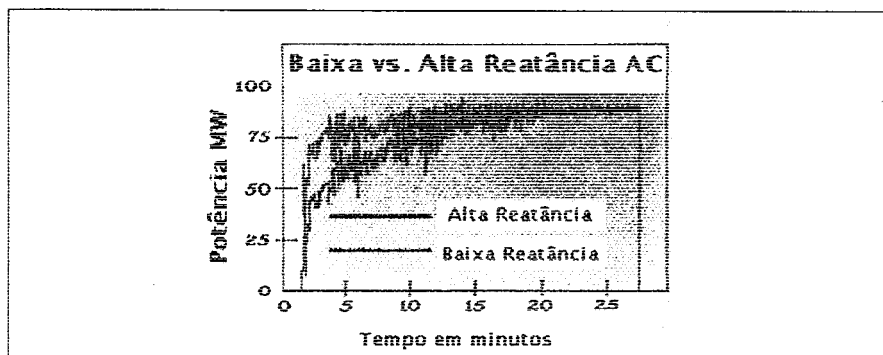


FIGURA 6.6 – Instabilidade do arco para fornos com baixas reatâncias (GIL, 1980).²

Para a redução do *power off* ou seja, a redução dos tempos de reparo e carregamentos dos fornos, é melhor se ter duas carcaças. A seguir, faz-se um resumo sobre as diversas potências envolvidas no processo em fornos elétricos:

- *Potência Aparente* – É a potência que entra no sistema, expressa em mil – volt – ampere (kVA) ou milhão – volt – ampere (MVA). Encontra-se a potência aparente através da seguinte fórmula, levando em consideração as três fases.

$$MVA = \frac{E.I. \sqrt{3}}{1.000.000} \quad (6.1)$$

$$kVA = \frac{E.I. \sqrt{3}}{1.000} \quad (6.2)$$

E = Voltagem na fase (V); I = **Corrente** (A)

- *Potência Reativa* – É a potência que não é utilizada, perde-se no sistema elétrico, expressa em mil volt ampere reativo (kVAR) ou milhão volt ampere reativo (MVAR).
- *Fator de Potência* – É a relação entre a potência ativa e a potência aparente, observe a Figura 6.7 (triângulo de potências)

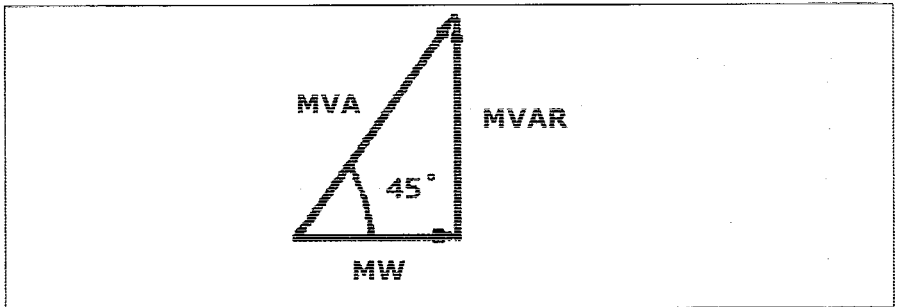
$$FP = \frac{kW}{kVA} \quad (6.3)$$

$$FP = \frac{MW}{MVA} \quad (6.4)$$

- *Potência Ativa* – É a potência utilizada efetivamente no circuito, expressa em kW ou MW.

$$MW = MVA.(FP) = kVA = \frac{E.I.\sqrt{3}}{1.000} \quad (6.5)$$

FIGURA 6.7 – Triângulo de potências.



As curvas de potência do forno a arco mostram um entendimento melhor do sistema elétrico. Nota-se pela Figura 6.8 que a potência real (MW) e a potência reativa (MVAR) aumentam com aumento da corrente em (kA) e que o FP (Fator de Potência) e V_a (Voltagem no Arco) decrescem com a corrente. Existe um ponto onde se encontram as curvas MW e MVAR e, a partir desse ponto, MVAR continua a subir e MW decresce. Portanto, nesse ponto, encontra-se o máximo de potência para trabalho. Mas, na prática, o melhor rendimento do forno é em função de outros fatores, tais como:

- Características totais de potência no circuito;
- Comprimento do Arco;
- Tipo de Carga; e
- Estágio do processo de fusão.

Um ponto muito importante aqui é a ocorrência de arco longo. Arco longo ocorre quando a diferença de potencial ou voltagem no arco é alta e a corrente é baixa: pode-se fazer uma comparação dizendo que a $d\vec{d}p$ é a força motriz para que os elétrons pulem da ponta do eletrodo para a carga metálica,

fazendo que o ar seia condutor, propiciando um ambiente de plasma (quarto estado da matéria, formado pela ionização de nitrogênio e oxigênio do ar).

Mas, se se trabalha com arco longo, a radiação de calor aumenta, ocasionando uma situação de grande exposição à erosão dos refratários da linha de escória e abóbada dos fornos. Recomenda-se, portanto, a utilização desse tipo de arco apenas na fusão, mediante a utilização de escória espumante para proteger os refratários circunvizinhos. Para o período de refino, o arco recomendado é o curto, conforme Figura 6.8. Uma consequência direta da prática de arco longo é a diminuição no consumo de energia (por consumir menos corrente) e decréscimo no consumo de eletrodo, pela mesma razão.

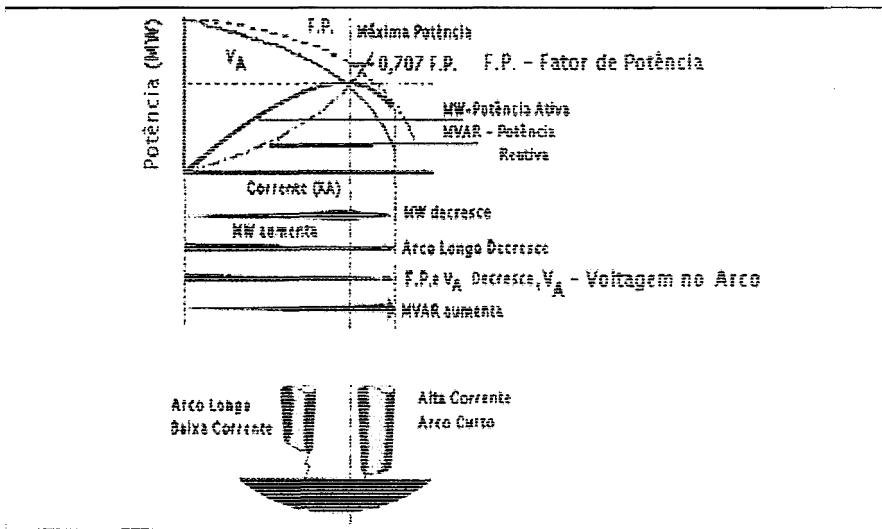


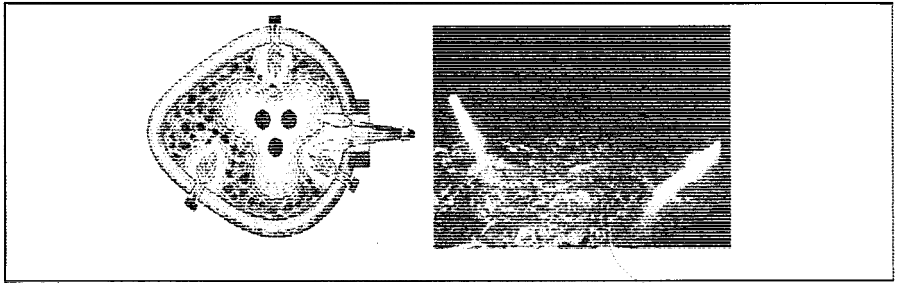
FIGURA 6.8 – Diagrama de potência do forno elétrico (acima) e diferença física entre arco longo e curto (embaixo) (GIL, 1980).²

6.5.2 Energia química

O aumento da energia química se consegue através da injeção de oxigênio no período de fusão e refino ou, também, através de macaricos com utilização de gás natural, direcionados nos pontos frios no interior do forno, entre os eletrodos. O mais usual são lanças supersônicas que utilizam, no período de fusão, gás natural; e quando a sucata já estiver derretida, as lanças passam a injetar apenas oxigênio. Juntamente com as lanças, também, é injetado carbono em pó para auxiliar na exotermia. Com essas lanças supersônicas, deixa-se de utilizar as lanças manuais ou os manipuladores de lanças automáticas. Figura 6.9.

Fabricação de Aço em fornos Elétricos a Arco

FIGURA 5.9 – A esquerda, esboço das lanças ao longo do forno e na porta de escória (UCAR CARBON COMPANY, 2001).³ À direita, fotografia de um sistema de lança no FEA (Cojet) da aciaria na Aços Viliares, Usina de Pindarnonhangaba

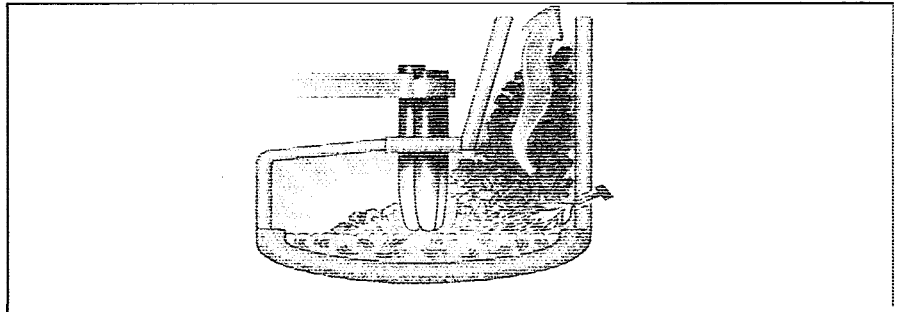


6.5.3 Redução no consumo de energia

Com o avanço do sistema de exaustão (IKETANI, 1994),⁵ devido às leis ambientais o consumo de energia e a perda térmica aumentaram. Para contornar esse problema, duas providências rem-se evidenciado:

- Carregamento de sucata aquecida, aproveitando os gases de exaustão (Figura 6.10);
- Aproveitamento da energia pós-combustão, que nada mais é do que queimar o CO para CO₂ no interior do forno (MARTHUR e al., 1994),⁶ aproveitando assim essa energia extra para aquecer a sucata ou o próprio aço (HUBER et al., 2006).⁷

FIGURA 6.10 – Um carregamento feito pelo sistema de sucção do forno. Mostra o aproveitamento do calor, através da transferência para aquecimento da carga (UCAR CARBON COMPANY, 2001).³



A Tabela 6.2 apresenta em ordem cronológica os principais avanços do forno elétrico até os dias atuais.

ANO	IMPLANTAÇÕES	CONSUMOS
1965		Tap to tap – 180 min. Energia – 630 kwh/ton Eletrodo – 6,5 kg/ton
1970	Lanças de Oxigênio	
1975	Painéis Refrigerados Conceito do Arco Longo Escória Espumante Controle por PLC Refino Secundário	
1980	Vazamento por baixo do Forno Queimadores Oxi-Combustível	
1983	EBT - Vazamento Excêntrico Preaquecimento de sucata	
1985	Transformadores UHP Manipuladores de Oxigênio e Carbono	
1990	Pós-Combustão Cojet	
1999		Tap to Tap – 45 min. Energia – 210 kwh/ton Eletrodo – 1,6 kg/ton

TABELA 6.2 – Cronologia de avanços no FEA (HOPPERDIZEL, 2006).⁸

6.6 Processo de Fabricação de Aço nos Fornos Elétricos

Toda corrida bem-sucedida nos fornos elétricos parte de uma carga bem feita. Isto porque o desempenho do forno quanto à fusão depende muito da densidade da carga e de sua resistência elétrica. Se algum material isolante estiver presente dificulta muito a fusão. Se o aço a ser elaborado possuir restrições quanto a residuais, tais como, Fósforo e Enxofre, a preparação da carga deve ser tal que contemple no final da fusão um teor bastante baixo desses elementos, para isso, é necessário uma quantidade de fundentes, tais como, CaO e fluorita bem balanceados. Para acelerar a fusão, a utilização de oxigênio é muito importante e, para isso, uma quantidade de carbono na forma de grafita é necessária nessa carga para que não ocorra superoxidação no período de fusão (HUBER et al., 2006).⁷

Assim, após retirar a primeira prova por volta de 1.560° C, esta será enviada para o laboratório químico. Antes dessa prova, se o aço a ser elaborado tiver especificação de fósforo baixo, um trabalho de escória deve ser realizado no final da fusão, ou seja, fluxar bem com oxigênio a escória que, por sua vez, deve possuir pelo menos 45% de CaO e 15% de FeO, e após esse trabalho a escória deve ser retirada o máximo possível. Em seguida, deve-se substituir a escória por uma nova a base de CaO, faz-se a carburação necessária e sopra-se oxigênio.

Antes de iniciar o sopro, podem-se ajustar elementos de liga que não são oxidáveis, como, por exemplo, níquel e molibdênio. É bem interessante comprovar esses elementos no aço, enviando uma nova prova em temperaturas mais elevadas, antes de realizar o ajuste, principalmente, se a quantidade adicionada na carga for muito grande, às vezes, esses elementos demoram a se dissolver durante o período de fusão.

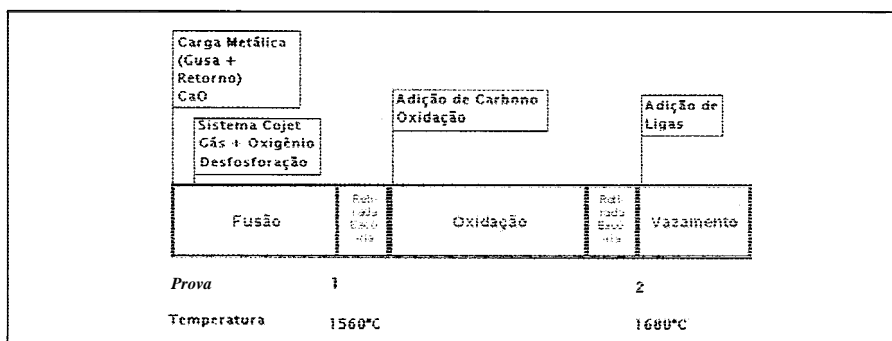
Após o sopro para o carbono desejado, envia-se uma prova para verificação da composição química. Confirmada a prova, imediatamente bloqueia-se com alumínio, inicia-se a retirada da escória, mede-se a temperatura e inicia-se o vazamento da corrida.

Uma vez o aço na panela, corrige-se a composição química e temperatura. Nesse estágio, o aço encontra-se pronto para ser lingotado.

Em casos de aciarias que não possuem forno panela, mas possuem desgaseificador, a temperatura de vazamento deve ser a mais alta possível e antes de fazer os ajustes finais de composição química, a panela é enviada para o desgaseificador por um período preestabelecido; somente, então, a composição química é corrigida, a temperatura é ajustada por borbulhamento de argônio e, então, enviada para o lingotamento.

No caso da existência de um forno panela, é muito importante entrar rápido e vaziar a corrida com poucos acertos da composição química, deixando-se para realizar os acertos no forno panela. A temperatura de vazamento do forno elétrico passa a ser menos importante, pois esse aquecimento será realizado no forno panela. Apenas o trabalho de desfosforação deve ser feito ainda dentro do forno elétrico, no qual se reúnem as condições termodinâmicas mais favoráveis para diminuição desse elemento químico.

FIGURA 6.1i – Esquema de fabricação no forno elétrico a arco.



6.7 Projetos de Fornos Elétricos de Alta Produtividade

- *EOF (Energy Optimize Furnace)* – Desenvolvido pelo grupo Korf na C.S. Pains, caracteriza-se pelo controle de alimentação de sucata, pelo sopro de oxigênio por ventaneiras submersas colocadas nas laterais da solcira, lanças supersônicas móveis nas laterais e injetores atmosféricos fixos para pós-combustão, pelo uso de gusa líquido e por utilizar somente energia química.

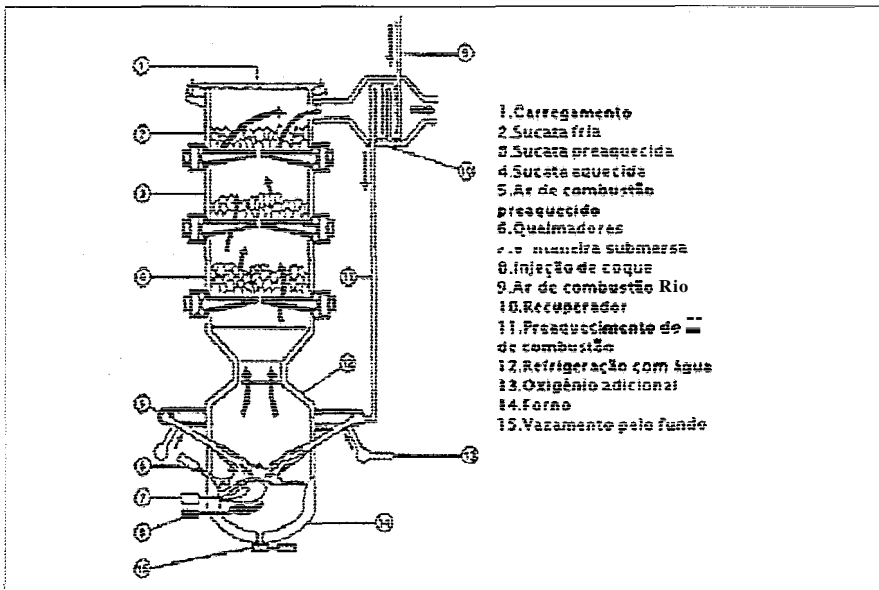
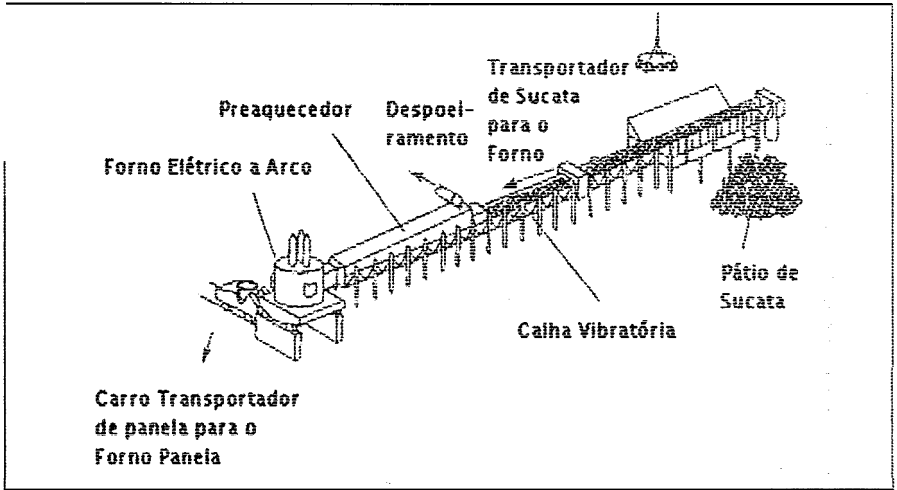


FIGURA 6.12 – Forno EOF (FRUEHAN, 1998).⁹

- *CONSTEEL* - Desenvolvido pela Intersteel Technology Inc. em Charlotte na Carolina do Norte, baseia-se na alimentação contínua de sucata através de uma abertura feita na parede. A sucata percorre um túnel e durante o seu deslocamento entra em contato com os gases quentes que saem do FEA. Opera sempre com banho plano, que garante melhor estabilidade no sistema elétrico.

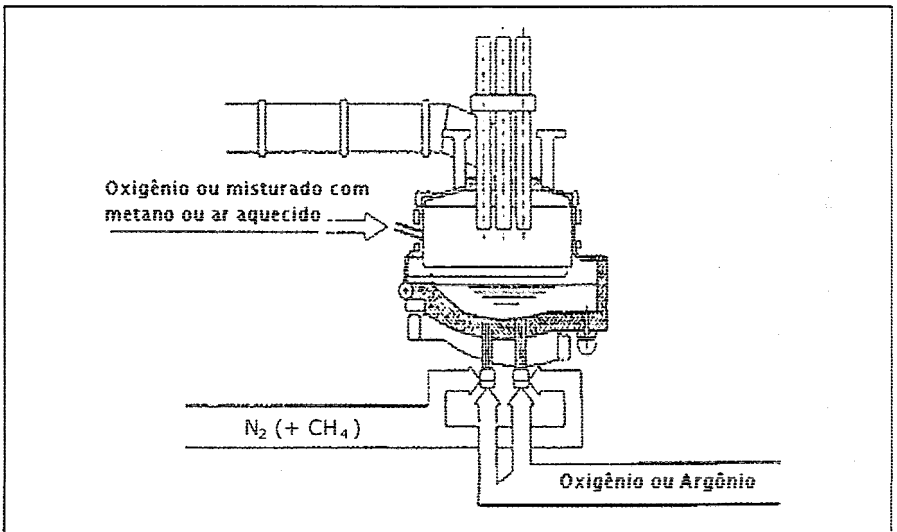
Fabricação de Aço em Fornos Elétricos a Arco

FIGURA 6.13 - Forno de
Cansieel
(FRUEHAN, 1998).⁸



- *K-ES* - Tecnologia desenvolvida por Klockner Technology Group and Tokyo Steel Manufacturing Group. Posteriormente, os direitos do processo foram adquiridos pela VAI. O processo usa energia adicional da injeção de combustíveis fósseis, principalmente carvão pulverizado. Intenso movimento do banho é causado pelas ventaneiras submersas, melhorando a metalurgia e a transferência de calor de energias adicionais.

FIGURA 6.14 - Forno tipo
K-ES (FRUEHAN, 1998).⁸



REFERÊNCIAS

- 1 GOODWILL, J. Demand side management for electric arc furnace. In: *Electric Furnace Conference Proceedings*, 49., 1991, Toronto. Warrendale. PA: Iron and Steel Society, 1991. p. 81-85.
- 2 GIL, M. *Operação de fornos elétricos*. São Paulo: ABM, 1980. 280 p. [Apostila].
- 3 UCAR CARBON COMPANY. *The evolution of arc furnace: highlights of new technologies*. Columbia, 2001.
- 4 MADUELL, F.; BOWMAN, B. Effect of adding reactance on furnace performance. In: *EUROPEAN ELECTRIC STEEL CONGRESS*, 4., 1992., Madrid. *Proceedings... Madrid: IISI, 1992. v. 203-213.*
- 5 IKETANI, M. Advances in arc furnace melting at Tokyo steel. In: *INTERNATIONAL MINI MILL CONFERENCE*, 6., 1994, Bangkok. *Proceedings... Bangkok: IISI, 1994.*
- 6 MARTHUR, P.; DAUGHTRIDGE, G. High efficiency post-Combustion in the electric arc furnace. In: *MCMASTER SYMPOSIUM ON IRON MAKING AND STEELMAKING*, 22., 1994, Hamilton. *Proceedings... Hamilton, Ontario: McMaster University Press, 1994.*
- 7 HUBER, J.C.; RUBY, F.; FARAL, M.; LE COQ, X. Pilot assessment of the airtight EAF process. *La Revue de Metallurgie*, v. 103, n. 4, p. 168-173, Apr. 2006.
- 8 HOPPERDIZEL, P. Injeção de gases. CURSO ACIARIA ELÉTRICA 2006, São Paulo. [Apresentação].
- 9 FRUEHAN, R. J. (ed). *The making, shaping and treating of steel*. 11.ed. Pittsburgh: The AISE Steel Foundation, 1998.

Refino significa eliminação de impurezas, no caso da fabricação de aços, as impurezas principais são o oxigênio (O), o enxofre (S), o nitrogênio (N), o hidrogênio (H) e o fósforo (P).

O oxigênio, o enxofre, o fósforo e o nitrogênio formam compostos denominados inclusões (óxidos, sulfetos e nitretos), que na maior parte dos casos são prejudiciais para as propriedades mecânicas e/ou características desejadas no aço, causando:

- diminuição da plasticidade;
- diminuição da tenacidade;
- formação de trincas; e
- formação de defeitos superficiais.

Em alguns casos as inclusões podem ser desciáveis no aço, mas de maneira controlada, tanto em quantidade quanto em forma (morfologia), para a obtenção de propriedades específicas:

- melhor usinabilidade (facilidade para corte e/ou furação);
- aumento de tenacidade em direções específicas, pelo alinhamento de inclusões; e
- maior dureza.

No caso específico do hidrogênio, esta presença no aço pode, sob certas condições, causar o aparecimento de trincas internas.

Chama-se refino secundário aquele que é realizado fora do equipamento de fabricação de aço bruto (Forno Elétrico a Arco ou Conversor a Oxigênio).

Um exemplo de refino que é bem realizado no equipamento de fabricação de aço bruto é a desfosforação (remoção do fósforo do aço), que exige um aço líquido com altos teores de oxigênio e escória com uma grande quantidade de cal (&e) - i - ocorrer com eficiência. Tais condições são facilmente obtidas no equipamento de fabricação de aço bruto.

No caso da remoção das outras impurezas, as condições do aço no equipamento de fabricação de aço bruto não permitem ou dificultam os processos de refino, que são:

- desoxidação, ou remoção do oxigênio;
- dessulfuração, ou remoção do enxofre; e
- a degaseificação, ou remoção de hidrogênio e nitrogênio.

Após o processamento do aço no equipamento de fabricação de aço bruto, invariavelmente o aço líquido é transferido para um recipiente denominado Panela, que não cumpre apenas o papel de transporte do aço líquido para o equipamento seguinte, no roteiro de processamento, mas também o de reator metalúrgico nas operações de refino secundário. Desse modo, o refino secundário do aço líquido, muitas vezes, também é chamado de Metalurgia de Panela.

Além das operações de refino secundário, outras operações, também, podem ser realizadas na Panela, com eficiência maior do que nos equipamentos de fusão:

- acerto de composição química do aço;
- e descarbonização, ou remoção do carbono (C); e
- alteração da morfologia das inclusões remanescentes.

7.1 A Panela

A panela é fabricada de aço, com revestimento interno de material refratário, o que lhe permite suportar as altas temperaturas do aço líquido (de 1.550° C a 1.650° C na maior parte das vezes). Dentro da panela o aço líquido sofre os processos de refino secundário (Figura 7.1).

7.1.1 Refratário de panela

Usualmente o revestimento refratário da panela é composto de tijolos ou concreto de alumina (Al_2O_3), magnesia (MgO), magnesia imprégnada com carbono ($MgO-C$) ou dolomita ($MgO+CaO$); estes óxidos são chamados óxidos estáveis. O refratário para revestimento de Panelas, nas quais são realizadas as operações de refino secundário, deve apresentar um baixo teor de

óxidos não-estáveis, como a sílica (SiO_2), o óxido de ferro (FeO), o óxido de manganês (MnO) e o óxido de cromo (Cr_2O_3), que podem dificultar o refino pela contaminação do aço líquido com oxigênio.

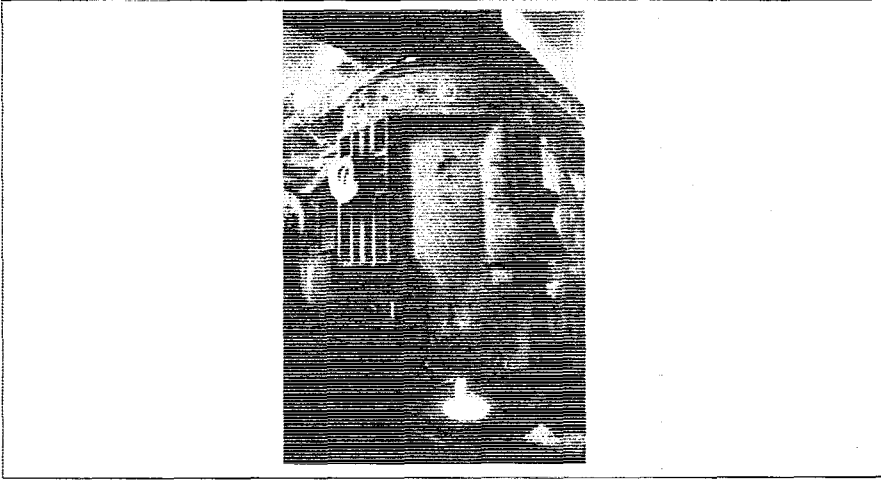


FIGURA 7.1 - Panela siderúrgica (GALLATIN STEELS, 2006).¹

Outros tipos de refratários, também, podem ser utilizados, dependendo de seu custo e processos de refino praticados, ou mesmo a ausência de refino. A partir destas situações particulares, pode-se mesmo utilizar refratário à base de sílica ou cromita.

7.1.2 Agitação do aço na panela

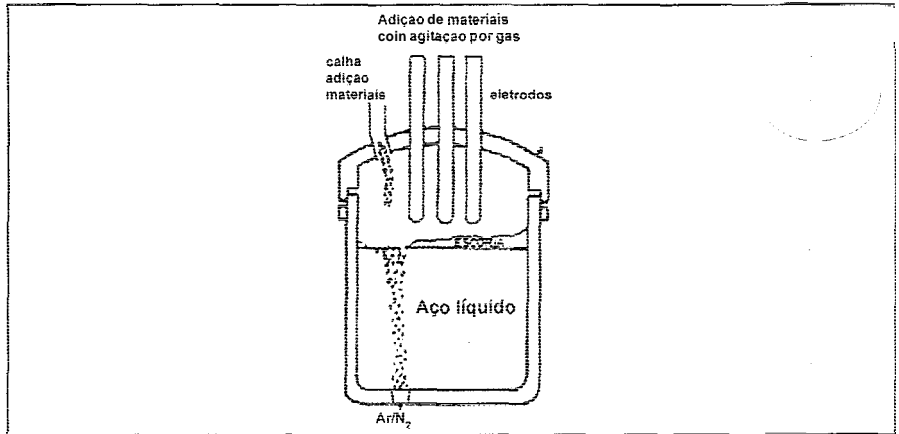
O aço líquido em repouso dentro da panela torna qualquer operação de refino impossível, visto que a velocidade de todos os processos de refino é reduzida caso não haja uma agitação suficiente do banho metálico, homogeneizando o aço tanto do ponto de vista térmico quanto do ponto de vista químico.

A agitação do aço líquido pode ser realizada principalmente por dois métodos:

- borbulhamento de gás inerte como argônio (Ar) ou, em casos mais raros, nitrogênio (N_2) por meio de um *plug* poroso instalado no fundo da panela. A subida das bolhas de gás cria um movimento no aço líquido que permite obter uma massa homogênea do ponto de vista térmico e químico (Figura 7.2); e

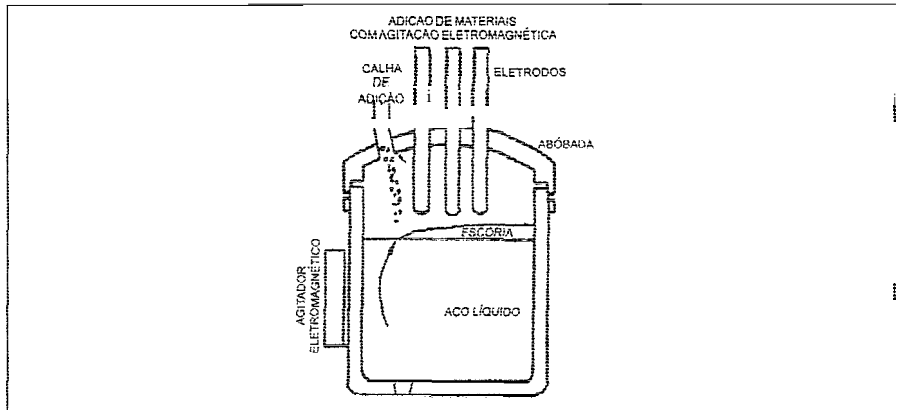
Refino Secundário de Aços

FIGURA 7.2 -
Borbulhamento de gás
inerte pelo fundo da
panela (SAMPAIO e
RIBEIRO, 2005).²



- criação de campo magnético induzido por bobinas localizadas fora da Panela. O campo magnético faz o aço líquido se movimentar dentro da Panela, trazendo resultados similares ao conseguido pelo borbulhamento de gás inerte. Nesse caso específico, a carcaça externa da Panela deve ser construída em aço não-magnético, para que ela não seja aquecida no processo de indução de campo magnético (Figura 7.3).

FIGURA 7.3 - Campo
magnético utilizado na
agitação do aço líquido
(SAMPAIO e RIBEIRO,
2005).²



A agitação pode ser forte, nos casos em que é necessário um grande contato do aço com a escória, ou exposição do aço ao vácuo. Também uma agitação suave pode ser necessária se o objetivo é auxiliar a flotação das inclusões para que estas sejam absorvidas pela escória, aumentando a limpeza do aço.

7.1.3 Saída do aço da panela

O aço normalmente é introduzido na panela por uma parte superior, na operação chamada vazamento. O vazamento consiste na inclinação do equipamento de fabricação de aço bruto, fazendo o aço passar por uma abertura (bica ou EBT) e para a panela.

A saída do aço da panela para o equipamento seguinte (normalmente uma Máquina de Lingotamento Contínuo ou mesmo Lingotes) se dá por uma abertura situada em sua parte inferior, normalmente fechada por blocos deslizantes, que é aberta somente no momento da saída do aço líquido.

Tal abertura denomina-se Válvula Gaveta.

7.2 A Escória

A escória é uma fase normalmente líquida, composta principalmente de óxidos e que sobrenada o aço líquido devido à diferença de densidade entre as duas fases.

A formação da escória no processo de fusão é resultado da oxidação do aço e seus elementos de liga, oxidação esta causada pelo contato com o oxigênio injetado ou presente no ar. Nesse caso, obtém-se uma escória com elevada quantidade de óxidos não-estáveis, citados anteriormente (SiO_2 , FeO , MnO , Cr_3O_4). Da mesma maneira que não são desejados no refratário de panela, não são desejados na escória.

O CaO é adicionado no processo de fusão para geração de uma escória primária de proteção ao aço líquido e para permitir a desfosforação. Este CaO normalmente, também, faz parte da escória encontrada no processo de fusão.

Como a escória gerada no processo de fusão não é desejável, esta deve ser removida da panela após o vazamento, ou dispositivos devem ser instalados no equipamento de fabricação de aço bruto para evitar sua passagem para a panela.

Com o aço já na panela, porém sem a escória, inicia-se imediatamente a oxidação do ferro e outros elementos de liga do aço pelo oxigênio presente no ar. Para se evitar esta oxidação, é formada uma nova escória pelo carregamento de CaO ou Al_2O_3 e, muitas vezes, também MgO na panela.

Esta nova escória, além de proteger o aço líquido da oxidação pelo oxigênio presente no ar, cumpre um importante papel nas operações de refino secundário, pela absorção e retenção das inclusões geradas no processo.

7.3 Controle de Temperatura Durante o Refino Secundário

Os processos de refino secundário dependem de trocas de escória, adições de elementos de ligas e, muitas vezes, borbulhamento de gases. Todas estas operações trazem grandes perdas de temperatura, que devem ser compensadas para que o aço seja entregue à próxima fase de processamento dentro das faixas de temperatura desejadas.

A maneira mais usual de incorporação de calor no aço líquido durante o refino secundário é a utilização de arco elétrico, por meio de eletrodos de grafite sobre o banho metálico. O conjunto Painel + Transformador + Circuito Elétrico + Eletrodos é denominado Forno Painel (Figura 7.4).

FIGURA 7.4 - Instalação de um Forno Painel (SIEMENS VAI, 2006).³



Outro método utilizado para a compensação das perdas térmicas no processo de refino secundário é o aquecimento químico, baseado na reação química do alumínio e do silício com o oxigênio.

7.4 Equilíbrio Químico Escória x Aço Líquido

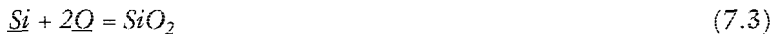
Para o completo entendimento dos processos de refino secundário do aço, é importante que seja entendido que os elementos químicos presentes no

aço líquido estão em permanente equilíbrio com os compostos presentes na escória, ou nas inclusões presentes no aço.

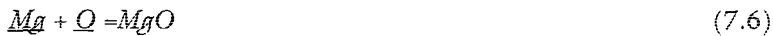
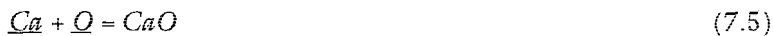
A principal reação de equilíbrio químico entre aço e escória é a que exprime a relação entre o oxigênio dissolvido no aço líquido (\underline{O}), o ferro presente no aço líquido (\underline{Fe}) e o óxido de ferro (FeO) presente na escória ou nas inclusões dentro do aço:



O equilíbrio pode ser deslocado para a esquerda, isto é, para a dissolução de oxigênio no aço, se houver grande quantidade de FeO na escória. Em contrapartida, a ausência de FeO na escória desloca o equilíbrio para a direita, o que na prática significa que a escória passa a absorver o oxigênio dissolvido no aço na forma de FeO formado na escória. Esta equação de equilíbrio explica a necessidade de se minimizar a quantidade dos chamados óxidos não-estáveis na escória, pois os seguintes equilíbrios podem ser entendidos de forma análoga:



No caso dos chamados óxidos estáveis, pela própria natureza de seus elementos constituintes, o equilíbrio está sempre deslocado para a formação do óxido (para a direita):



Entende-se das equações acima que, em se tendo um dos elementos formadores de óxidos estáveis, e oxigênio dissolvido no aço líquido, a formação do óxido é preferencial, removendo-se o oxigênio dissolvido no

O entendimento do equilíbrio químico entre aço líquido e escória, por meio das equações de equilíbrio de cada elemento de liga e seus óxidos, sulfetos e nitretos é essencial para que as operações de refino sejam, por sua vez, também entendidas.

7.5 Ferro-liga e Acerto de Composição Química

A adição de elementos químicos no aço líquido é feita principalmente por meio dos chamados Ferros-liga, por questões de manuseio ou economia. Os principais ferros-liga utilizados nas operações de refino secundário ou acerto de composição química podem ser observados na Tabela 7.1.

TABELA 7.1 - Ferros-ligas mais utilizados para acerto de composição química dos aços

EM: LPAIO e RIBEIRO, 2003

LIGA	%C	%Mn	%Si	%P	%S	%Cr	%Ni	OUTROS
FeMn AC	6,5	73,0	0,6	0,22	0,008	1,5	0,8	
FeMn BC	1,3	80,7	0,6	0,03	0,040			
FeCr AC	7,4		3,3	0,03	0,007	55,6		
FeCr BC	0,05		0,5	0,02	0,002	54,3		
FeSi 75	0,05		72,2	0,03	0,002			Al = 0,13
FeSiMn	1,7	63,0	15,4	0,12	0,010			
FeP			0,2	20,4	0,20			
FeB								B = 14,7
FeV	0,1		0,8	0,01	0,026			V = 53,0
FeW								W = 32,5
S					96,0			
Al								Al = 98,6
CaSi	0,2		51,2					Ca = 31,1
SiC	30,0		64,0					
Coque	98,0				0,81			
Grafite	97,5							
FeNb	0,1		1,6	0,03				Nb = 66,2
MoO3			1,1	0,05				Mo = 62,0
FeTi			1,5	0,03	0,025			Ti = 37,5
Cu								Cu = 99,9
Mn		99,0			0,002			
Si	0,10		98,0					
FeS					30,0			
FeMo			0,7	0,05	0,015			Mo = 59,0
FeNi	0,08						18,0 a 50,0	
Ni					0,005		99,5	

As ligas do ferro-liga podem ser classificadas quanto à sua dissolução no aço líquido em duas classes:

Classe I: ligas cujo ponto de fusão está abaixo do ponto de solidificação do aço, isto é, abaixo de aproximadamente 1.500° C. A absorção pelo banho metálico se dá através do fenômeno de fusão, caso das ferro-liga FeMn, FeSiMn, FeCr e FeSi.

No momento em que entra em contato com o aço, uma camada de aço sólido é formada em sua superfície, inicialmente, fria. Com o tempo a liga se aquece dentro do aço, derrete-se, e, quando a camada de aço volta a se tornar líquida, a liga já derretida é liberada no interior do aço líquido (Figura 7.9).

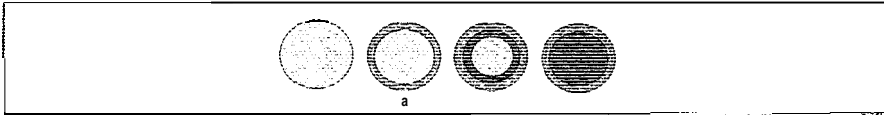


FIGURA 7.5 -
Representação da
dissolução de uma liga
Classe 1 (SAMPAIO e
RIBEIRO, 2005).²

Classe 2: ligas cujo ponto de fusão está acima do ponto de solidificação do aço. A absorção pelo banho metálico se dá através do fenômeno de dissolução sólido/líquido, caso dos ferros-ligas FeV, FeW, FeNb e FeMo.

Quando tal liga entra em contato com o aço, uma camada de aço sólido é formada em sua superfície, inicialmente, fria. Ao contrário das ligas Classe 1, nestes casos a camada de aço volta a se tornar líquida, porém a liga ainda está sólida, e sua absorção pelo aço se dá por dissolução. O processo é grandemente influenciado pela agitação do banho metálico (Figura 7.6).

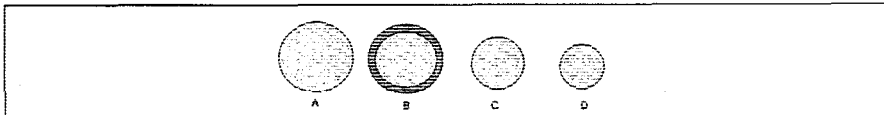


FIGURA 7.6 -
Representação da
dissolução de uma liga
Classe 2 (SAMPAIO e
RIBEIRO, 2005).²

Nos casos em que a adição de ferro-ligas deve ser feita com grande precisão, ou quando a liga a ser adicionada tiver uma alta reatividade, caso típico do CaSi – usualmente o meio utilizado para esta adição é o arame (Figura 7.7).

Trata-se do ferro-liga pulverizado e encapsulado dentro de um envoltório de aço, que é injetado em alta velocidade no interior do aço líquido. Uma vez dentro do aço líquido, o envoltório se derrete e libera a liga dentro do aço.

No caso do alumínio, o arame é formado por uma bobina compacta deste metal.

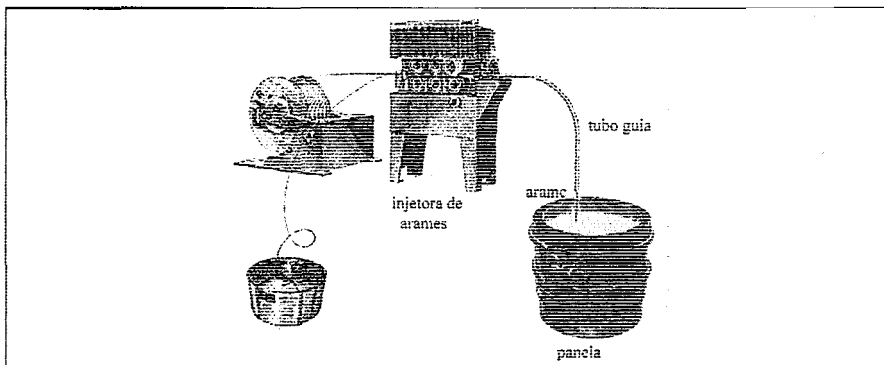


FIGURA 7.7 - Injeção de
ferro-liga por meio de
arames – bobina e
máquina injetora
(AFFIVAL CO., 2006).⁴

Adição de ligas e acerto de composição química no aço tornam-se muito mais controláveis quando feitos na Panela, comparação feita com a adição no equipamento de fabricação de aço bruto, onde a grande oxidação e exposição do aço líquido à atmosfera torna o rendimento destas adições errático.

7.6 Desoxidação

As equações principais do processo de desoxidação são as mesmas citadas como exemplo de equilíbrio químico entre o aço líquido e a escória. Na prática, por razões econômicas, a desoxidação do aço líquido é realizada pela adição dos seguintes elementos: Al, Si e Mn. Sempre em presença de uma escória com baixas quantidades de FeO, MnO e SiO₂.

Importante ressaltar o fato de que o uso combinado de Si e Mn na desoxidação é mais eficiente do que o uso isolado do Si ou do Mn. A razão para a maior eficiência é a formação de um composto chamado silicato de manganês, que também é líquido nas temperaturas usuais do aço líquido, não formando inclusões nem sendo absorvido pela escória. Esta contínua remoção do silicato de manganês, por dissolução no aço líquido, leva o equilíbrio constantemente para a direita, aumentando muito a eficiência da desoxidação.

Formadores de óxidos estáveis, como o Ca e o Mg, trazem a dificuldade do alto custo e manuseio difícil em sua forma pura ou metálica, não sendo utilizados para desoxidação em processos industriais.

A desoxidação também pode ser feita utilizando-se o seguinte equilíbrio químico:



Neste caso, o equilíbrio químico não se dá entre o aço e a escória, mas entre o aço e a atmosfera, com o equilíbrio se deslocando para a direita (formação de CO, com desoxidação do aço), com o aumento do teor de carbono dissolvido no aço ou com a redução do teor de CO na atmosfera. Esta redução de CO na atmosfera pode se dar pela substituição dele por outros gases, muitas vezes gases inertes, como o argônio (Ar), ou pela constante remoção do CO gerado, caso do processamento sob vácuo.

7.7 Descarburização

Utilizando-se a mesma equação de equilíbrio químico da desoxidação por carbono, pode-se entender o mecanismo de remoção do carbono do aço:



Da mesma maneira, a remoção ou diluição contínua do CO na atmosfera desloca o equilíbrio no sentido da formação do CO, ou seja, da descarburização. O mesmo acontece para a entrada de oxigênio no aço líquido, que pode ser feita por injeção de O₂ gasoso ou entrada de FeO na escória, conforme o equilíbrio:



A entrada de FeO na escória desloca o equilíbrio para a esquerda, ou seja, aumenta o teor de oxigênio dissolvido no aço líquido; que, por sua vez, desloca o equilíbrio da primeira equação para a formação de CO, ou seja, a descarburização.

A descarburização é necessária na fase de refino secundário durante a fabricação de aços inoxidáveis, pois o cromo adicionado como FeCr AC é mais barato, porém possui teores de carbono por volta de 7,5%, o que traz a necessidade de remover o carbono em excesso, após a entrada do cromo. A fabricação de aços comuns com teores de carbono muito baixos (abaixo de 0,05% de carbono), também, exige uma descarburização durante o refino secundário.

7.8 Desfosforização

A remoção do fósforo do aço líquido segue uma equação de equilíbrio mais complexa:



A escória, neste caso, deve ter uma porcentagem de 35% a 40% de CaO para fixação do P₂O₅. O contato entre aço líquido e escória deve ser o

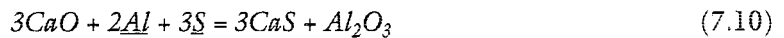
mais intenso possível, daí a importância da forte agitação do aço por meio de insuflação de gases, podendo ser mesmo o oxigênio, que trará o benefício adicional de aumentar o teor de FeO na escória.

Neste equilíbrio \underline{P} e \underline{Fe} estão dissolvidos no aço líquido, e FeO e P_2O_5 estão na escória. Para se deslocar o equilíbrio para a direita (desfosforação) é necessário que haja muito FeO na escória (30% a 40% de preferência), condição facilmente obtida durante a fase de fusão, no Forno Elétrico a Arco ou Conversor a Oxigênio.

Em casos excepcionais a desfosforação pode ser feita na panela; mas é imprescindível que a escória remanescente do processo seja totalmente removida antes da sequência das operações de refino, pois a escória se encontrará contaminada com fósforo e qualquer redução do teor de FeO na escória pode reverter o fósforo para o aço novamente.

7.9 Dessulfuração

O equilíbrio que representa o processo de dessulfuração é o seguinte:



Analogamente aos equilíbrios mostrados anteriormente, \underline{Al} e \underline{S} encontram-se dissolvidos no aço líquido e CaO, CaS e Al_2O_3 encontram-se na escória. Como o enxofre ficará fixado na escória como CaS, um contato intenso entre o aço líquido e a escória é essencial, porém, neste caso, a agitação na panela deverá ser feita por borbulhamento de gás inerte ou agitação eletromagnética, nunca por oxigênio, que levaria à formação de Al_2O_3 , deslocando o equilíbrio para a esquerda, contra a dessulfuração.

O deslocamento do equilíbrio para a direita (dessulfuração) é obtido pela adição de alumínio no aço e por CaO na escória.

Uma variante do equilíbrio químico na dessulfuração pode ser representada por:



Este equilíbrio explica a dessulfuração ocorrida em aços com alto carbono e a ocorrida sob vácuo, mesmo sem a presença significativa de alumínio no aço líquido.

7.10 Desgaseificação

A remoção de gases do aço líquido segue as seguintes equações de equilíbrio:



Onde \bar{H} e \bar{N} representam o hidrogênio e o nitrogênio dissolvidos no aço líquido e H_2 e N_2 os representam em suas formas gasosas. Da mesma maneira como no caso da desoxidação ou descarburização com formação de CO gasoso, o equilíbrio químico não se dá entre o aço e a escória, mas entre o aço e a atmosfera, com o equilíbrio se deslocando para a direita com a redução dos teores de H_2 e N_2 na atmosfera, pela diluição constante destes em outros gases, muitas vezes gases inertes, como o argônio (Ar), ou pela constante remoção dos gases gerados, caso do processamento sob vácuo.

Importante ressaltar que a remoção do nitrogênio é sempre muito mais difícil do que a remoção do hidrogênio. Enquanto até 70% do hidrogênio podem ser removidos em um tratamento normal do aço sob vácuo, apenas 25% do nitrogênio podem ser removidos sob o mesmo tratamento.

Em face desta limitação, o nitrogênio deve ter sua absorção limitada na fase anterior do processamento do aço, ou seja, na fusão e vazamento. A absorção se dá pelo contato com o nitrogênio do ar.

Método eficiente para se evitar a absorção de nitrogênio durante estas fases é a insuflação de oxigênio, durante a fusão e vazamento do aço, com grande quantidade de oxigênio dissolvido, o que bloquearia os locais de absorção por onde o nitrogênio seria absorvido.

7.11 Controle de Morfologia de Inclusões

Nem todas as inclusões formadas dentro do aço podem ser absorvidas pela escória, algumas podem mesmo ser formadas próximo ao momento da solidificação do aço, quando qualquer movimento amplo de massa já está bem restrito.

Para que as inclusões remanescentes no aço sólido sejam neutralizadas, é necessário um processo de alteração de morfologia de inclusões.

Uma das mais comuns alterações de morfologia visa tornar inclusões duras e angulosas de alumina em inclusões de cantos arredondados de aluminato de cálcio ($12 \text{ CaO} \cdot 7 \text{ Al}_2\text{O}_3$), que apresenta comportamento muito melhor durante a conformação mecânica posterior do aço. Tal alteração é obtida pela adição de Ca no aço líquido já desoxidado.

A formação de aluminato de cálcio, também, é importante para neutralizar o efeito negativo das inclusões de sulfeto de manganês MnS , que tem como característica o alongamento durante a laminação, criando linhas de fragilidade no aço. O tratamento do aço desoxidado por Ca forma o aluminato de cálcio, que atua como base para a precipitação de MnS e CaS (sulfeto de cálcio), eliminando as linhas de fragilidade após laminação (Figura 7.5).

FIGURA 7.8 - Algumas inclusões e suas formas no aço fundido e laminado (SAMPAIO e RIBEIRO, 2005).²

TIPO	FUNDIDO	LAMINADO
Al_2O_3		
CaAl_2		
CaAl_2		
MnS		
CaS (ANEL DE SULFETO)		

A adição de Ca no aço líquido para formação de aluminato de cálcio, também, é útil no caso do processo de lingotamento contínuo, em que são comuns os problemas de entupimento das válvulas de controle de fluxo do aço, por precipitação de alumina. O aluminato de cálcio formado é líquido na temperatura de solidificação do aço, impedindo seu depósito nas válvulas e conseqüente entupimento.

7.12 Instalações para Refino Secundário do Aço

Para cada um dos processos de refino secundário do aço, anteriormente descritos, existem diversas instalações que podem ser utilizadas. A escolha do tipo de instalação depende das necessidades específicas de refino para cada tipo de aço; da produtividade desejada; do volume de aço a ser processado; e do valor do investimento que se pode fazer, e seu retorno.

Em seguida, pode-se ter uma breve descrição das principais instalações e os processos que cada uma permite realizar.

7.12.1 Forno Panela

O Forno Panela (Figura 7.9) é a mais popular instalação para refino secundário de aços. O reduzido investimento necessário fez que o Forno Panela se tornasse quase uma instalação obrigatória para a fabricação de aços, pois, além de permitir que grande parte dos processos de refino secundário fossem realizados com maior flexibilidade, liberou as instalações de fusão para se dedicarem apenas a derreter e elaborar o aço bruto com a maior eficiência possível.

Equipamentos:

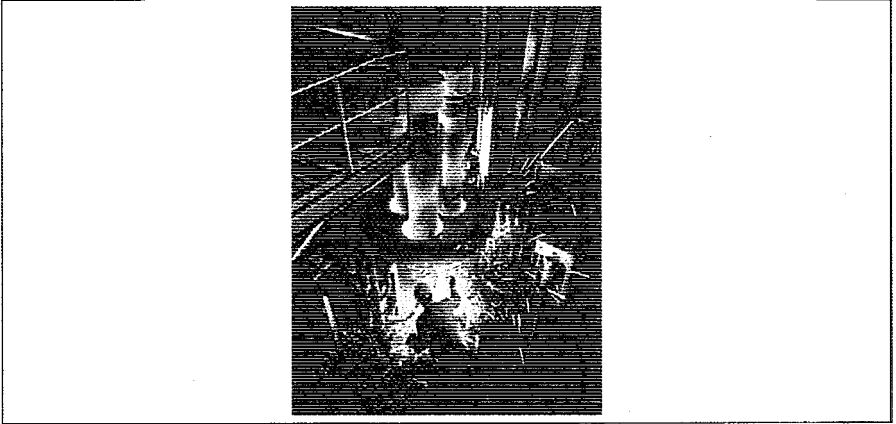
- transformador;
- circuito elétrico;
- braços condutores para suporte dos eletrodos de grafite;
- eletrodos de grafite;
- abóbada de cobertura;
- sistema de exaustão de fumos;
- conexões para permitir o borbulhamento de gás inerte pelo fundo da Panela;
- adição automática de ferro-liga (opcional);
- tomada automática de temperatura e amostras (opcional);
- máquina de injeção de arames (opcional).

Processos:

- controle de temperatura;
- acerto de composição química;

- controle de morfologia de inclusões;
- desoxidação; e
- dessulfuração.

FIGURA 7.9 - Instalação de um Forno Panela (GALLATIN STEELS, 2006).¹



7.12.2 Tanque de vácuo

Nesta instalação (Figura 7.10), a panela é posicionada dentro de um tanque, que tem sua pressãc reduzida, para permitir que alguns processos dependentes do equilíbrio aço líquido/atmosfera sejam levados a cabo com maior eficiência ou mesmo viabilizados.

Equipamentos:

- bombas de vácuo;
- injetores de vácuo;
- dutos;
- câmara de vácuo;
- medidores de pressão;
- sistema de exaustão de fumos;
- conexões para permitir o borbulhamento de gás inerte pelo fundo da Panela; e
- adição de ferro-liga sob vácuo (opcionai).

Processos:

- desgaseificação;
- desoxidação;

- dessulfuração;
- descarburização (em condições específicas); e
- acerto de composição química (pequenas quantidades de adições de ferro-liga).

7.12.3 ASEA-SKF

O equipamento ASEA-SKF (nome do antigo fabricante, hoje com a ABB como sucessora) possui duas estações, uma de aquecimento (similar a um Forno Panela comum) e outra de vácuo, que não utiliza uma câmara onde a panela é posicionada, mas apenas uma campânula sobre a panela (Figura 7.11), economizando instalações e minimizando os pontos de possíveis vazamentos de pressão. A agitação do aço líquido por campo magnético, também, é uma característica desta instalação.

Permite obter os mesmos resultados que são conseguidos utilizando-se um Forno Panela e um Tanque de Vácuo.

Equipamentos:

- transformador;
- circuito elétrico;
- braços condutores para suporte dos eletrodos de grafite;
- eletrodos de grafite;
- abóbada de cobertura para a estação de aquecimento;
- sistema de exaustão de fumos;
- bobinas para agitação eletromagnética;
- bombas de vácuo;
- injetores de vácuo;
- dutos;
- campânula para vácuo;
- medidores de pressão;
- adição de ferro-liga sob vácuo (opcional);
- adição automática de ferro-liga (opcional);
- tomada automática de temperatura e amostras (opcional); e
- máquina de injeção de arames (opcionai).

Processos:

- controle de temperatura;
- acerto de composição química;
- controle de morfologia de inclusões;
- desoxidação;
- dessulfuração;
- desgaseificação; e
- descarburação (em condições específicas)

FIGURA 7.10 - Tanque de vácuo (SIEMENS VAI, 2006).³

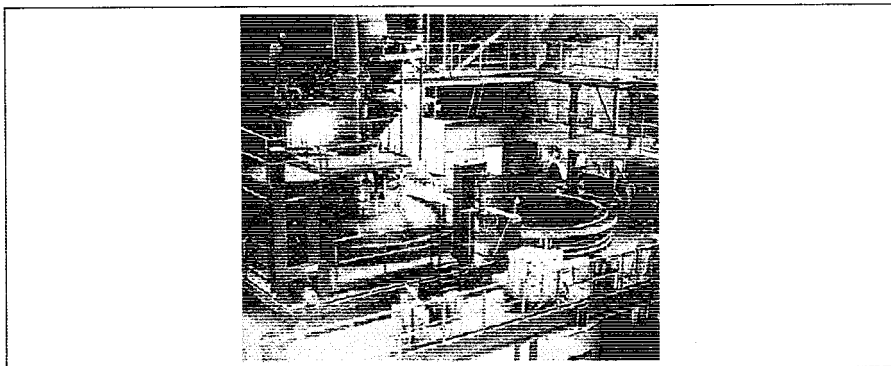
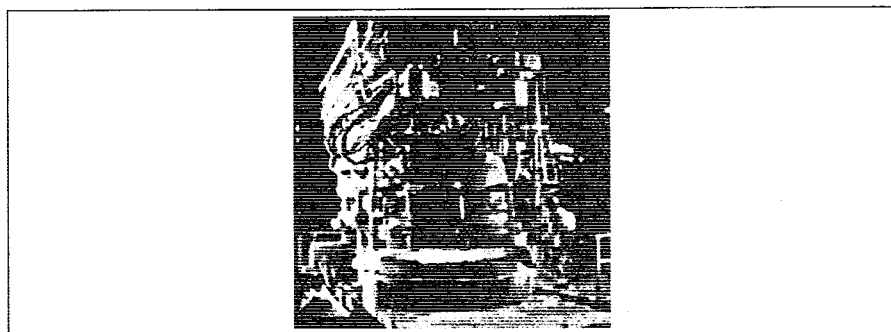


FIGURA 7.11 - Estação de vácuo de uma instalação ASEA-SKF (ELWOOD QUALITY STRESS, 2006).⁵



7.12.4 VAD

A instalação VAD (*Vacuum Arc Degassing*), também, conhecida como Finkl-Mohr, traz em uma única posição as instalações de aquecimento e vácuo (Figura 7.12). Não se trata de uma instalação muito popular, devido à complexidade associada com o uso de eletrodos de grafite dentro de um tanque de vácuo.

Equipamentos:

- transformador;
- circuito elétrico;
- braços condutores para suporte dos eletrodos de grafite;
- eletrodos de grafite;
- abóbada de cobertura posicionada sobre a Panela;
- sistema de exaustão de fumos;
- conexões para permitir o borbulhamento de gás inerte pelo fundo da Panela;
- bombas de vácuo;
- injetores de vácuo;
- dutos;
- câmara de vácuo;
- medidores de pressão;
- adição de ferro-liga sob vácuo; e
- tomada automática de temperatura e amostras (opcional).

Processos:

- controle de temperatura;
- acerto de composição química;
- controle de morfologia de inclusões;
- desoxidação;
- dessulfuração;
- desgaseificação; e
- descarburização (em condições específicas).

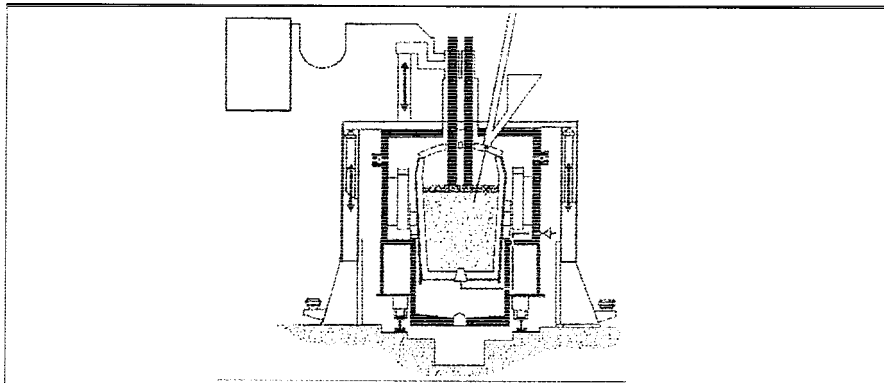


FIGURA 7.12 - Esquema de uma instalação VAD (SAMPAIO e RIBEIRO, 2005).²

7.12.5 VOD

A instalação VOD (*Vacuum Oxygen Decarburization*) é utilizada principalmente para a fabricação de aços inoxidáveis, pois a entrada de cromo por meio de Ferro Cromo de alto teor de carbono é a mais econômica e traz a necessidade de uma descarburização sob vácuo, para se evitar a perda do cromo adicionado por oxidação (o equilíbrio $C + O = CO$ gás é deslocado para a direita sob vácuo). Trata-se de um tanque de vácuo com uma lança para injeção supersônica de oxigênio em presença de baixa pressão (Figura 3.13). Normalmente é utilizado em conjunto com um Forno Panela, apesar de a oxidação do carbono gerar uma quantidade apreciável de calor durante o processo.

Equipamentos:

- bombas de vácuo;
- injetores de vácuo;
- dutos;
- câmara de vácuo;
- medidores de pressão;
- adição de ferro-liga sob vácuo ;
- tomada automática de temperatura e amostras (opcional);
- sistema de exaustão de fumos;
- conexões para permitir o borbulhamento de gás inerte pelo fundo da Panela;
- lança para injeção supersônica de oxigênio; e
- sensores de CO/CO₂ nos dutos de exaustão de gases, para monitoramento do processo de descarburização.

Processos:

- controle de temperatura (aquecimento químico);
- acerto de composição química;
- desoxidação;
- dessulfuração;
- desgaseificação; e
- descarburização.

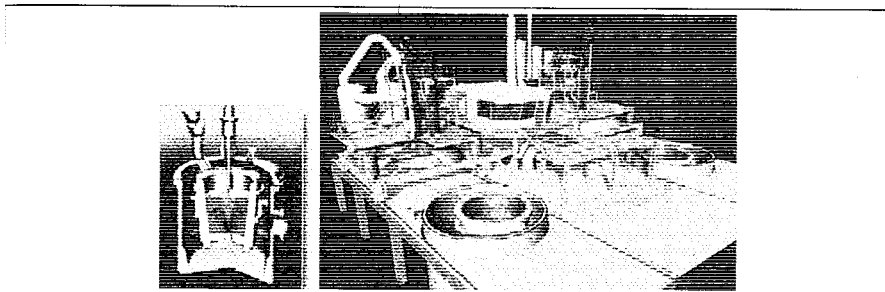


FIGURA 7 13 - instalação VOD (observar a lança para injeção de oxigênio na parte superior) (SMS DEMAG, 2006).⁶

7.12.6 AOD

A instalação AOD (*Argon Oxygen Decarburization*), também, é utilizada, como o VOD, para a fabricação de aços inoxidáveis. Da mesma maneira, a necessidade de remoção de carbono, após a entrada de Ferro Cromo com alto teor de carbono, faz que o equilíbrio $C + O = CO$ (gás) deva ser deslocado para a direita. Com a instalação AOD, a redução da pressão parcial de CO não é feita utilizando-se o vácuo, mas, sim, pela diluição dos gases gerados em gás inerte (argônio). O resultado final é o mesmo, porém a instalação AOD é muito mais produtiva que o VOD.

Esta instalação não necessita de Panela, tem o formato de um conversor e o argônio é injetado pelo fundo, por meio de lanças com tubos capilares, chamadas *tuyeres* (Figura 7.14). O oxigênio é injetado por cima, como em um conversor de fusão de aço.

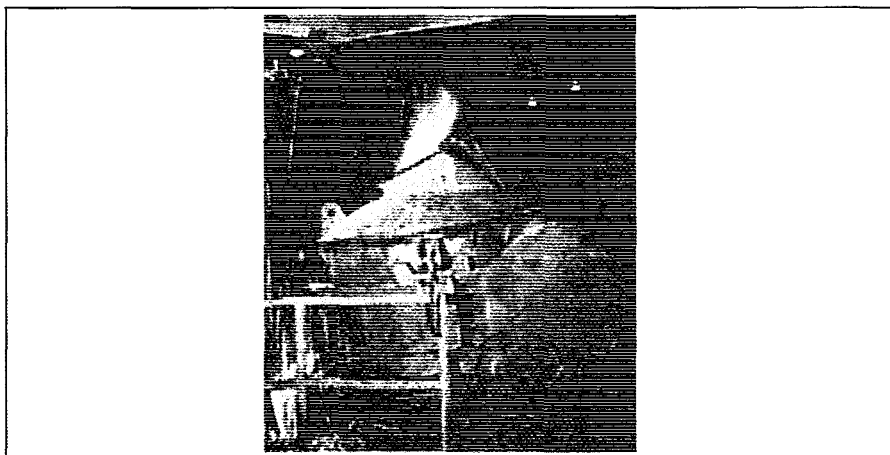
Equipamentos:

- conversor;
- *tuyeres* para injeção de argônio;
- sistema de exaustão de fumos;
- lança para injeção supersônica de oxigênio; e
- sensores de CO/CO₂ nos dutos de exaustão de gases, para monitoramento do processo de descarburização.

Processos:

- controle de temperatura (aquecimento químico);
- acerto de composição química;
- desoxidação;
- dessulfuração; e
- descarburização.

FIGURA 7.14 - Conversor AOD (PRAXAIR INC., 2006).⁷



7.12.7 DH

A instalação DH (*Dortmund-Holder-Huetten*) permite submeter porções do aço a ação do vácuo por meio de um vaso posicionado sobre a panela, este apresentando um movimento oscilante. A troca de aço entre o vaso sob vácuo e a panela é feita por um canal de comunicação (Figura 7.15). Esta instalação e a apresentada em seqüência, o RH, são recomendados nos casos em que a panela possui uma grande capacidade, sendo muito dispendiosa a instalação de um tanque de vácuo.

Equipamentos:

- bombas de vácuo;
- injetores de vácuo;
- dutos;
- vaso de vácuo;

- sistema de movimentação do vaso;
- medidores de pressão;
- sistema de exaustão de fumos; e
- adição de ferro-liga sob vácuo (opcionai).

Processos:

- desgaseificação;
- desoxidação;
- dessulfuração;
- descarburação (em condições específicas); e
- acerto de composição química (pequenas quantidades de adições de ferro-liga).

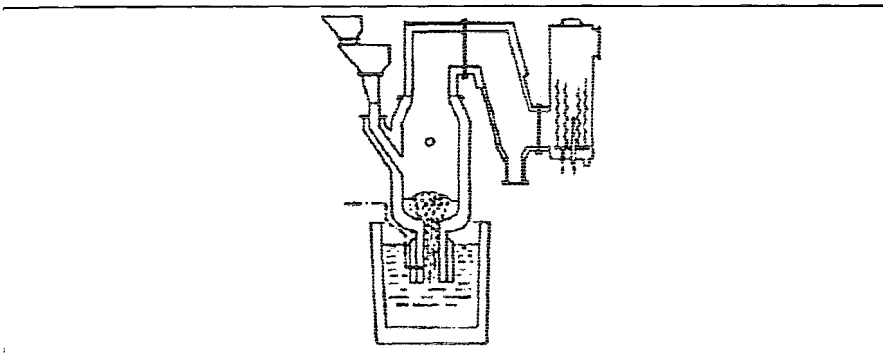


FIGURA 7.15 - Instalação DH e Panela com aço. O vaso superior executa um movimento oscilante na vertical, para permitir a troca de aço em seu interior (BRADASCHIA 1986).⁸

7.12.8 RH

A instalação RH (*Ruhrstahl-Heraeus*) é bastante similar 3DH, com a característica de manter o contato entre o vaso e o aço na Panela por meio de dois canais de comunicação (Figuras 7.16 e 7.17). O borbulhamento de gás inerte (argônio) por um dos canais provoca um movimento contínuo de aço para dentro do vaso, o que permite um tratamento mais homogêneo. Em algumas configurações, é utilizada a oxidação do alumínio para a manutenção/controle da temperatura do processo.

Equipamentos:

- bombas de vácuo;
- injetores de vácuo;

Refino Secundário de Aços

- dutos, sendo um deles com borbulhamento de argônio;
- vaso de vácuo;
- sistema de movimentação do vaso;
- medidores de pressão;
- sistema de exaustão de fumos; e
- adição de ferro-liga sob vácuo (opcional).

Processos:

- controle de temperatura em algumas configurações (aquecimento químico);
- desgaseificação;
- desoxidação;
- dessulfuração;
- descarburização (em condições específicas – no processo RH-OB); e
- acerto de composição química (pequenas quantidades de adições de ferro-liga).

FIGURA 7.16 - Esquema de Funcionamento RH (VALENTI, 1998).⁹

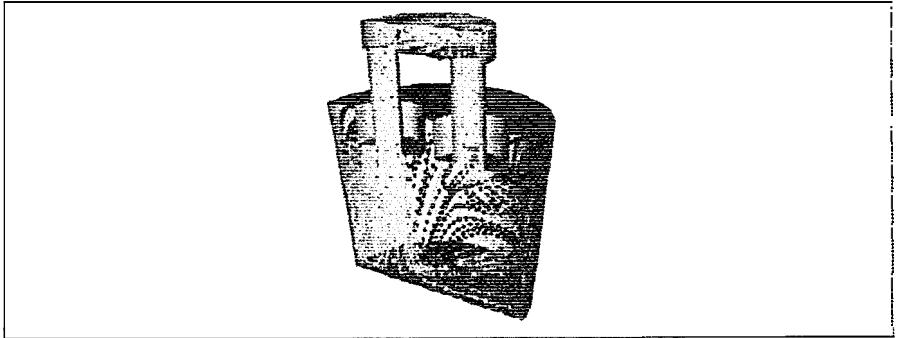


FIGURA 7.17 - Equipamento RH (VALENTI, 1998).⁹



7.12.9 CAS-OB

O processo CAS (*Composition Adjustment by Sealed Argon Bubling*) é o sistema de aquecimento químico mais conhecido e utilizado em todo o mundo. Um sino refratário é imerso sobre o "olho" de aço aberto pelo borbulhamento de argônio em alta vazão; tal configuração permite a criação de uma região de aço exposto, porém protegido da oxidação, por onde ligas, principalmente alumínio, podem ser adicionadas. Sobre o sino refratário existe uma lança para injeção de oxigênio, cuja reação com o alumínio adicionado gera o calor objetivado (Figura 7.15).

Equipamentos:

- carro;
- "sino" refratário;
- silos para adição de ligas;
- conexões para permitir o borbulhamento de gás inerte pelo fundo da Panela;
- lança para injeção de oxigênio; e
- medição de temperatura e tomador de amostras.

Processos:

- controle de temperatura (aquecimento químico); e
- acerto de composição química.

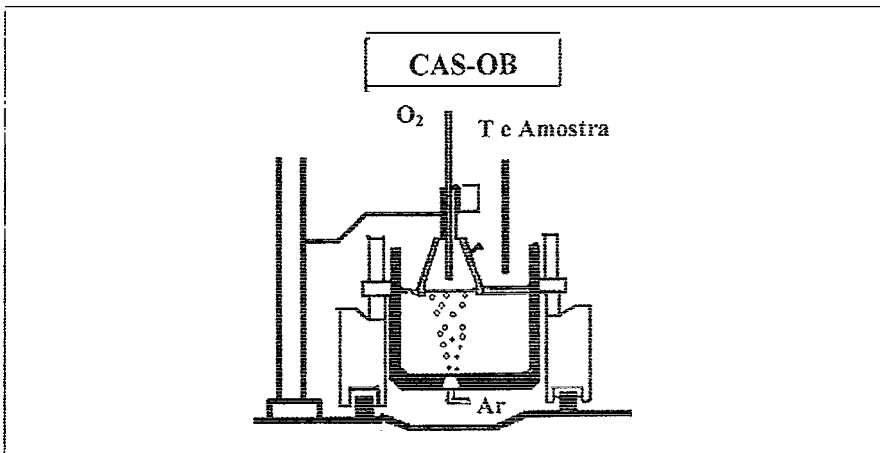


FIGURA 7.18 - Processo CAS-OB (SAMPAIO e RIBEIRO, 2005).²

7.12.10 IR-UT

O processo IR=UT (*Injection Refining – Up Temperature*) consiste na injeção de ligas pulverizadas, por meio de uma lança consumível ou ai-ames, sob a proteção de um *snorkel* com topo aberto. A agitação do banho se dá por meio de uma lança para injeção de argônio pela região superior do *snorkel*. Através do *snorkel* desce uma lança para injeção de oxigênio, cuja reação com o alumínio adicionado gera o calor objetivado (Figura 7.19).

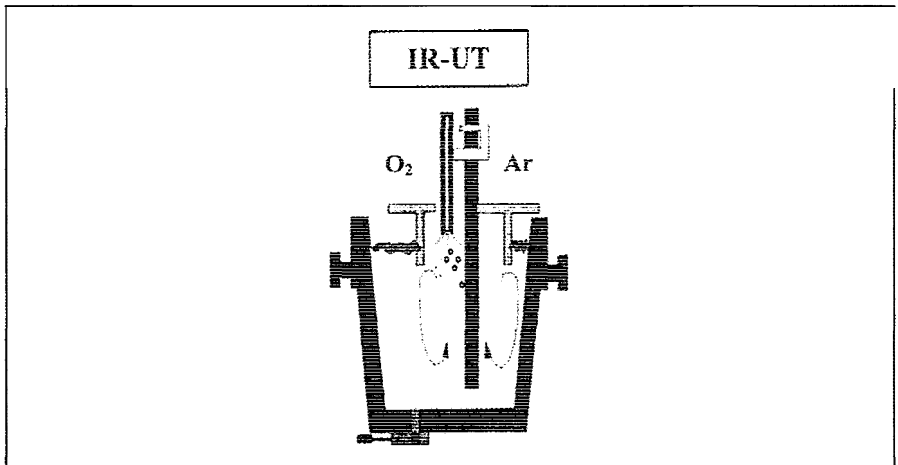
Equipamentos:

- carro;
- *snorkel* refratário;
- silos para adição de ligas;
- lança para permitir o borbulhamento de gás inerte;
- lança para injeção de oxigênio; e
- medição de temperatura e tomador de amostras.

Processos:

- controle de temperatura (aquecimento químico); e
- acerto de composição química.

FIGURA 7.19 - Processo IR-UT (SAMPAIO e RIBEIRO, 2005).²



REFERÊNCIAS

- 1 GALLATIN STEELS. *Ladle metallurgy facility*. Disponível em: <<https://secure.gallatinsteel.com/tour/LMF.asp>>. Acesso em: 24 out. 2006.
- 2 SAMPAIO, R. S.; RIBEIRO, D.B. *Refino secundário dos aços*. Belo Horizonte: ABM, 2005. [Apostila].
- 3 SIEMENS VAI. *Processos in the metals and mining industry*. Disponível em: <<http://www.industry.siemens.com/metals/en/processes>>. Acesso em: 4 out. 2006.
- 4 AFFIVAL INC. *Improving machinability of steel with cored wire in-ladle treatment*. Disponível em: <<http://www.affivalinc.com>>. Acesso em: 4 out. 2006.
- 5 ELWOOD QUALITY STEELS. Disponível em: <<http://www.elwd.com/eqs.htm>>. Acesso em: 5 out. 2006.
- 6 SMS DEMAG. Disponível em: <<http://www.sms-mevac.com>>. Acesso em: 5 out. 2006.
- 7 PRAXAIR, INC. Praxair France S.A. Disponível em: <www.praxair.com/Praxairfrance.nsf>. Acesso em: 5 out. 2006.
- 8 BRADASCHIA, C. (ed.). *Siderurgia para não-siderurgistas*. São Paulo: ABM, 1986. [Apostila].
- 9 VALENTI, M. (ed.). Vacuum degassing yields stronger steel. *Mechanical Engineering Magazine Online*, 1998. Disponível em: <<http://www.memagazine.org/backissues/membersonly/april98/features/vacuum/vacuum.html>>. Acesso em: 4 out. 2006. [Disponível para assinantes],

Lingotamento Contínuo do Aço

Capítulo 08

Rubens José Faco

Este capítulo discute o processo de solidificação do aço via lingotamento contínuo. Trata-se de processo relativamente novo, menos de 50 anos, que a cada ano vem incorporando tecnologias, a fim de torná-lo cada vez mais competitivo, diante de um mercado consumidor de aço cada vez mais exigente.

O processo de lingotamento contínuo do aço e suas ligas é o último estágio em aciaria onde se trabalha com metal ainda no estado líquido. Tem como missão solidificar o aço, em uma forma desejável, de tal maneira que possa ser utilizado nas etapas seguintes da cadeia produtiva.

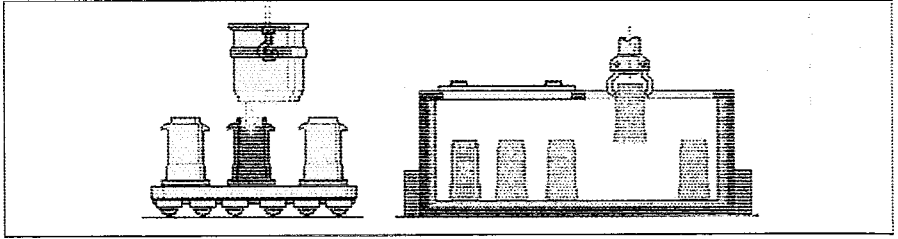
Durante o último quarto do século XX, o método tradicional de converter aço líquido em sólido mudou drasticamente (INTERNATIONAL IRON AND STEEL INSTITUTE, 1986).¹ O método tradicional, conhecido como lingotamento convencional, consistia em colocar o aço líquido, depois de pronto, em moldes individuais onde eram resfriados até sua completa solidificação. O resultado era um produto denominado lingote, que seria por sua vez aquecido e laminado na forma de placas, tarugos ou perfis, conforme o projeto de cada instalação.

Cada lingote era lingotado de forma independente. A quantidade de lingotes dependia do tamanho da panela e, também, do tamanho das lingoteiras. Após o enchimento das chamadas lingoteiras, o aço solidificava com o decorrer do tempo, para, então, os lingotes serem removidos através do processo de estripagem, que utilizava uma ponte rolante especial, dotada de verdadeiras “pinças” gigantes que tiravam o lingote solidificado de forma (Figura 8.1). Em seguida, os lingotes eram conduzidos para os chamados tornos-poço, onde deveriam ser aquecidos e, posteriormente, transformados em produtos laminados em sua forma final desejada.

A concepção inicial do projeto de lingotar continuamente o metal surgiu na metade do século XIX, concebida por G.E Sellers (1840), J.Laing

Lingotamento Contínuo do Aço

FIGURA 8.1 - O processo de solidificação de aço através do lingotamento convencional.



(1843) e Henry Bessemer (1846), que somente puderam aplicá-la no lingotamento de metais não ferrosos, com baixo ponto de fusão. O aço ainda era um desafio, pois as temperaturas de trabalho eram altas e o material de baixa condutividade térmica. A patente sobre o lingotamento contínuo de aço de Bessemer é de 1846 (INTERNATIONAL IRON AND STEEL INSTITUTE, 1986).¹

R.M. Daelen, em 1887, propôs a possibilidade de solidificar o aço usando água de resfriamento no molde, abrindo o topo e a sua base. Ele visualizou um processo em que um jato de aço líquido era lançado verticalmente dentro de um molde aberto e passava por um sistema de resfriamento, que ainda removia a peça formada através de rolos, para finalmente ser cortado por um dispositivo de corte. Consideráveis problemas ocorreram devido ao agarramento da pele solidificada do aço no molde, com o resfriamento da parede do molde com água (INTERNATIONAL IRON AND STEEL INSTITUTE, 1986).¹

Em 1933 Siegfried Junghans patenteou um sistema de oscilação do molde, fazendo que o processo fosse utilizado em larga escala. Junghans é considerado, por isso, o pai das modernas máquinas de lingotamento contínuo (INTERNATIONAL IRON AND STEEL INSTITUTE, 1986).¹ Após a Segunda Guerra Mundial, uma planta piloto iniciou a produção contínua de aço; a primeira máquina construída foi uma máquina vertical instalada em 1946 na Inglaterra, para produção de tarugo. A partir daí, uma série de outras máquinas iniciaram a produção, e cada uma delas apresentava inovações que impulsionavam ainda mais o processo, tornando-o atraente e competitivo em relação ao processo convencional (INTERNATIONAL IRON AND STEEL INSTITUTE, 1986).¹

No Brasil, o processo de lingotamento contínuo foi introduzido pela Companhia Riograndense em 1960, com uma máquina de tarugos de dois veios, seguida pela siderúrgica Dedini, em 1968, com máquina de tarugos de três veios (VALADARES e BEZERRA, 2002).²

A partir de 1972, cresceu o número de máquinas de lingotamento contínuo no Brasil. Em 1976, a Usiminas iniciou a produção de placas, com a instalação de duas máquinas de lingotamento com dois veios cada, seguida pela CSN, Acesita, Cosipa e CST. Atualmente, são 15 máquinas para produção de placas, perfazendo um total de 20 veios, e 23 máquinas de lingotamento contínuo de tarugos, com cerca de 70 veios (VALADARES e BEZERRA, 2002).²

A Figura 8.2 apresenta o fluxo de produção do aço utilizando lingotamento convencional, comparativamente com o fluxo de produção utilizando o lingotamento contínuo.

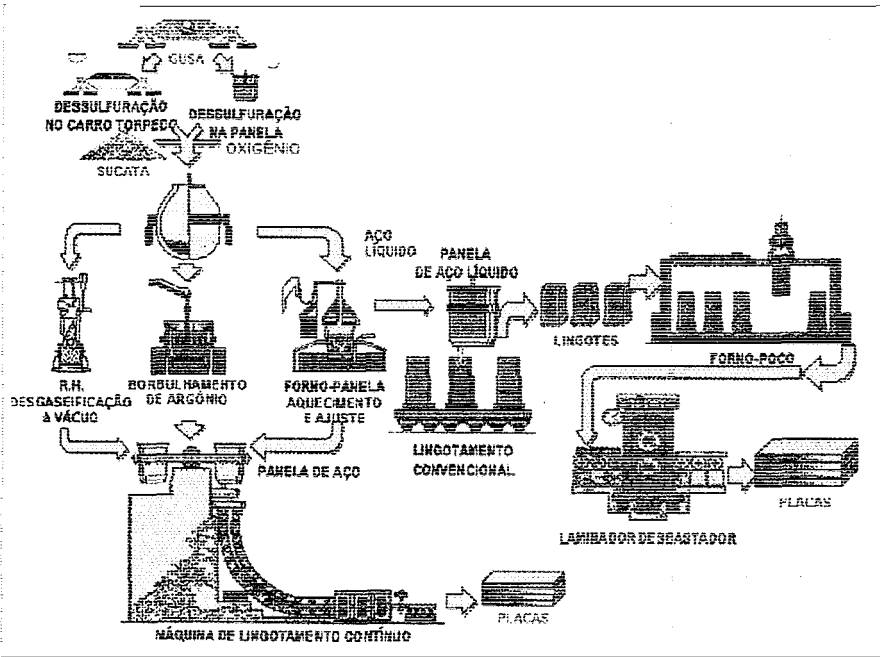


FIGURA 8.2 - Comparação entre o fluxo de produção de aço com lingotamento convencional e com lingotamento contínuo (AMERICAN IRON AND STEEL INSTITUTE, 2005).³

8.1 Tipos de Máquina de Lingotamento Contínuo

A Figura 8.3 apresenta os tipos de máquinas de lingotamento contínuo encontrados nas instalações produtoras de aço, desde o período inicial de criação das primeiras máquinas até os dias atuais (SCHIREWE, 1987).⁴

Lingotamento Contínuo do Aço

FIGURA 8.3 - Tipos de máquinas de lingotamento contínuo (WOLF, 2003).⁵

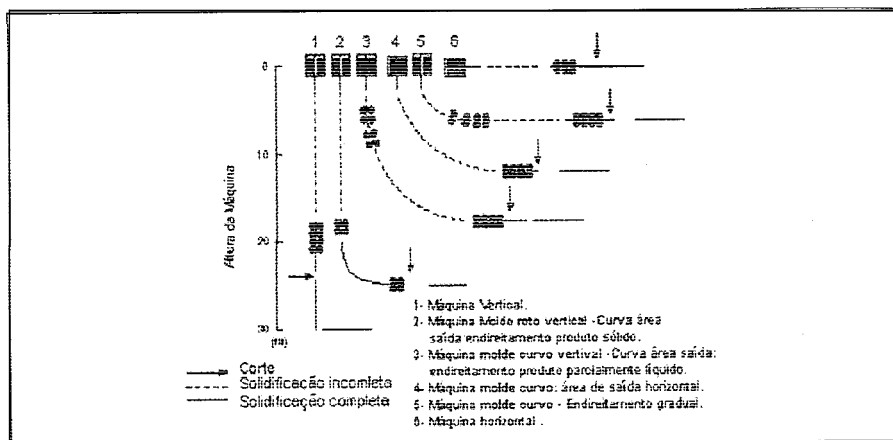
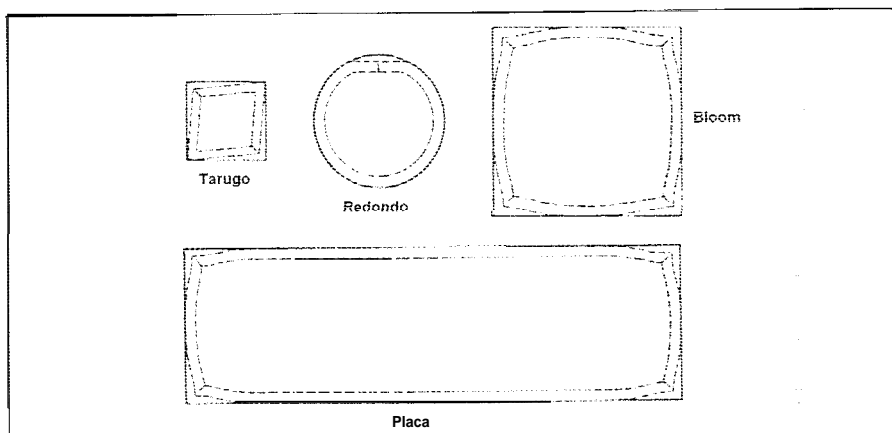


FIGURA 8.4 - Perfil dos produtos obtidos por lingotamento contínuo (SCHREWE, 1987).⁴



A Figura 8.4 apresenta exemplos de produtos produzidos por máquinas de lingotamento contínuo. A Tabela 8.1 fornece suas dimensões típicas. O comprimento de cada produto varia conforme o projeto do forno de reaquecimento existente na linha de laminação, e também com as limitações impostas pelo projeto da máquina. Porém, valores aproximados situam-se na faixa de 2.200 mm a 12.000 mm.

TABELA 8.1 - Dimensões produzidas em máquinas de lingotamento contínuo.

PRODUTOS E DIMENSÕES LINGOTADOS (mm)			
Placa	Tarugo	Bloco	Redondos
210 x 800 ~200	100 x 100	250 x 250	Ø175
250 x 1200 ~2200	150 x 150	300 x 400	Ø220

8.2 Descrição do Processo de Lingotamento Contínuo

Um esquema de máquina de lingotamento contínuo c= & ser observado na Fig: a 8.5; com exceção das máquinas horizontais, este esquema é típico das principais instalações industriais.

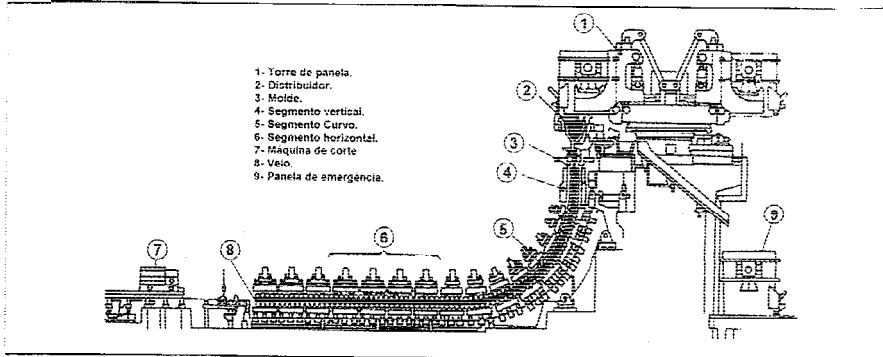


FIGURA 8.5 - Esquema de máquina de lingotamento contínuo (NIPPON STEEL CORPORATION, 1995).⁶

princípio básico do processo de solidificação do aço, utilizando uma máquina de lingotamento contínuo, compreende o vazamento do aço líquido verticalmente a partir de uma panela que está depositada em uma torre de panela (Figura 3.5, [1]) a caminho de um distribuidor (Figura 8.5, [2]), para dentro de um molde (Figura 8.5, [3]) de cobre refrigerado, aberto no topo e na base, conforme demonstrado pela Figura 8.6 a seguir.

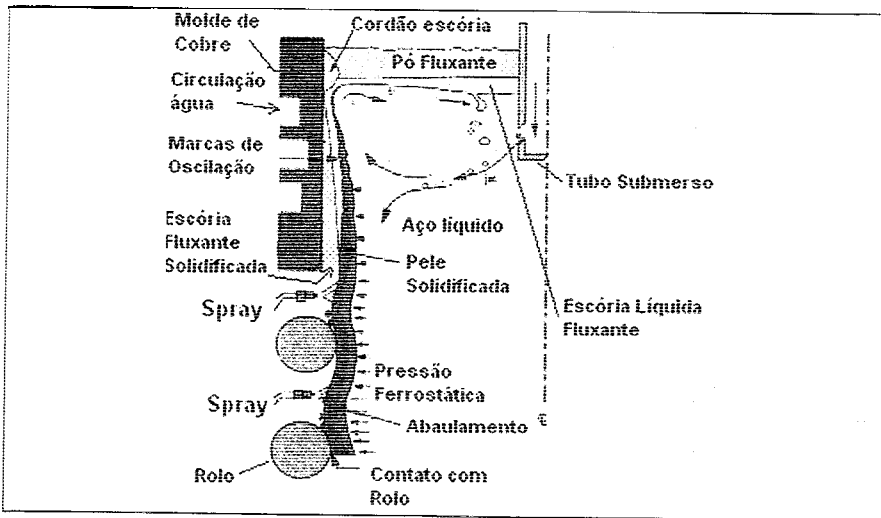


FIGURA 8.6 - Formação da pele solidificada (THOMAS, 2003).⁷

O calor é extraído do aço líquido e transportado através da parede do molde, por onde circula água, solidificando imediatamente o aço em contato com o molde, formando uma pele solidificada (Figura 8.6). Levado pelo movimento de extração da máquina, o invólucro formado pela pele aumentará em espessura. Durante este estágio, dois princípios são fundamentais para garantir o sucesso do processo, a saber:

- *O movimento de oscilação do molde:*

O molde oscila, alternando movimentos de subida e descida. Esses movimentos são ajustados através de dois parâmetros denominados curso e frequência. Curso é a distância em milímetros percorrida pelo molde no movimento de subida e descida, e frequência é o número de ciclos por minuto (cpm) com que o molde se desloca na vertical. O ajuste desses dois parâmetros definirá o poder de lubrificação do molde sobre o aço que está sendo lingotado, denominado tempo de estripamento negativo, que nada mais é do que o tempo em que a velocidade de descida do molde é mais rápida que a velocidade de extração da pele solidificada. Esse tempo deve ser maior que 0,20 segundos, para que não haja aderência da pele formada sobre a superfície do molde.

- *A lubrificação da pele solidificada:*

Em qualquer processo de lingotamento contínuo (placa, bloco, tartigo), um lubrificante é necessário, a fim de evitar a aderência da pele formada sobre a superfície do molde. No caso de lingotamento de placas e blocos, o lubrificante utilizado é denominado fluxante, e no caso de tarugos é utilizado óleo de colza. No estado líquido, eles deverão passar pelo vazio formado entre a pele solidificada e o molde, conforme indicado na Figura 8.6,

A pele sólida é suficientemente forte para conter o aço líquido. Ela deixa o molde, formando uma espécie de bolsa (ou invólucro), contendo em seu interior aço líquido, que será arrastado para o interior da máquina de lingotamento. A pele formada continua a aumentar em espessura e passa a sofrer a ação da força criada pela coluna de aço, à medida que deixa o molde. Sob a ação desta força, a pele solidificada tende a expandir provocando um fenômeno denominado abaulamento (Figura 8.6). Nesta fase, a pele solidificada irá encontrar um sistema suporte de pares de rolos, que a manterá pressionada, impedindo a sua expansão.

Para que a solidificação avance, após o material deixar o molde, o resfriamento é feito por um conjunto de chuveiros de água (*sprays*), distribuídos uniformemente ao longo da extensão da máquina, por entre os pares de rolos. O avanço da solidificação significa que ocorre um aumento gradativo da espessura da pele, até que se complete toda a solidificação do aço líquido existente no interior do invólucro.

A condução do veio por entre os pares de rolos existentes na máquina continua até a parte final do equipamento, que é onde está posicionado o último par de rolos, fixado em sua estrutura. Neste ponto da máquina toda a solidificação do veio, obrigatoriamente, deverá ter ocorrido.

Em toda a extensão da máquina, tem-se a formação de uma placa de grande comprimento em peça única, de comprimento equivalente à altura do nível de aço no molde até a máquina de corte, podendo chegar a aproximadamente 50m, dependendo do projeto de cada equipamento. Esta placa gigante (aqui denominado veio) será, então, seccionada em comprimentos definidos, conforme a aplicação final do produto.

Depois de cortada, placas, blocos e tarugos são devidamente identificados, conforme critérios específicos adotados por cada fábrica. Seguem o fluxo de produção indicado para cada tipo de aço produzido pela máquina. Podem, em situações especiais definidas pelo fabricante de aço, ser levados diretamente para a linha de laminação, sem a necessidade de uma inspeção prévia. Ou então, como normalmente acontece, são resfriados até a temperatura ambiente, para em seguida sofrer inspeção segundo padrão próprio de cada usina.

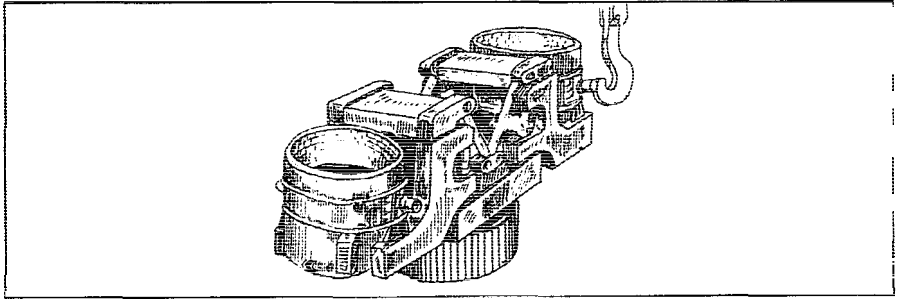
8.3 Principais Componentes que Integram uma Máquina de Lingotamento Contínuo

8.3.1 Torre de panela

É o primeiro componente de uma máquina de lingotamento contínuo, conforme apresentado na Figura 8.7. Torre de panela é uma grande estrutura metálica que permite a transferência da panela contendo o aço líquido tratado (entenda-se por tratado, aço homogêneo em termos de composição química e temperatura), proveniente da ala de refino secundário, para a ala de lingotamento. Essa transferência se dá através do giro da torre,

em percurso de 180°. O movimento é dado por força hidráulica capaz de suportar até 2 panelas cheias de aço líquido em cada um de seus braços (a capacidade da torre de panela varia em função do projeto de cada máquina). Esses equipamentos são dotados de sistemas de levantamento e abaixamento de panelas e de pesagem; algumas delas contêm tampas, para cobrir a panela, a fim de se evitar a perda de temperatura do aço líquido.

FIGURA 8.7 - Torre de panela, utilizada em máquina de lingotamento contínuo (NIPPON STEEL CORPORATION, 1995).⁶



8.3.2 Panela

A panela não é componente de uma máquina de lingotamento. Porém, como transporta o aço líquido para as máquinas, vale aqui tecer alguns comentários sobre este componente importante no processo produtivo do aço.

As panelas são recipientes metálicos, revestidos interiormente por refratários; sob sua base está localizado um dispositivo capaz de controlar a vazão do aço líquido que sai do seu interior, denominado válvula gaveta. As temperaturas de trabalho no interior da panela podem atingir aproximadamente 1.700° C. Graças à panela, é possível dar ao aço tratamentos especiais, a fim de torná-lo homogêneo e limpo, no setor de refino secundário. A Figura 8.8 apresenta uma panela e o dispositivo utilizado para controle de vazão de aço.

A panela possui, também, em sua base um sistema por onde se injeta gás argônio, para promover a homogeneização térmica do aço líquido, conforme mostrado na Figura 8.8.

A quantidade de aço possível de ser armazenada em uma panela varia com a capacidade instalada da aciaria. Em geral, a capacidade utilizada pelos fabricantes de aço situa-se entre 160 toneladas e 300 toneladas, para o caso de lingotamento de placas, e entre 50 toneladas até 100 toneladas, para o caso de tarugos.

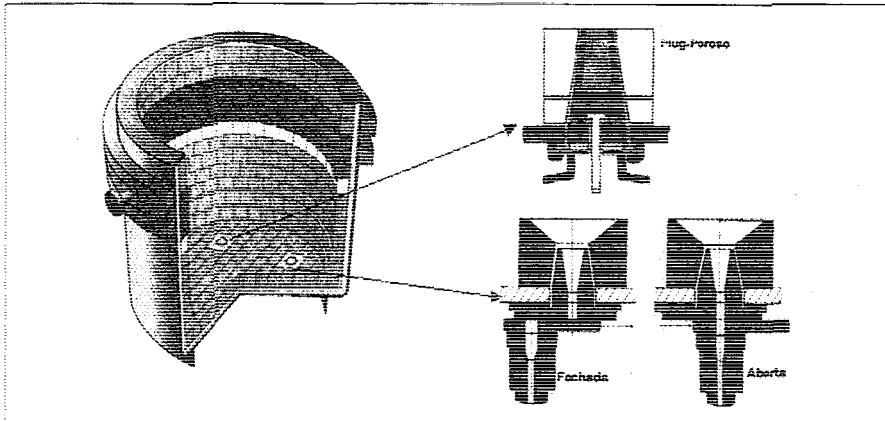


FIGURA 8.8 - À esquerda o perfil de uma panela de aço. À direita a representação de uma válvula gaveta e um sistema de *plug* poroso (KROSAKI CORPORATION, 1996).⁸

8.3.3 Distribuidor

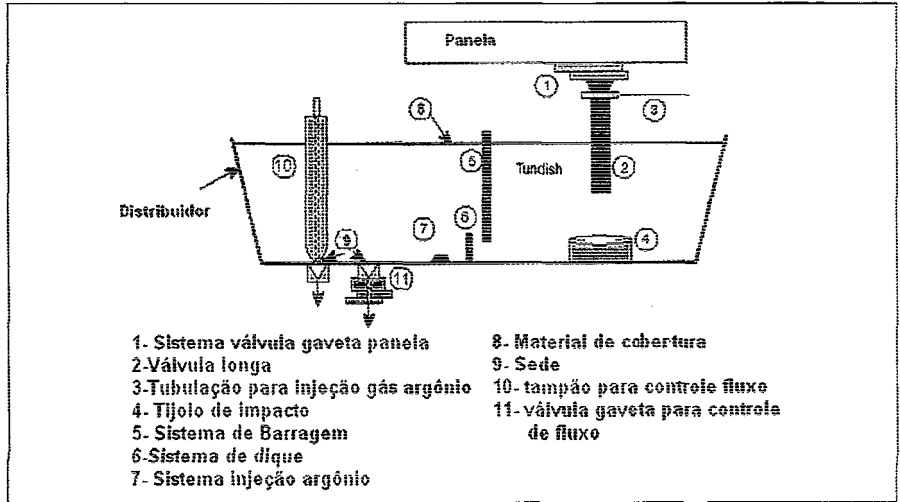
O distribuidor é um recipiente metálico revestido internamente por material refratário, para suportar temperaturas elevadas impostas pelo aço líquido, proveniente da panela. Pode possuir formas variadas, dependendo do projeto de cada fabricante. Alguns dos perfis mais comuns estão na forma de "V", "T", "C", "H". Os distribuidores utilizados em máquinas de lingotamento contínuo possuem as seguintes funções:

- Funcionar como um reservatório de aço líquido intermediário entre a panela e o molde, com a finalidade de permitir a troca da panela, sem que haja a interrupção da operação da máquina. Esta função torna o lingotamento contínuo altamente produtivo, pois é possível produzir uma série de corridas de forma ininterrupta.
- Permitir a flotação de inclusões, que são compostos não-metálicos, indesejáveis na estrutura cristalina do aço, capazes de afetar as suas propriedades mecânicas. A flotação ocorre porque no interior do distribuidor são dispostos sistemas de barragens e diques capazes de direcionar o fluxo de aço líquido, proveniente da panela, em direção à superfície do aço no distribuidor. A flotação ocorre, também, devido à diferença de densidade existente entre o aço e o composto não-metálico.

Os diques situam-se na parte inferior do distribuidor, e forçam a ascensão do aço líquido para a parte superior deste, fazendo que as inclusões

fiquem aprisionadas na escória e não retornem no banho metálico. As barragens situam-se na parte superior do distribuidor, e têm a função de represar a escória que eventualmente passou da panela em direção ao distribuidor. A Figura 8.9, apresenta desenho esquemático de um distribuidor utilizado em máquinas de lingotamento contínuo.

FIGURA 8.9 - Perfil de um distribuidor utilizado em máquina de lingotamento contínuo (SCHADE et al., 2003).⁹



São incorporados aos distribuidores elementos que permitem controlar a passagem do fluxo de aço líquido para o molde. O primeiro é o tampão, peça única feita em refratário, em forma de uma lança, situada sobre o furo de vazamento do distribuidor, conforme item [10] da Figura 8.9. O segundo é a válvula gaveta, posicionada sob a base do distribuidor, que possui um sistema de placas que se movimentam entre si, proporcionando o controle de fluxo do aço, conforme item [11] da Figura 8.9.

Durante o período de permanência do aço líquido dentro do distribuidor, ele ainda recebe alguns insumos que são adicionados sobre sua superfície com algumas finalidades específicas, a saber:

- *Isolante térmico* - Uma das palavras-chave em operação de lingotamento contínuo é a temperatura. Uma grande preocupação das equipes de operação está relacionada com as perdas térmicas que ocorrem durante a corrida. Se elas forem acentuadas, poderão acarretar problemas significativos à continuidade da operação. Quando a temperatura está baixa, muito próxima

da temperatura de solidificação do aço ($\pm 5^\circ \text{C}$), ocorrerá a obstrução da válvula gaveta da panela e, conseqüentemente, a interrupção da produção do aço, caso não haja outra panela para realizar a troca.

Outro caso a considerar é o oposto do primeiro, ou seja, temperatura muito alta ($\pm 50^\circ \text{C}$), acima da temperatura de solidificação do aço. Nesta situação, poderão ocorrer defeitos em placas ou até mesmo rompimento de veio (ver definição adiante), o que resultaria também na interrupção da produção.

Para conter estas variações acentuadas são adicionados, sobre a superfície do aço, produtos capazes de promover uma boa isolamento térmica, como, por exemplo, a palha de arroz. A adição é feita de maneira a cobrir toda a superfície do aço líquido no interior do distribuidor.

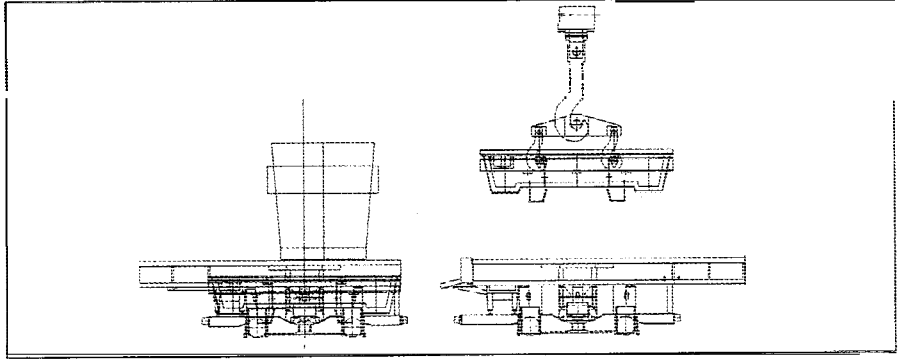
- *Escória sintética* - O aço ao chegar no distribuidor possui ainda em seu interior impurezas, tais como, nitrogênio, oxigênio, hidrogênio e inclusões não-metálicas. Alguns produtores de aço adotam a prática de adição de um tipo de escória sintética em distribuidor, a fim de conseguir valores de impurezas e inclusões mais baixos. O resultado é um aço com menor dispersão em suas propriedades mecânicas. Costuma-se adicionar a superfície do aço líquido no distribuidor produtos a base de cal, alumina, sílica, e magnésio (ZHANG e THOMAS, 1995).¹⁰

O tempo de utilização de um distribuidor em operação varia conforme a qualidade do material refratário utilizado. Em geral, consegue-se trabalhar com distribuidores em operação no lingotamento por tempos superiores a 12 horas. Durante a operação, um segundo distribuidor é aquecido a aproximadamente 1.100°C , para substituir o que está em trabalho. A troca de distribuidor representa uma das rotinas de operação de uma máquina de lingotamento e dura em média 3,5 minutos. O equipamento mais utilizado para realizar a troca do distribuidor é denominado carro de distribuidor, podendo também ser utilizada uma torre giratória. Um exemplo de carro de distribuidor é apresentado na Figura 8.10.

A capacidade do distribuidor varia conforme o projeto da máquina de lingotamento contínuo; pode atingir valores na ordem de 60 toneladas, para o caso de máquinas de placas, e de 20 toneladas para o caso de tarugos.

Lingotamento Contínuo do Aço

FIGURA 8.10 - Carro de distribuidor utilizado na operação de uma máquina de lingotamento contínuo (VOEST-ALPINE TECHNOLOGY, [2001?]).¹¹



8.3.4 Dispositivos de proteção do aço líquido

O aço líquido, ao sair do interior da panela e do distribuidor, deve estar sempre protegido do contato com a atmosfera. Os aços produzidos para lingotamento contínuo são sempre acalmados, ou seja, a quantidade de alumínio presente em seu interior é $> 0,02\%$. Uma vez acalmado, o aço líquido apresenta forte tendência a reagir novamente com o oxigênio. O ar atmosférico, neste caso, é considerado elemento nocivo ao aço líquido e o contato entre os dois deve ser evitado, caso contrário, serão introduzidas em seu interior impurezas indesejáveis. O processo de reagir novamente com o ar atmosférico é denominado reoxidação. Diversos dispositivos são empregados para evitá-la.

- **Válvula longa** - É um dispositivo cilíndrico em forma de um tubo, de material refratário, que pode ser conectado entre a panela e o distribuidor, cuja função é proteger o aço líquido no momento de sua transferência para o distribuidor. Seu constituinte principal é alumina-carvão, que confere ao dispositivo refratário a capacidade de suportar a agressividade do contato com aço líquido. A válvula longa é projetada de tal maneira que no contato entre o cone da válvula gaveta da panela e o topo da válvula longa possa ser injetado gás argônio em seu interior, evitando-se assim que o oxigênio da atmosfera seja arrastado pela passagem do aço. A sua dimensão varia conforme cada projeto de máquina, mas, apenas como referência, em máquinas de lingotamento de placas as válvulas longas podem chegar a 2 m de comprimento e 80 mm de diâmetro. A Figura 8.11 apresenta o aspecto construtivo de válvulas longas e um desenho esquemático de sua montagem na panela.

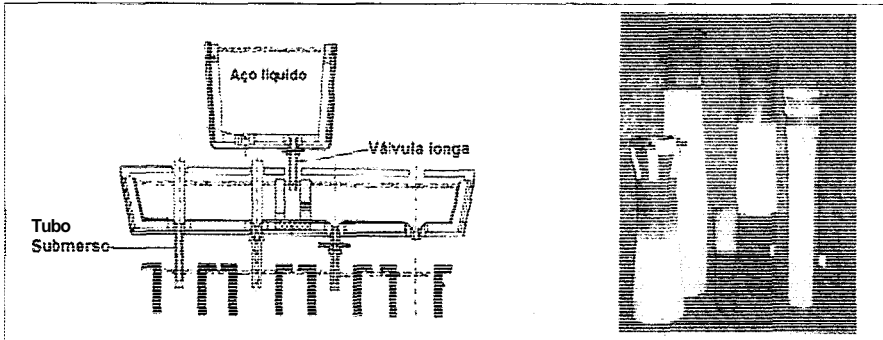


FIGURA 8.11 - À esquerda, uma figura de montagem da válvula longa sob a base de uma panela (WOLF,⁵ 2003). À direita, vários perfis de válvula longa (KROSAKI CORPORATION, 1996).⁶

- *Tubo submerso* - É um dispositivo cilíndrico elaborado em material refratário, tendo em sua composição, principalmente, alumina-zircônia-carbono, e tem a finalidade de conduzir o aço líquido proveniente do distribuidor para o molde. No contato formado pela conexão do tubo submerso com o distribuidor é passado gás argônio, a fim de formar uma selagem que evita que o ar atmosférico seja arrastado. Na saída do tubo submerso, geralmente, encontram-se furos laterais, posicionados paralelamente às paredes maiores do molde, que têm a função de direcionar o fluxo de aço líquido na direção das placas menores. Suas dimensões e formas são muito variadas e dependem do projeto idealizado pelo usuário, mas é razoável encontrar tubo submerso com comprimento de 900 mm e diâmetros dos furos de 70 mm. A Figura 8.12 dá mais detalhes sobre perfis e detalhes construtivos do tubo submerso.

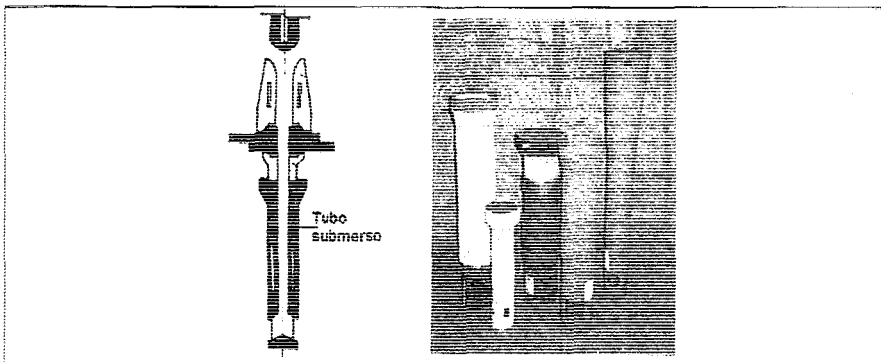


FIGURA 8.12 - A esquerda, representação esquemática da montagem do tubo submerso na base do distribuidor. A direita vários perfis de tubo submerso (KROSAKI CORPORATION, 1996).⁸

Por último, vale destacar que o processo de re-oxidação, além de ser danoso ao aço e suas propriedades, pode também causar danos ao processo

produtivo. Se a válvula longa e o tubo submerso não tiverem sido bem projetados para cada perfil de máquina, ou ainda, se durante a operação eles não estiverem sendo utilizados corretamente, podem ocorrer fenômenos como a obstrução dos canais por onde corre o aço líquido, devido à deposição de alumina, ou acidentes, como rompimento de veio, devido à alteração no comportamento da escória de flusante no interior do molde, que será descrito adiante.

8.3.5 Molde

É considerado a parte mais importante do processo de lingotamento contínuo. Nele, ocorre o início da solidificação do aço líquido proveniente do distribuidor, e é no molde que se definirá o perfil do produto, ou seja, espessura e largura no caso de placa e do bloco, a seção, redonda ou quadrada no caso de tarugo. Nas Figuras 8.13, 8.14 e 8.15 seguem exemplos de moldes de tarugo, bloco e placa, utilizados em lingotamento contínuo.

FIGURA 8.13 - Molde utilizado no lingotamento de tarugo (NIPPON STEEL CORPORATION, 1998).¹²

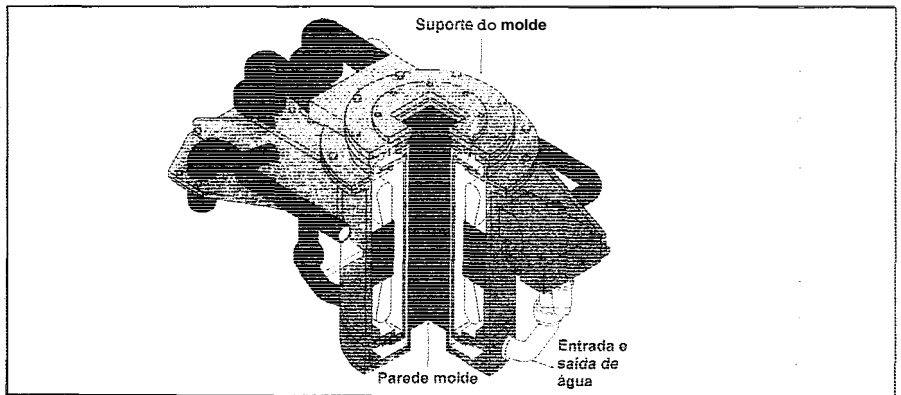
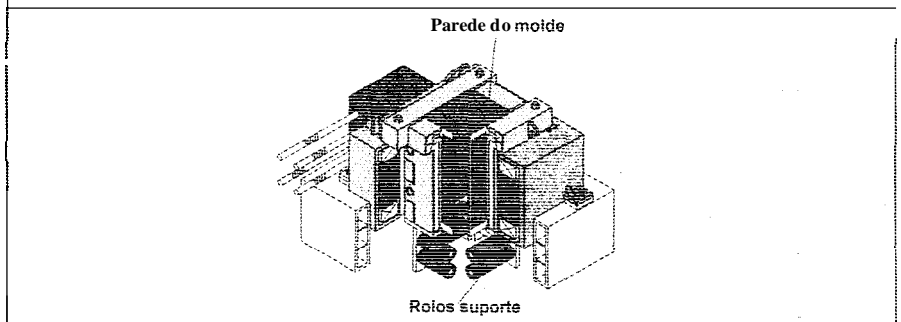


FIGURA 8.14 - Molde utilizado no lingotamento de bloco (NIPPON STEEL CORPORATION, 1998).¹²



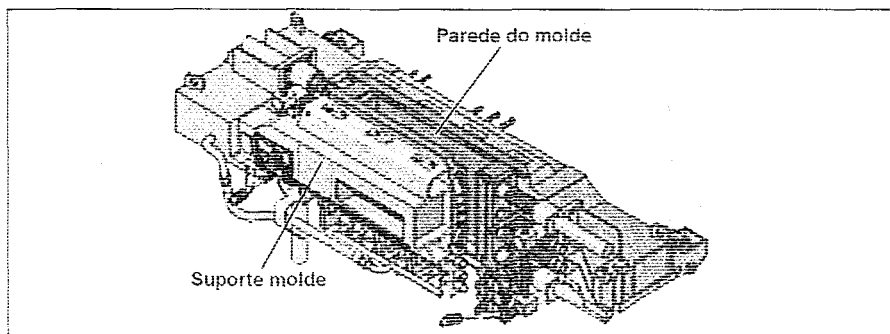


FIGURA 8.15 - Molde utilizado no lingotamento de placa (VOEST-ALPINE TECHNOLOGY, [2001?]).¹¹

- *Placas de Molde* - As placas de molde são fabricadas em cobre. Por possuir excelente condutividade térmica, o cobre é largamente utilizado em todas as máquinas de lingotamento contínuo. O cobre puro possui baixo ponto de amolecimento e, sendo assim, não suportaria o trabalho agressivo de contato com o aço líquido a elevadas temperaturas. Em sua composição química são adicionados elementos de liga que melhoram as suas propriedades, entre elas a dureza e a resistência ao desgaste. São exemplos de elementos que entram na composição da liga de cobre, o cromo, a prata e o zircônio (SCHREWE, 1987).⁴ Na parte posterior da placa de cobre, circula água de resfriamento, com velocidade controlada para garantir uma remoção de calor segura.

As placas de molde são fixadas através de parafusos em estruturas denominadas suporte, para que possam ser utilizadas na produção de aço. Esta fixação impede que as placas sofram deformação, o que poderia acarretar acidentes de grandes proporções. Somente no caso dos tarugos os moldes são inteiriços, já na forma final desejada para o produto.

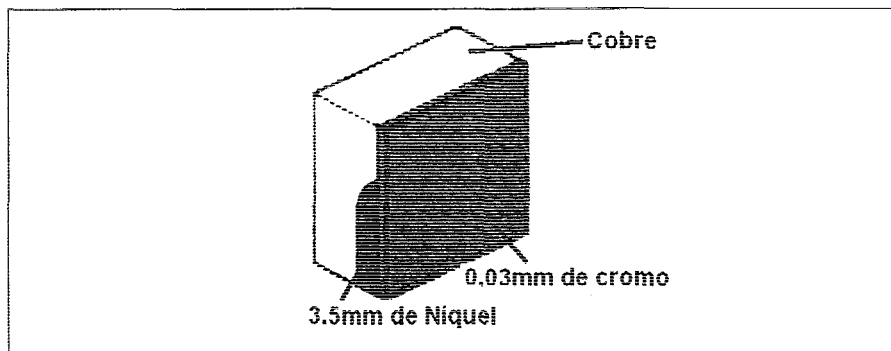
Tamanho do Molde - O comprimento ou altura do molde varia de 400 mm a 900 mm, de acordo com cada projeto. O comprimento é, usualmente, determinado em função da velocidade de lingotamento máxima empreendida pela máquina. Medidas de calor transferido através do molde mostram que altas velocidades de lingotamento requerem utilização de molde longo, para que a espessura da pele formada seja suficiente, a fim de suportar o veio.

Revestimento do molde - Além de elementos de liga em sua composição, as placas de cobre do molde são também revestidas, conforme Figura 8.16,

para suportar o atrito imposto pelo veio à sua superfície. São usados, para isto, elementos como o níquel e o cromo, que aumentam consideravelmente a vida do molde. A espessura deste revestimento varia em função da altura relativa do molde, sendo em sua metade inferior aplicado em espessura de até 3 mm, por ser esta a região de maior desgaste. Na metade superior a espessura do revestimento varia bastante; podendo chegar a 0,5 mm. O revestimento mais utilizado atualmente é o de níquel, que permite prolongar significativamente a vida do molde.

Após completado um ciclo de utilização, os moldes são recuperados, tendo suas partes usinadas por igual, e recebem no fim deste procedimento a aplicação de um novo revestimento.

FIGURA 8.16 - Típico revestimento utilizado em placas de molde.



- 6 *Inclinação nas Placas do Molde* - A fim de compensar a contração sofrida pelo aço dentro do molde durante a solidificação, as laterais das placas menores, em sua totalidade, são montadas de forma a terem uma inclinação no sentido da altura da placa, conforme Figura 8.17. Quando o aço se solidifica, ocorre contração do metal sólido, tendendo a se afastar das paredes do molde. As placas devem acompanhar esse afastamento da pele, para que diante da solidificação progrida a uma taxa constante, e não permita mal-formação da pele, o que ocasionaria a geração de defeitos no produto (SCHREWE, 1987).⁴ No caso de lingotamento contínuo de placas, as paredes menores do molde podem inclinar em até 1,2%/m de molde.

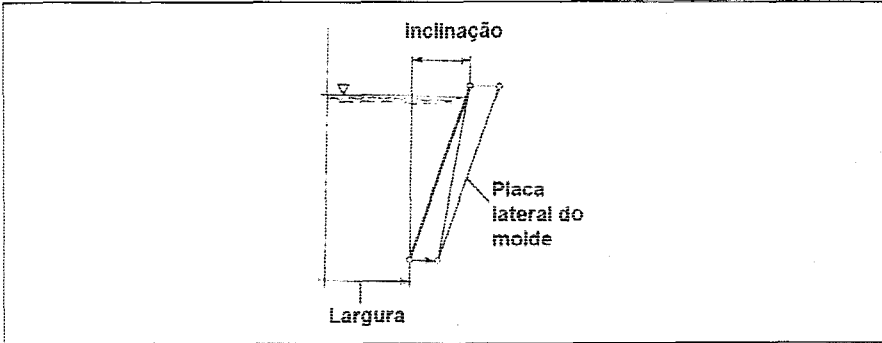


FIGURA 8.17 - indicação da inclinação da placa menor do molde (SCHREWE, 1987).⁴

- Oscilação do Molde** - A idéia principal da oscilação do molde é prevenir o agarramento da pele formada na solidificação do aço líquido em suas placas. A velocidade do movimento de subida e descida do molde é regida segundo uma curva do tipo senoidal, conforme mostra a Figura 8.18. Durante a execução desta curva existe um pequeno intervalo de tempo (superior a 0,20s), em que a velocidade do molde é maior que a velocidade de extração do veio (denominado tempo de estripamento negativo). Durante este tempo o *gap* formado pelo processo de solidificação é abastecido por um lubrificante líquido, fundido, denominado fluxante, que facilita a extração da pele, através da redução das forças de atrito existentes entre o veio e o molde, evitando assim o agarramento da pele.

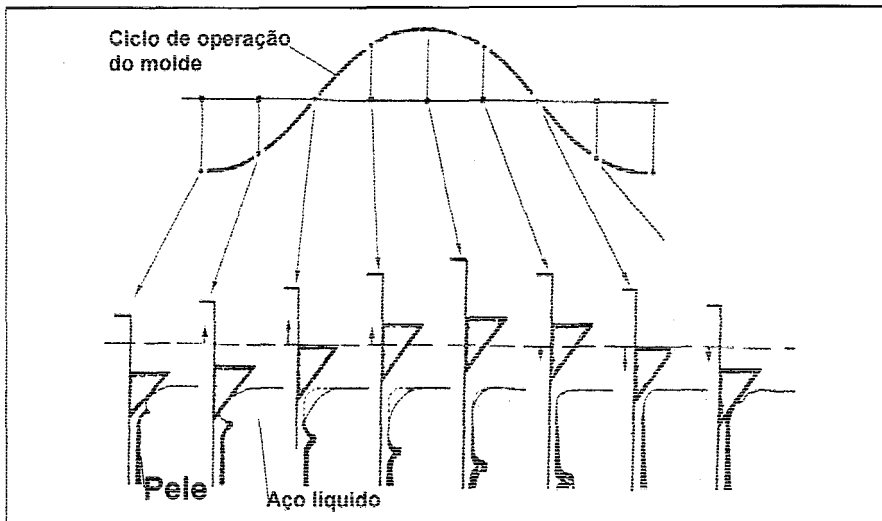
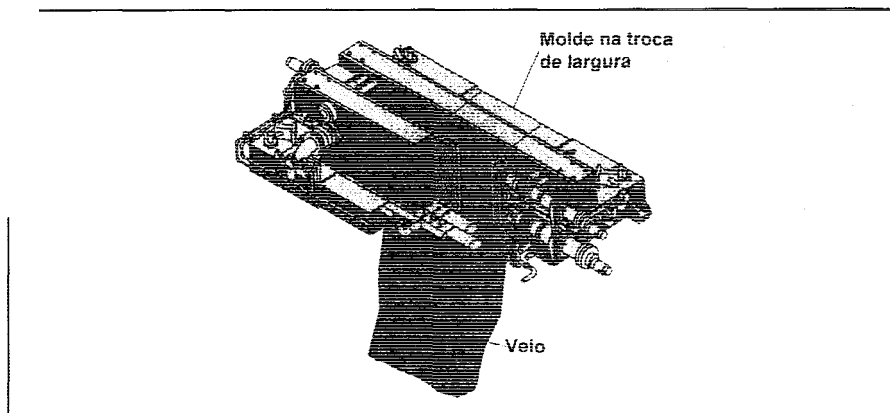


FIGURA 8.18 - Representação gráfica do movimento oscilatório do molde (INTERNATIONAL IRON AND STEEL INSTITUTE, 1986).¹³

- *Mudança de dimensão no molde* - O molde, através do ajuste de suas placas menores, permite que seja alterado o seu perfil de placa. Através do movimento de abrir e fechar das placas estreitas, torna-se possível regular a largura da placa. Esta mudança pode ser realizada com a máquina parada, ou seja, sem estar lingotando, ou ainda durante o processo de lingotamento, de maneira automática e controlada por computador. No caso de efetuar-se a troca em automático, uma perda metálica é prevista, pois, no deslocamento das placas menores, a forma da placa muda conforme o sentido de movimento, podendo ser na forma de um “Y” normal, quando as placas estão abrindo, ou “Y” invertido quando as placas menores estão fechando, conforme Figura 8.19.

FIGURA 8.19 - Mudança de largura no molde de uma máquina de placa (NIPPON STEEL CORPORATION, 1998).¹²



A troca de espessura do veio somente é possível mediante a troca da placa menor do molde por uma de menor ou maior largura, conforme a situação exija. Portanto, neste tipo de mudança, há necessidade de parar-se o equipamento para realizar a troca do molde e efetuar a abertura dos segmentos.

- *Outros sistemas incorporados no molde* - As máquinas de lingotamento contínuo possuem, atualmente, componentes incorporados à sua estrutura com o objetivo de torná-la segura e eficiente, capaz de produzir o produto a que se destina com qualidade. São exemplos destes componentes:
 - *Sistema de detecção de rompimento de veio* - O rompimento de veio é o nome que se dá a um tipo de acidente, comum em máquinas de lingotamento contínuo, onde a pele solidificada rompe-se, permitindo que

e aço líquido ainda não solidificado para dentro da máquina. Este tipo de acidente faz que o processo produtivo seja interrompido, ocasionando perdas, além de danificar as partes inferiores da máquina. O tipo mais comum de rompimento de veio é o colamento da pele do aço sobre a superfície do molde (79% das ocorrências). A Figura 8.20 apresenta característica do rompimento de veio por colamento, bem como uma indicação de outros principais tipos de rompimento de veio.

Para evitar este tipo de acidente, os moldes são dotados de termopares

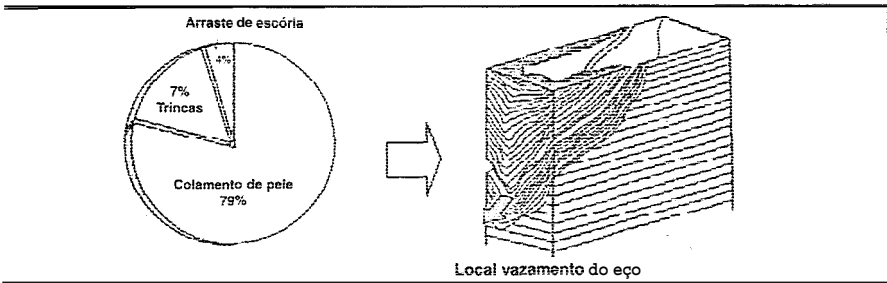


FIGURA 8.20 - Motivo de rompimento de veio comuns em máquinas de lingotamento contínuo (NIPPON STEEL CORPORATION, 2001).¹⁴

capazes de medir a temperatura da placa de cobre, conforme Figura 8.21. Os valores de temperatura coletados são enviados através de sinais eletrônicos a um computador, que analisa os dados através de um modelo. Quando o resultado da análise sinaliza uma tendência de colamento da pele do aço na superfície do molde, o modelo ordena a quase paralisação da operação imediatamente. Esta quase paralisação é temporária, apenas para que haja tempo de a pele deslocar da parede do molde e o processo ser normalizado novamente, sem sua interrupção. Para os demais tipos de rompimento de veio não há ainda sistemas desenvolvidos capazes de prevê-los.

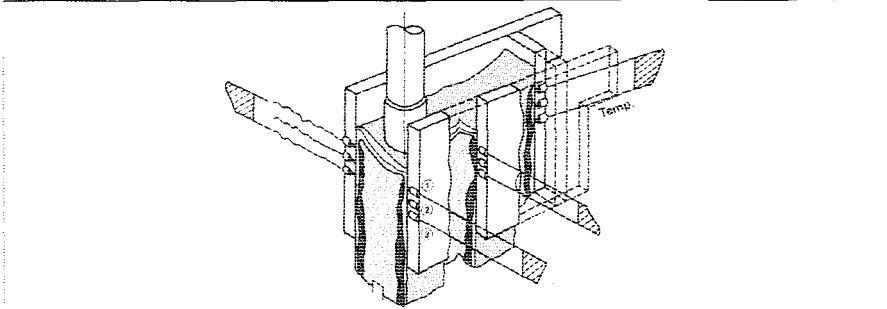


FIGURA 8.21 - Molde dotado de sistemas com medição de temperatura para detectar rompimento de veio por colamento (NIPPON STEEL CORPORATION, 2001).¹⁴

- *Controle do nível de aço no molde* - Um dos grandes segredos da qualidade das placas, blocos e tarugos produzidos via lingotamento contínuo é o controle de nível de aço líquido no molde. Variação de nível significa a mudança da posição da altura relativa do aço líquido no interior do molde. Mudanças toleráveis destas alturas, e desejadas pelos produtores de aço, situam-se entre 2 mm a 4 mm. Quando estas variações são mais acentuadas, acima de 8 mm, são esperados defeitos na superfície da placa, e também representam risco para a operação do lingotamento.

Para que o controle de nível seja estável, junto ao molde são colocados sensores que indicam a posição do aço líquido no interior do molde. Os sinais produzidos são rapidamente enviados ao computador, que interpreta e aciona o sistema de controle de vazão do aço líquido, mandando corrigir a atual posição. Toda esta operação é realizada em milésimos de segundo, o que garante pequenos deslocamentos no nível de aço no molde. Dessa forma, consegue-se uma produção muito mais estável do ponto de vista operacional e, também, um produto de excelência.

- *Pó fluxante* - São escórias sintéticas, à base de SiO_2 e CaO , adicionadas ao molde, durante a operação do processo de lingotamento, conforme Figura 8.22. Estes materiais fundem a uma temperatura em torno de 1.100°C , formando uma poça líquida de aproximadamente 15 mm de altura, que penetra no “gap” entre o molde e a pele solidificada, com o objetivo de evitar o seu agarramento. O fluxante pode ser produzido em forma de grão esférico, grão extrudado e, também, em pó. As propriedades fundamentais do pó fluxante para produção de aço via lingotamento contínuo são (MILLS, 1991):¹⁵
 - a- Ser rim bom isolante térmico;
 - b- Possuir característica de lubrificante;
 - c- Promover um fluxo de calor homogêneo entre a pele solidificada e o molde;
 - d- Possuir boa espalhabilidade, evitando a re-oxidação do aço no molde;
 - e- Absorver inclusões existentes no aço líquido.

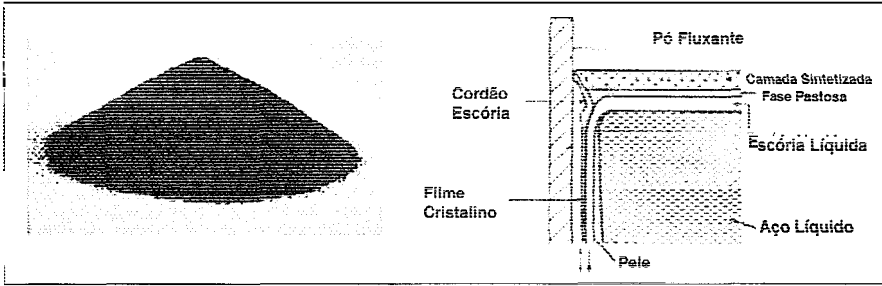


FIGURA 8.22 - À esquerda, uma foto do fluxante utilizado em operação do lingotamento contínuo (STOLLBERG & SAMIL, 2006).¹⁶ À direita, o comportamento do fluxante no molde (MACHINGAWUTA, BAGHA e GRIEVESON, 1991).¹⁷

8.3.6 Sistema suporte do veio

A pele que deixa o molde apresenta pequena espessura, em torno de 10 mm a 30 mm (SCHREWE, 1987;⁴ THOMAS, 2003).⁷ Desse modo, não possui resistência mecânica suficiente para suportar todo o peso da coluna de aço que carrega. Por isso deve ser mantida na mesma posição relativa que deixa o molde, ou seja, não pode haver abaulamento da pele (Figura 8.23) pela ação da pressão ferrostática, o que originaria problemas na qualidade superficial e interna do produto através da formação de trincas. Por essa razão as máquinas de lingotamento ganharam, abaixo do molde, um sistema de rolos dispostos em seqüência, cujo diâmetro aumenta à medida que se posicionam mais próximos da região horizontal da máquina. Além de suportarem o veio, têm também a função de conduzi-lo para fora da máquina dando lugar ao novo aço que por ela entra. O movimento de extração do veio é conseguido com alguns poucos rolos, que podem girar, acionados por motores.

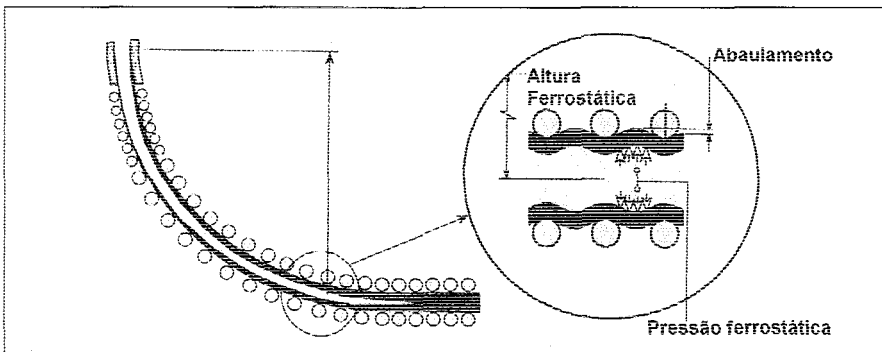


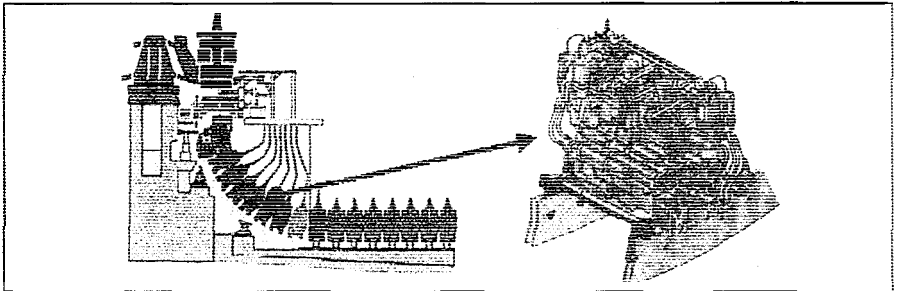
FIGURA 8.23 - Esforços sofridos pelo veio quando dentro da máquina de lingotamento contínuo (REYNOLDS et al., 2003).¹⁸

Lingotamento Contínuo do Aço

Os rolos são refrigerados internamente para que não se deformem quando em contato com o veio formado, cuja temperatura é da ordem de 1.300°C . São fixados por mancais lue, por a-vez, são fixados em grandes estruturas, formando o que se chama de segmento. Os segmentos, quando montados, são presos a uma viga habitualmente chamada de viga banana. A montagem completa de todos os segmentos na viga banana compõe a região da máquina denominada segmentos e rolos. A Figura 5.24 apresenta a região dos segmentos e rolos de máquina de lingotamento contínuo.

Cada segmento individualizado possui cilindros hidráulicos, que permitem o movimento de abrir e de fechar, com a finalidade de produzir espessuras diferentes na mesma máquina, além de terem a função de manter os rolos superiores sobre o veio formado durante o lingotamento, sem se deslocarem suando submetidos à ação da pressão ferrostática. Normalmente, uma máquina de lingotamento contínuo é projetada para produzir duas espessuras.

FIGURA 8.24 - À esquerda, a representação do arranjo dos segmentos na máquina de lingotamento. À direita, uma vista ampliada da fixação do segmento na máquina (REYMOLDS et al., 2003).¹⁸



Durante a produção de aço, e com o passar do tempo, os rolos fixados nos segmentos vão perdendo suas medidas de projeto, necessitando de ajuste. O desgaste é acompanhado através da avaliação da qualidade do produto gerado, utilizando ferramentas, como ensaio de Baumann (resultado macroscópico do interior da placa) e, também, da avaliação feita pela área & inspeção de qualidade da placa. Na medida em que são constatados desvios, a produção é paralisada e ajustes necessários são realizados.

A precisão de montagem é da ordem de $\pm 0,5\text{ mm}$, ou seja, para uma máquina de 10.000 mm de raio, o rolo deve ser ajustado com uma tolerância de $0,5\text{ mm}$, bastante apertado para um equipamento deste porte. Outra medida importante é a distância entre o rolo inferior e o rolo superior do

segmento (mais ou menos 0,5 mm de tolerância) chamado de espaçamento; esta medida representa a espessura da placa e deve ser rigorosamente ajustado, para que, também, não traga danos à qualidade do produto.

O ajuste dos rolos, conforme descrito anteriormente, pode ser realizado com a presença do homem no interior da máquina ou através de sensores montados na barra falsa (será descrito posteriormente), capazes de medir o perfil de ajuste apresentado por cada rolo montado no interior da máquina.

Os rolos existentes no interior da máquina de lingotamento contínuo são bipartidos ou tripartidos. São pequenos comprimentos suportados por mancais em sua parte central. A grande vantagem desta concepção de rolos é permitir que a deformação (d) sofrida pelo rolo seja reduzida, e com isso se consegue um produto de melhor qualidade (REYNOLDS et al, 2002).¹⁸ A Figura 8.25 apresenta o perfil de rolos em máquinas de lingotamento contínuo.

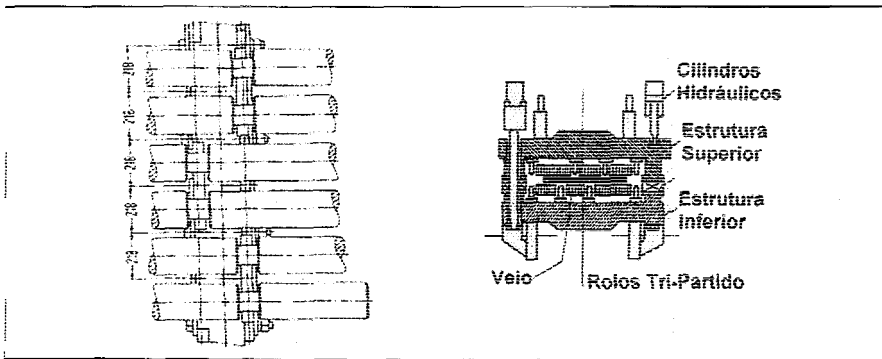


FIGURA 8.25 - À direita, a representação em corte dos rolos montados nos mancais sobre o segmento (SCHREWE, 1987).⁴ À esquerda, vista em corte do segmento apresentando a montagem dos rolos (NIPPON STEEL CORPORATION, 1995).⁶

8.3.7 Sistema de resfriamento secundário

O molde é a região da máquina onde acontece o primeiro resfriamento do aço, fazendo-o passar do estado líquido para o sólido. Por causa disso, costuma-se empregar o termo resfriamento primário ou indireto, pois a água de resfriamento não está em contato com o aço. Logo abaixo do molde, na região de suporte de rolos, encontram-se bicos de *spray* dispostos entre os rolos fornecendo água ao veio formado. À região da máquina que possui bicos de *spray* denomina-se zona de resfriamento secundário ou resfriamento direto, pois a água está em contato direto com o veio no processo de solidificação do aço.

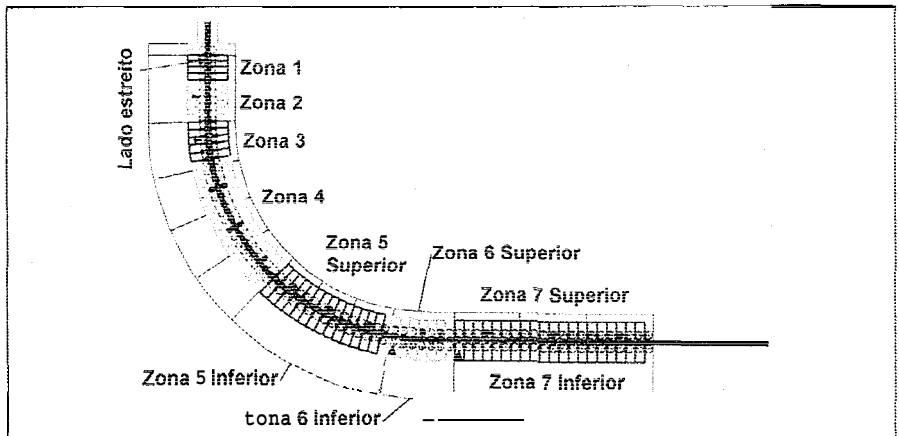
A solidificação do veio que passa por entre os rolos da máquina de lingotamento contínuo se dá através do borrifamento de água entre os rolos, e pelas seguintes formas:

- Resfriamento devido à radiação, por troca de calor do veio com o ambiente;
- Resfriamento devido à condução nos rolos; o veio, em contato com os rolos refrigerados, perde calor; e
- Resfriamento devido ao acúmulo de água nos rolos.

Há dois tipos básicos de resfriamento secundário. O primeiro é o chamado de resfriamento hidráulico, ou seja, pelos bicos do *spray* passa somente água para refrigerar o veio. No segundo tipo, e largamente utilizado pelas máquinas de lingotamento, ar e água são misturados, provocando a atomização da água, diminuindo o tamanho da gota, tornando mais eficiente a troca de calor com o veio; é o chamado *air-mist*. As regiões da máquina por onde são distribuídos os bicos de *spray* são denominadas zonas de resfriamento secundário (Figura 8.26), que possuem sistema de controle de vazão individualizado, para permitir uma distribuição de água de forma independente. A Figura 8.27 apresenta esquematicamente a disposição dos bicos em uma máquina de lingotamento contínuo.

No processo de lingotamento contínuo, agrupam-se os aços que são lingotados. A regra mais utilizada para realizar esta divisão e agrupar os aços

FIGURA 8.26 - Exemplo da distribuição das zonas de resfriamento secundário em máquina de lingotamento contínuo (REYNOLDS et al., 2003).¹⁸



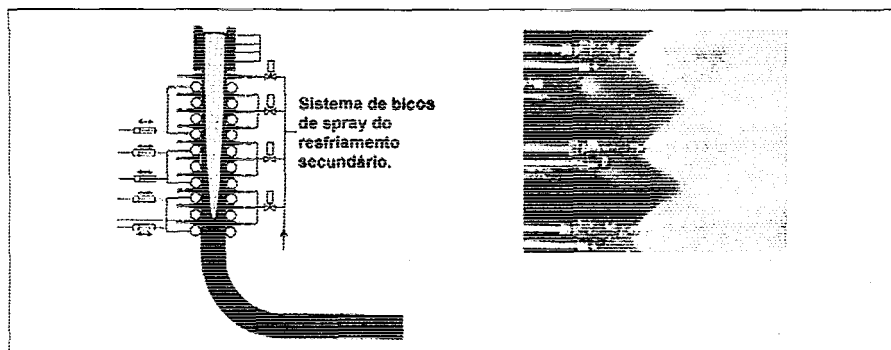


FIGURA 8.27 - Sistema de resfriamento secundário (BRASCUGLI e ai., 2000)¹⁹ e bicos de spray das máquinas de lingotamento contínuo. (STOLLBERG & SAMIL, 2006).¹⁶

pele teor de carbono e pela presença de elemento de liga em sua composição química. Para cada grupo de aço é definido um padrão de quantidade de água, em litros por quilograma de aço lingotado, para o resfriamento secundário. Por exemplo, para aços baixo-carbono sem liga, pode-se usar uma relação de 1,5 l/kg de aço lingotado. Com esta relação são calculadas as vazões por zona de resfriamento existente na máquina.

A forma como os bicos estão dispostos dentro da câmara de *spray* varia de acordo com o projeto de cada equipamento ou fabricante.

8.3.8 Pontos de empeno e desempenho da máquina

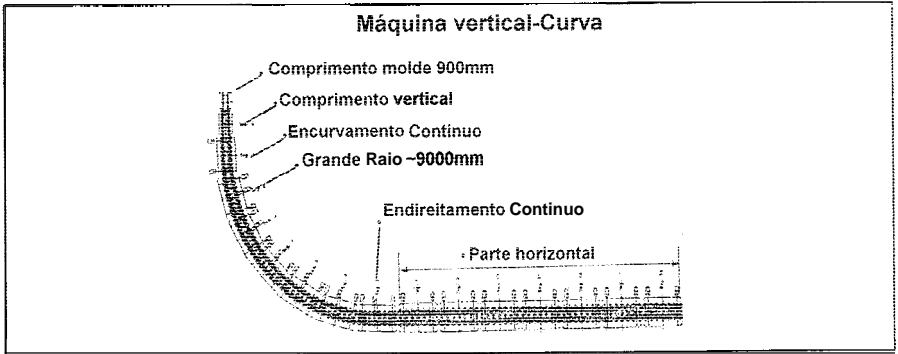
No início de seu desenvolvimento, o lingotamento contínuo utilizava máquinas do tipo verticais. Porém, observou-se que a edificação para este tipo de máquina era muito elevada, o que encarecia o projeto de construção. Isso exigiu dos projetistas encontrar uma maneira de reduzir o tamanho das instalações. Vieram as máquinas curvas, nas quais o molde acompanhava o raio de curvatura da máquina, para em seguida a placa ser descurvada.

Em seguida desenvolveu-se a máquina vertical-curva, com a proposta de melhorar a limpeza do aço, através da introdução de uma parte vertical de aproximadamente dois metros, para em seguida ser encurvada e posteriormente endireitada na parte final da máquina (Figura 8.28).

A grande maioria das máquinas de lingotamento contínuo possui curvas em sua configuração. O processo de encurvamento e de endireitamento do veio deve ser ameno, a fim de não provocar tensões sobre o produto formado, gerando defeitos que comprometam a sua aplicação final.

Lingotamento Contínuo do Aço

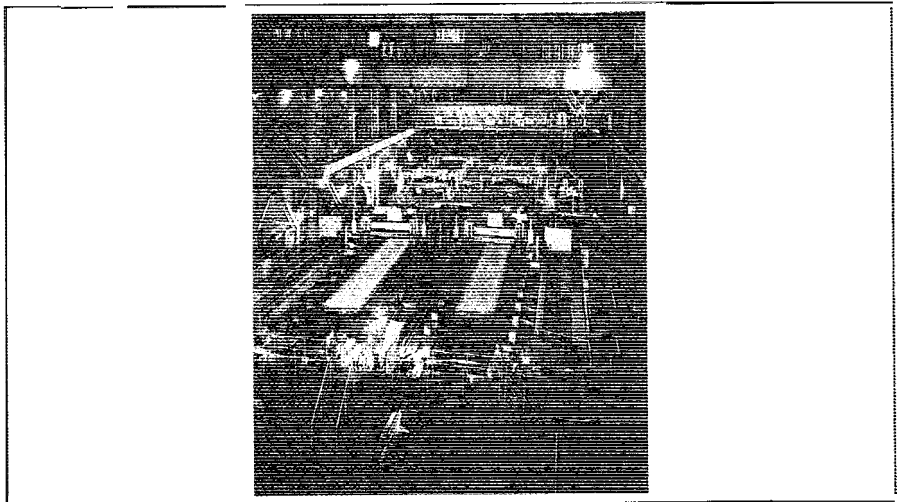
FIGURA 8.28 - Indicação dos pontos de encurvamento e de endireitamento da máquina de lingotamento contínuo (KAISER, KEMPER e LIEBISGH, 2002).²⁰



8.4.9 Máquina de corte

Após estar completamente solidificado, o veio formado chega até as máquinas de corte trazido pelos rolos extratores da máquina (Figura 8.29). Nesta etapa do processo o veio será fatiado em comprimentos, conforme um planejamento específico, a fim de atender a necessidade do cliente. Os comprimentos variam muito em função da aplicação final do produto, podendo situar-se numa faixa que se estende entre 2.200 mm a 12.000 mm. Atualmente, nas máquinas mais modernas, toda a operação de corte das placas, tarugos e blocos é controlada automaticamente, ficando a atuação do homem restrita à ocorrência de emergência.

FIGURA 8.29 - Máquina de corte de uma máquina de lingotamento contínuo de placas (NIPPON STEEL CORPORATIO, 1998).¹²



8.3.10 Barra falsa

Barra falsa é o equipamento responsável pela partida, ou início, do processo do lingotamento. Articulada, como se fosse uma espécie de corrente de grande porte, ela é introduzida dentro da máquina por cima e através do molde, ou por baixo, através do último par de rolo da máquina. Quando a cabeça se encontra no molde, ela é posicionada aproximadamente na metade inferior deste e é, então, selada. O comprimento da barra falsa pode variar dependendo do projeto da máquina, situando-se em torno de 13 metros a 15 metros. A Figura 8.30 apresenta desenho esquemático do corpo da barra falsa.

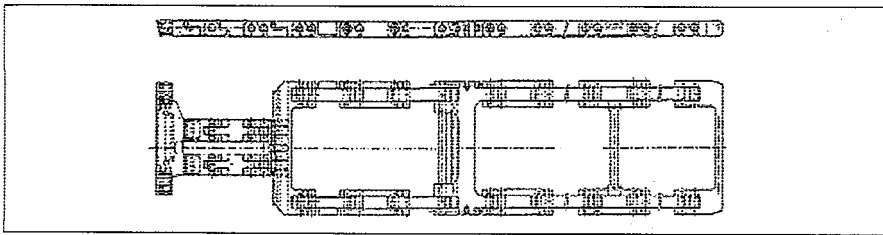


FIGURA 8.30 -
Representação
esquemática da Barra
Falsa (VOEST-ALPINE
TECHNOLOGY,
[2001?]).¹¹

8.3.11 Equipamentos complementares de uma máquina de lingotamento contínuo

Depois de cortado, o produto gerado pela máquina de lingotamento contínuo precisa de alguns retoques finais. Logo após a máquina de corte, está posicionado um rebarbador. Este rebarbador remove as borras deixadas na parte inferior dos produtos cortados, que necessitam ser removidos para não causar danos à própria qualidade do produto na linha de laminação, e também para não danificarem os equipamentos de laminação, como, por exemplo, os cilindros do laminador.

Após o rebarbador, são posicionadas as máquinas que registram identificação nos produtos, através de punção ou borrifamento de tinta. Estas máquinas imprimem no produto um número que identifica a corrida e a porção do veio seccionada, o que ajudará nas etapas seguintes de manuseio, além de permitir sua rastreabilidade.

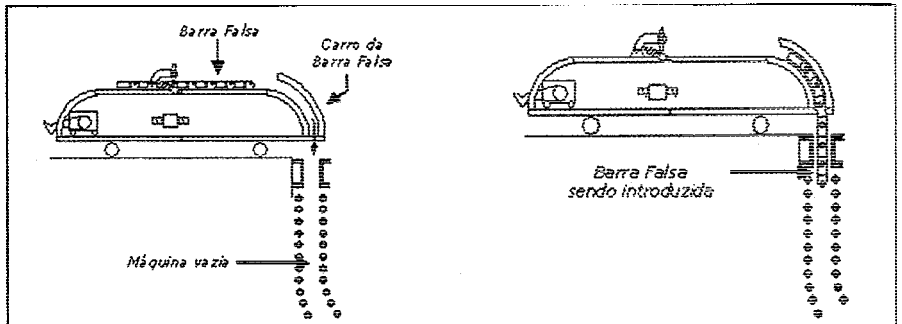
8.4 Iniciando a Operação de uma Máquina de Lingotamento Contínuo

Para dar a partida no processo de lingotamento, deve-se satisfazer um conjunto de condições para que tudo transcorra com sucesso. Desde a torre de panela até a máquina de corte, em toda a sua extensão a máquina deve estar vazia e todos seus componentes mecânicos, elétricos e hidráulicos devem ser checados, para que nenhum incidente ocorra no momento da operação.

8.5.1 Introdução da barra falsa

Após checar todo o funcionamento da máquina, a barra falsa é introduzida no interior da máquina. Vaie destacar que qualquer que seja a forma de introdução, por baixo ou por cima, a cabeça da barra falsa deverá ser a parte a ficar dentro do molde. A Figura 8.31 apresenta esta operação. As máquinas atuais utilizam um carro de barra falsa, que a conduz à parte superior do molde e ali faz que ela desça pela parte superior da máquina, iniciando pela calda da barra. Quando a barra falsa atinge o interior da máquina, rolos acionados por motores elétricos ajudam a movimentar toda a estrutura mecânica da barra falsa. A Figura 8.31 dá uma idéia de como isso acontece.

FIGURA 8.31 -
Introdução da barra falsa
no interior da máquina
de lingotamento.



8.4.2 Selando a cabeça da barra falsa

Dentro da máquina, os rolos acionados passam a segurar a barra falsa que, pela ação da gravidade, tende a descer pelo interior da máquina. Uma vez posicionada a cabeça da barra falsa dentro do molde, ela deverá ser selada. Selar a barra falsa significa fechar bem as folgas existentes entre o molde e a cabeça da

barra. Utiliza-se, para isso, um artefato à base de papelão, em forma de cunha que é posicionado nas folgas existentes. Materiais refrigerantes (molas e pequenas tiras de sucatas) são dispostos em seguida sobre toda a cabeça da barra falsa, para acelerar a solidificação do aço líquido que chegará ao molde, e, também, a fim de protegê-la contra danos derivados do contato com o aço líquido. A Figura 8.32 dá uma idéia de como esta operação é feita.

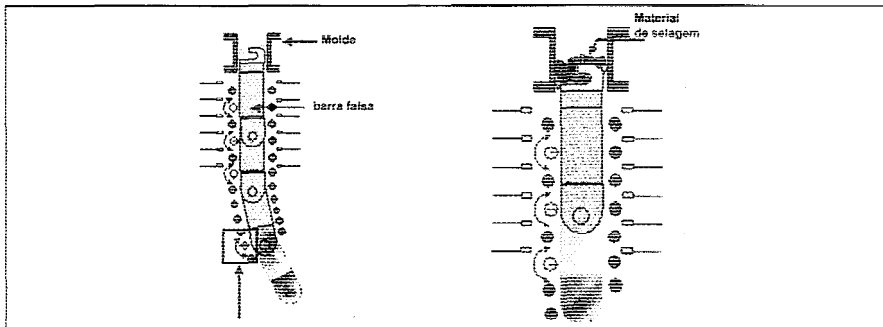


FIGURA 8.32 - Selando o molde para iniciar o lingotamento.

8.4.3 Iniciando o lingotamento

Terminada a selagem, a máquina está pronta para iniciar a operação. O início da operação se dá pela chegada da panela que contém o aço líquido na torre de panela. O distribuidor, aquecido de maneira adequada, é então posicionado sobre o molde e as válvulas submersas são adequadamente conectadas. Todos os insumos utilizados na operação da máquina, como, por exemplo, pó fluxante, válvula longa, tubo submerso, entre outros, estão disponíveis para uso.

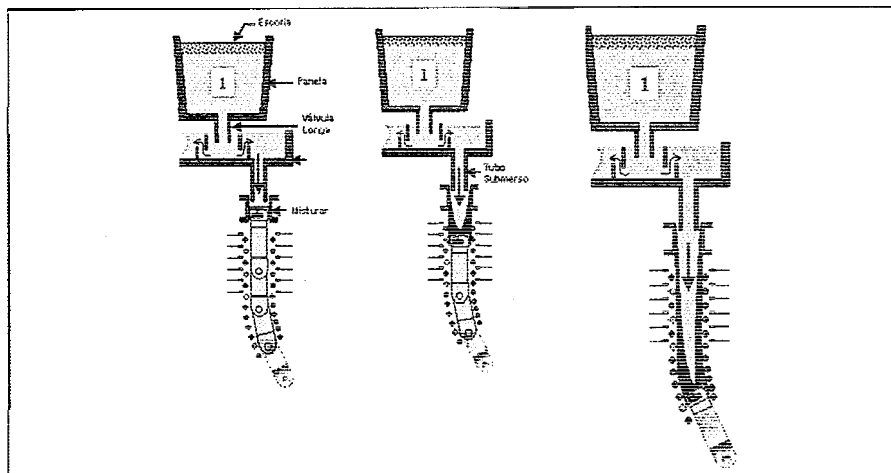
A panela é, então, posicionada sobre o distribuidor, e sob sua base é conectada à válvula longa. Em seguida, utilizando-se de comando de controle, a panela é aberta através da válvula gaveta e o aço líquido chega até o distribuidor. Nesta etapa, a preocupação é cobrir rapidamente o aço líquido com palha de arroz, a fim de evitar perdas térmicas acentuadas.

Decorridos alguns minutos, o distribuidor é aberto e o aço líquido chega dentro do molde. O enchimento deve ser adequado, nem muito lento, pois pode haver a rápida solidificação e má-formação da garra; e nem muito rápido, pois pode remover todo material de selagem, provocando acidente. Vale destacar aqui que quando o processo de vazamento no distribuidor é iniciado, a água que refrigera o molde é aberta para garantir a solidificação do aço que ali chega.

Quando o aço líquido preenche os furos existentes no tubo submerso, um fluxante exotérmico é adicionado sobre toda a sua superfície, com a função de fornecer calor ao topo do aço líquido, para que ele não solidifique rapidamente.

A operação de enchimento segue até que o nível de aço se aproxima do topo do molde. Neste momento, os rolos que estavam segurando a barra falsa são acionados e tem início o processo de extração do veio. No mesmo instante em que foram acionados os rolos para extração do veio que se forma, é acionada a oscilação do molde, para dar início à lubrificação da pele. O veio que começa a se formar encaminha-se para o interior da máquina, deixando o molde para trás. Ao sair do molde, a água de resfriamento é ligada e inicia-se a segunda etapa da solidificação. A Figura 8.33 ilustra esta operação.

FIGURA 8.33 - Início de operação de máquina de lingotamento contínuo.



8.4.4 A extração do veio

O veio segue sua caminhada pelo interior da máquina, passando pelos pontos de curvamento e endireitamento, no sentido de sua parte inferior. Antes, porém, é preciso desconectar a barra falsa. Isto acontece no momento em que a cabeça da barra falsa, mais o seio preso a ela, saem da máquina. Numa determinada posição, um cilindro hidráulico empurra a cabeça no sentido de baixo para cima, fazendo-a ser removida do veio formado. A Figura 8.34 mostra o momento da desconexão da cabeça da barra falsa do veio.

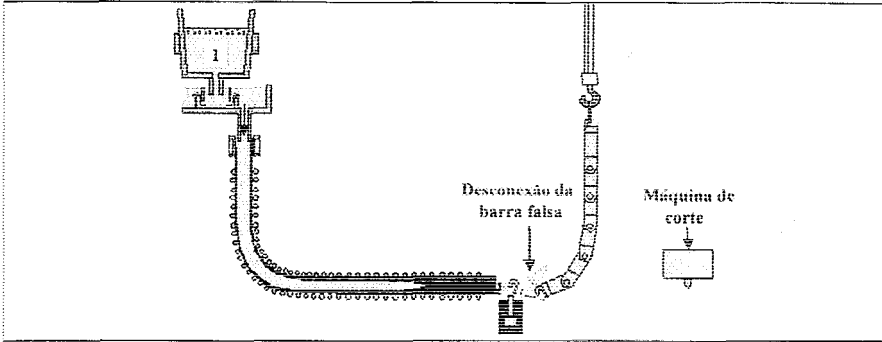


FIGURA 8.34 -
Desconexão tia barra
falsa do veio formado.

Após esta operação, o veio formado segue em direção à máquina de corte para ser seccionado, em comprimentos conforme a necessidade de cada cliente. A Figura 8.35 mostra a conclusão desta operação.

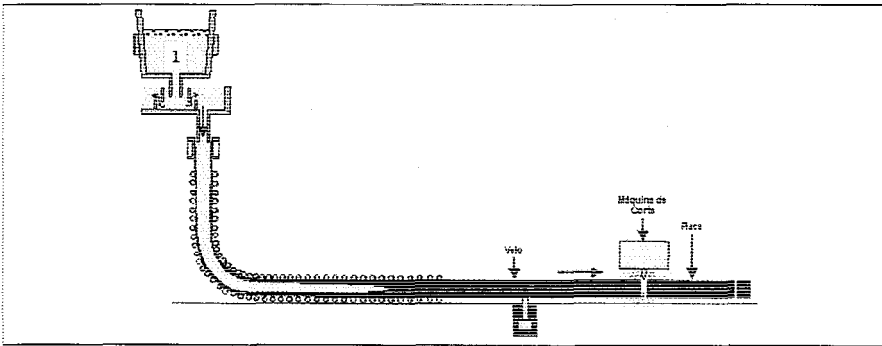


FIGURA 8.35 -
Seccionamento do veio,
após desconexão da
barra falsa.

8.5 Lingotamento de Aços Diferentes

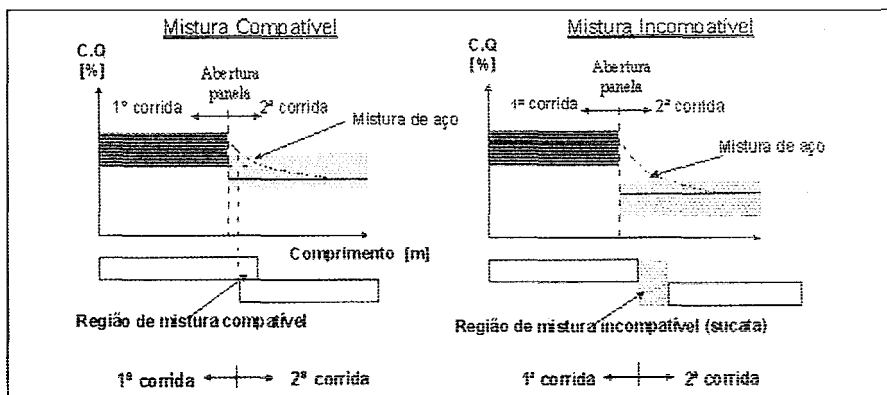
Um dos parâmetros que definem as propriedades mecânicas do aço é a sua composição química, ou seja, a quantidade de carbono, manganês, alumínio, nióbio, vanádio, entre outros, presentes no aço, irão conferir características específicas para atender às aplicações, que vão desde tubos para gasoduto, chapas para indústria naval e indústria automobilística até aplicações menos nobres, como, por exemplo, chapas para fabricação de piso.

O lingotamento contínuo produz toda essa gama de aço de maneira seriada e, como tal, um dos problemas que surge é a produção de placas cuja composição química varia ao longo de seu comprimento, ou seja, placas que terão propriedades mecânicas heterogêneas. São denominadas placas de

mistura ou de transição, originadas a partir do lingotamento de corridas cuja composição química difere uma da outra. Duas situações são possíveis, a saber:

- Placa de mistura ou de transição compatível, quando os constituintes químicos presentes na composição das corridas lingotadas estão contidos entre o limite superior e/ou inferior da faixa especificada;
- Placa de mistura incompatível, quando os constituintes químicos presentes na composição das corridas lingotadas não estão contidos entre o limite superior e/ou inferior da faixa especificada.

FIGURA 8.36 - Gráfico indicativo dos tipos de mistura possíveis no processo de lingotamento contínuo (VOEST-ALPINE TECHNOLOGY, [2001?]).¹¹



A Figura 8.36 apresenta como cada uma destas misturas pode ocorrer ao longo do processo de produção do aço. Placas de aço compatível podem ser aproveitadas para atender às demandas a que se destinam, enquanto as placas de aço incompatível são geralmente sucata, retornando ao processo como parte da carga sólida que comporá a formação da corrida no conversor ou forno elétrico.

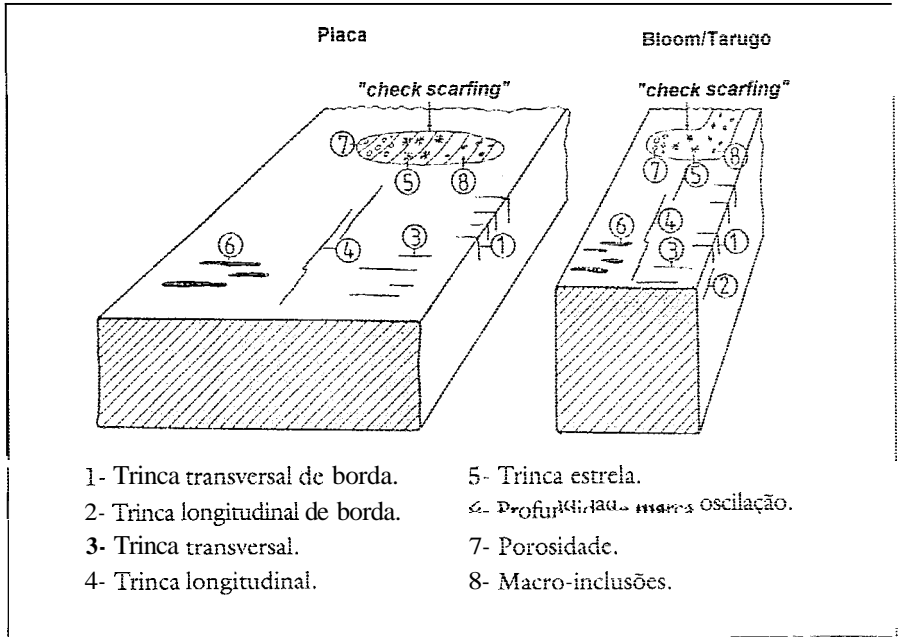
8.6 Qualidade dos Produtos Gerados no Lingotamento Contínuo

Assim que são cortados na máquina de corte, alguns produtos (placas, blocos, tarugos) de determinados tipos de aço podem ser enviados à linha de laminação. Amostra da seção transversal do produto é colhida para que seja verificada a sua qualidade interna através de um método denominado ensaio de Baumann, em que um exame macroscópico da qualidade interna do produto gerado é analisado através da classificação dos defeitos revelados na impressão. O método de Baumann é uma imagem impressa em papel fotográfico através

O produto lingotado pode, também, ser resfriado e inspecionado a frio, como acontece com alguns tipos de aço mais críticos, principalmente, com a presença de elementos de ligas, tais como, o nióbio e o vanádio. Estes aços apresentam propensão a gerar mais defeitos superficiais que os demais.

Os defeitos mais comuns apresentados na superfície de placas, blocos e tarugos são as trincas, conforme indicado na Figura 8.38.

FIGURA 8.38 - Representação esquemática dos defeitos mais comuns em placas, blocos, tarugos (INTERNATIONAL IRON AND STEEL INSTITUTE, 1986).¹³



Esses defeitos podem e devem ser removidos, para que não afetem a qualidade do produto acabado. A remoção acontece através de um processo denominado escarfagem. A escarfagem é um processo que utiliza um maçarico oxi-acetilênico de grande tamanho (± 1 metro de comprimento). O mesmo é posicionado sobre o defeito, promovendo a fusão da área circunvizinha e conseqüente remoção do defeito.

A escarfagem pode ser manual (quando realizada pelo homem com o maçarico) ou automática (quando realizada por uma máquina de escarfar). Ambos os procedimentos provocam perda metálica, devido à remoção do defeito, o que acarreta perda de rendimento.

Os produtos lingotados, cujos defeitos não se consegue remover pelo processo de escarfigem, são sucitados, retomando para a linha de refino, para compor a carga de uma outra corrida.

Assim que os defeitos são eliminados da superfície dos produtos lingotados, estes são enviados à laminação, para, posteriormente, serem transformados em produto acabado.

8.7 Tecnologias Emergentes no Lingotamento Contínuo

As indústrias siderúrgicas sabem que o maior custo existente na fabricação de aço recai sobre a redução primária (altos-fornos) e refino (aciaria). Neste sentido, buscam-se novas ideias capazes de reduzir o custo de operação das fábricas, a fim de melhorar a posição competitiva da empresa.

Alternativa para redução de custo tem sido o desenvolvimento de novos processos, que eliminem alguns passos intermediários ou combinem processos para reduzir perda de material e o consumo de energia, e utilizar menos mão-de-obra.

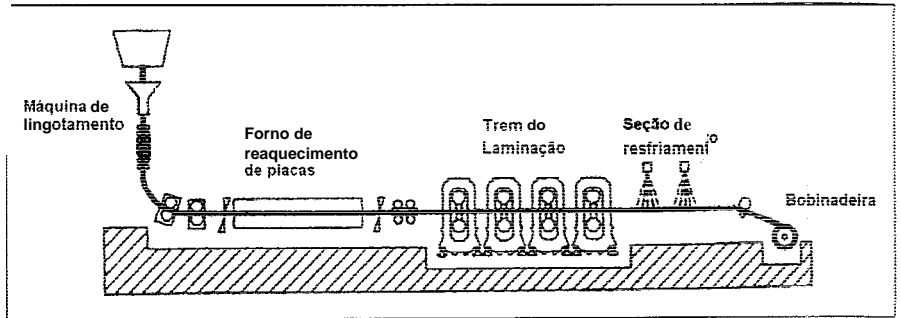
Nesse sentido, o desenvolvimento do lingotamento contínuo caminha para aproximar o seu produto da forma final do produto acabado. Alguns dos processos que vão nesta direção são comentados a seguir.

8.7.1 *Thin-slab casting*

Thin-slab-casting é a principal tecnologia emergente de lingotamento contínuo. Pode ser de placas consideradas finas, com espessura entre 40 mm a 70 mm, ou até mesmo de lingotamento de placas médias, com espessura entre 80 mm e 150 mm. Conectado a esta máquina de lingotamento está um forno de aquecimento das placas, que terão sua temperatura elevada e uniformizada, para em seguida serem laminadas. Como a chapa é de espessura fina ou média, um menor número de passes de laminação é requerido para obter o produto final. A Figura 8.39 apresenta esquema do processo *thin-slab-casting* (BIRRAAT, 2003).²¹

Lingotamento Contínuo do Aço

FIGURA 8.39 - Figura esquemática do processo *thin-slab casting* (BIRRAT, 2003).²¹

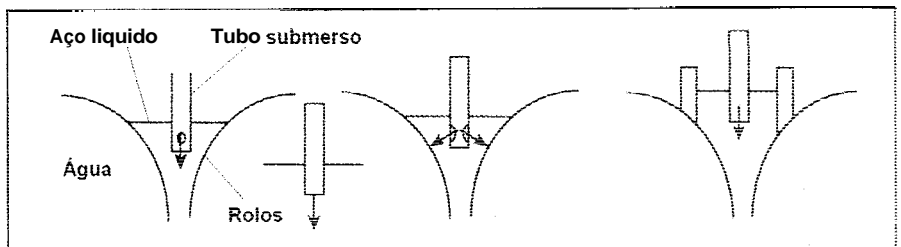


8.7.2 Strip-casting

A segunda mais importante tecnologia emergente no lingotamento contínuo é o *Strip-Casting*. A Figura 8.40 apresenta a concepção do processo, que pretende obter chapas finas diretamente a partir do aço líquido. O aço líquido solidifica-se através de moldes que funcionam como rolos, obtendo-se, assim, uma chapa fina de espessura entre 2 mm e 3 mm e larguras situando-se na faixa de 800 mm a 1.300 mm.

Adição de aço líquido, tecnologia do rolo, confinamento do molde e controle da força de separação do rolo são as principais áreas que ainda necessitam de desenvolvimento fundamental. Vale ressaltar que os detalhes sobre esta tecnologia não estão ainda disponíveis (BIRRAT, 2003).²¹

FIGURA 8.40- Processo obtenção chapa fina via lingotamento contínuo (BIRRAT, 2003).²¹



Toda a descrição realizada até aqui sobre o processo de solidificação de aço, utilizando-se de uma máquina de lingotamento contínuo, é representada esquematicamente na Figura 8.41. É possível observar as principais partes que compõem uma instalação: sua distribuição e uma idéia aproximada da dimensão que possuem alguns dos componentes.

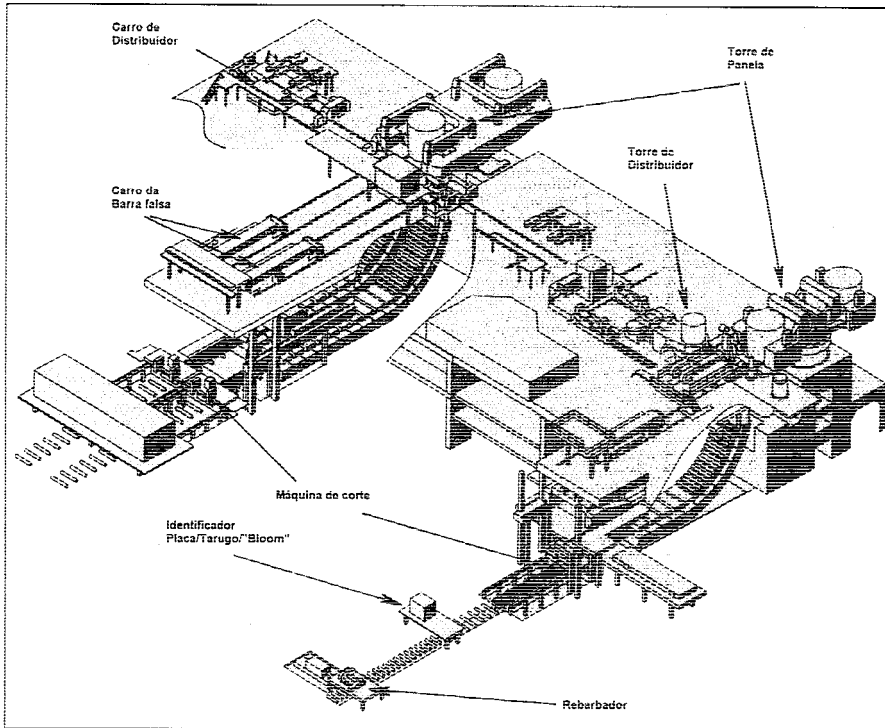


FIGURA 8.41 - Representação esquemática de uma instalação de lingotamento contínuo de placas (KAWASAKI STEEL CORPORATION, [2000?]),²²

REFERÊNCIAS

- 1 INTERNATIONAL IRON AND STEEL INSTITUTE. The first 25 years and the present position of continuous casting. In: _____. *Continuous casting of steel 1985 – a second study*. Brussels, 1986. p. 1-1 a 1-31.
- 2 VALADARES, C. A. G.; BEZERRA, M. C. C. Introdução. In: LINGOTAMENTO contínuo de placas. São Paulo: ABM, 2002. p. 1-14. [Apostila]
- 3 AMERICAN IRON AND STEEL INSTITUTE – AISI. Disponível em: <<http://www.steel.org/learning/flowline/index.htm>>. Acesso em: jan. 2005.
- 4 SCHREWE, H. F. Historical developments of continuous steel casting. In: _____. *Continuous casting of steel: fundamental principles and practice*. Düsseldorf: Stahleisen, 1987. p. 1-9.

- 5 WOLF, M. M. Historical aspects and key technologies. In: FRUEHAM, R.J. *Making and shaping casting*. Pittsburg: AISE Steel Foundation, 2303. p. 1-38.
- 6 NIPPON STEEL CORPORATION. Kimitsu Works. *Steelmaking plant*. [S.l.], 1995. [Catálogo]
- 7 THOMAS, B.G. Modeling of continuous casting. In: FRUEHAM, R.J. *Making and shaping casting*. Pittsburg: AISE Steel Foundation, 2003. p. 1-24.
- 8 KROSAKI CORPORATION. *Catálogo*. [S.l.], 1996.
- 9 SCHADE, J.H.; O'MALLEY, R.J.; KEMENY, F.L.; SHAI, Y.; ZACHARIAS, D.J. Tundish operations. In: FRUEHAM, R.J. *Making and shaping casting*. Pittsburg: AISE Steel Foundation, 2003. p. 1-70.
- 10 ZHANG, L.; THOMAS, B. G. Evaluation and control of steel cleanliness: review. In: _____. *Continuous casting*. Warrendale, PA: The Iron and Steel Society, 1335. p. 303-318.
- 11 VOEST-ALPINE TECHNOLOGY. *Manual de operação: máquina de lingotamento contínuo*. [S.l., 2001?].
- 12 NIPPON STEEL CORPORATION. Plant & Machine Division. *Catálogo*. [S.l.], 1998.
- 13 INTERNATIONAL IRON AND STEEL INSTITUTE. The metallurgy of continuous casting. In: _____. *Continuous casting of steel 1985 – a second study*. Brussels, 1989. p. 2-1 a 2-88.
- 14 NIPPON STEEL CORPORATION. Plant & Machine Division. *Technique for predicting and preventing breakouts*. [S.l.], 2001.
- 15 MILLS, K. C. The performance of casting powders and their effect on surface quality. In: IRON AND STEEL SOCIETY. *Mold operation for quality and productivity*. Warrendale, 1991. p. 85-88.
- 16 STOLLBERG & SAMIL. *Mold fluid*. Disponível em: <www.stollberg.co.kr/Product/>. Acesso em: 14 nov. 2006.
- 17 MACHINGAWUTA, N.C.; BAGHA, S.; GRIEVESON, P. Heat transfer simulation for continuous casting” In: IRON AND STEEL SOCIETY. *Mold operation for quality and productivity*. Warrendale, 1991. p. 127-134.

- 18 REYNOLDS, T.; FITZEL, H.; HARVEY, A.; JUZA, P.; MÖRWALD, K.; WINDER, E. The design of flat and long products casters. In: FRUEHAM, R.J. *Making and shaping casting*. Pittsburg: AISE Steel Foundation, 2003, p. 1-139.
- 19 BRASCUGLI, G.; MASCANZONI, A.; QUIX, F.; SCHWEHLENBART, J. *First CSP plant for stainless steel at AST*. [S.l.]: SMS Demag, 2000.
- 20 KAISER, H.P.; KEMPER, G.; LIEBISCH, K.-O. New slab casting technologies at the Hüttenwerke Krupp Mannesmann GMBH steel plant. In: EUROPEAN CONTINUOUS CASTING CONFERENCE, 4., 2002, Birmingham, England. [S.l. : s.ed.], 2002. p. 783-800.
- 21 BIRRAT, J.P. The future of continuous casting. In: FRUEHAM, R.J. *Making and shaping casting*. Pittsburg: AISE Steel Foundation, 2003. i. 1-30.
- 22 KAWASAKI STEEL CORPORATION. Steelmaking plant. Chiba Works. *Catálogo*. [S.l., 2000?].

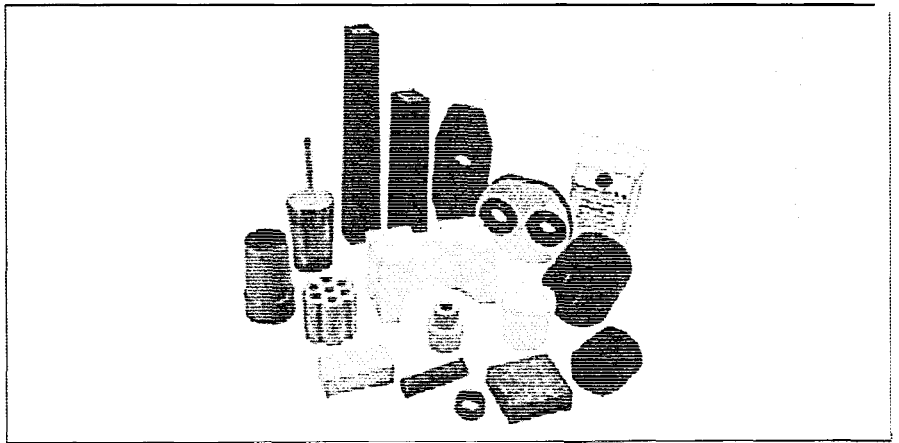
Os materiais refratários englobam uma vasta gama de compostos, usualmente óxidos ou misturas de óxidos, mas também outras substâncias, como: carbono, carbetos, nitretos, boretos etc. Os refratários apresentam propriedades físico-químicas, termodinâmicas e estruturais superiores em elevadas temperaturas, tais como: elevado ponto de fusão/refratariedade, resistência à corrosão química em meios agressivos (metais, escórias e fundentes), resistência mecânica, resistência às variações ambientais, estabilidade estrutural etc.

Em termos tecnológicos, os materiais refratários são classificados como materiais cerâmicos tradicionais, porém, avanços tecnológicos ocorridos nas últimas décadas em vários campos da Ciência e Tecnologia, decorrentes de pesquisa e desenvolvimento, engenharia de manufatura e engenharia de aplicação, têm transformado os materiais refratários em produtos altamente especializados, inovadores e de elevado grau de sofisticação.

As inovações desenvolvidas pela indústria de materiais refratários vão desde a otimização das microestruturas cerâmicas até a utilização de novas matérias-primas sintéticas, polímeros/compósitos de alto desempenho, sistemas dispersantes especializados, projetos assistidos por computador (CAD), simulação computacional por elementos finitos (FEM), fluidodinâmica computacional (CFD), equipamentos de aplicação robotizados etc. Tecnologias estas que visam garantir uma operação segura, ambientalmente amigável, com uma relação custo/benefício satisfatória entre as cadências de produção/utilização construídas a partir de relacionamentos de longa duração, baseados em parcerias de serviços de aplicação refratária, manutenção e assistência técnica.

A Figura 9.1 mostra a vasta variedade de formas, materiais e formatos dos refratários utilizados na indústria siderúrgica.

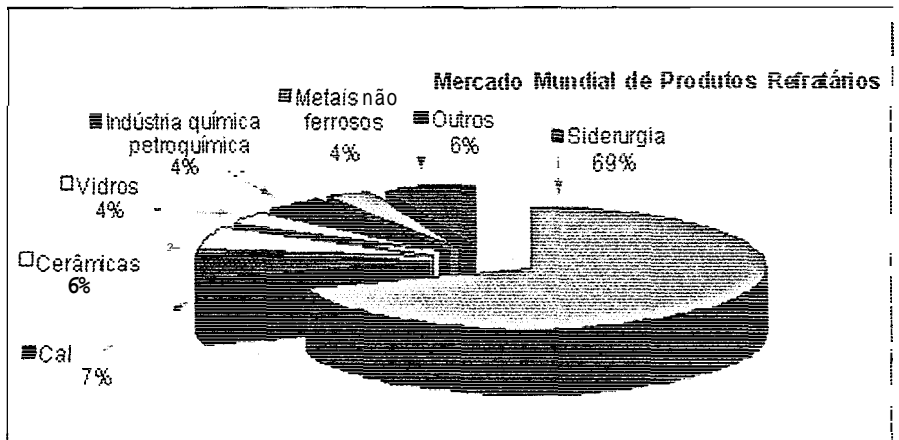
FIGURA 9.1 – Exemplos de produtos refratários utilizados nas várias etapas do processamento do aço (MAGNESITA S.A., 2004).¹



9.1 Evolução Tecnológica

A partir da segunda metade do século XIX, o desenvolvimento com maior embasamento científico dos refratários passou a dar seus primeiros passos, devido, principalmente, à evolução das indústrias de base onde eles são aplicados (Figura 9.2), em especial, a indústria metalúrgica/siderúrgica, indústria química, petroquímica, cimento e vidro. Após a Segunda Guerra Mundial, novos desenvolvimentos ocorridos em área de alto cunho tecnológico, como na indústria espacial e nuclear, adicionaram contribuições relevantes no campo dos materiais refratários.

FIGURA 9.2 - Distribuição do mercado de aplicação de produtos refratários (MILLER, 2000).²



A consequência direta da evolução tecnológica dos produtos refratários pode ser facilmente observada pela diminuição do consumo específico dos refratários, em razão da produção do aço (kg/ton de aço), como mostrado pela Figura 9.3 apresentado a seguir.

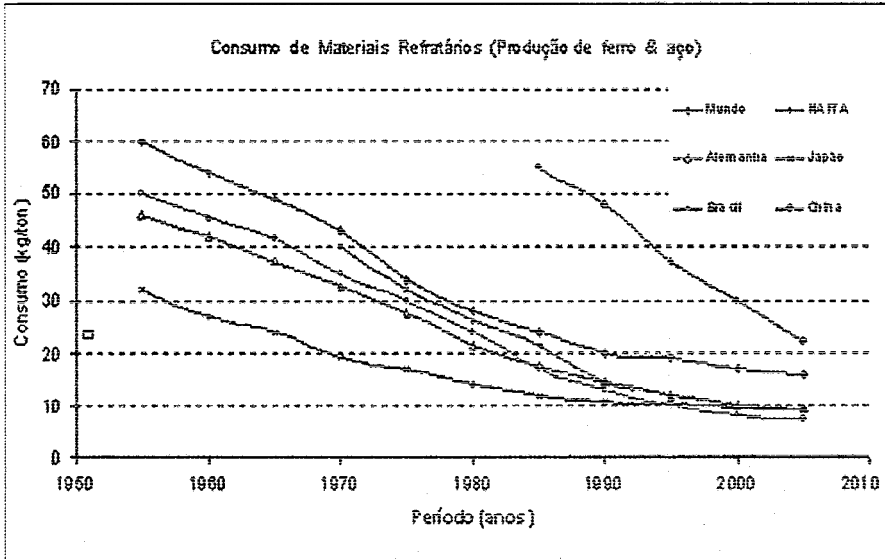


FIGURA 9.3 - Evolução do consumo específico de refratários [kg/ton aço] (MILLER, 2000; DUARTE et al., 2005; SEMLER, 2005).²⁻⁴

9.2 Classificações dos Produtos Refratários

Os produtos refratários podem ser classificados extensamente de várias formas, em função de sua composição química, densidade, fase termodinâmica majoritária, modo de aplicação, máxima temperatura de serviço, sistema ligante, sistema de aplicação, teor de cimento (%CaO) etc. A Tabela 9.1 resume algumas das possíveis classificações adotadas em refratários (CARNIGLIA e BARNA, 1992; LEE e MOORE, 1998; LEWIS, 1991; GRAYSON, 1985; HANCOCK, 1988; ABNT, 1997).⁵⁻¹⁰

Refratários para Siderurgia

TABELA 9.1 -

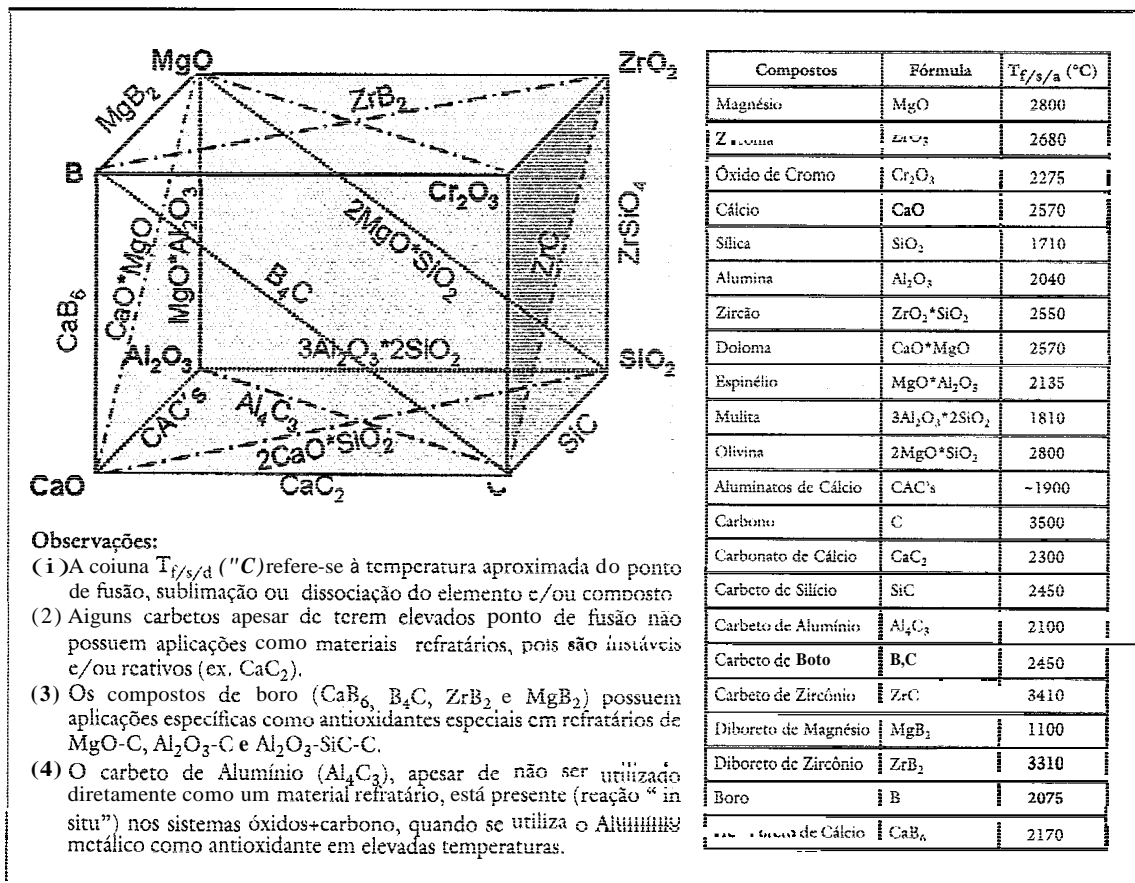
Classificações usuais dos produtos refratários

		MATERIAIS REFRAATÓRIOS
Quanto à presença de argila	Argilosos	Sílico-aluminosos etc.
	Não-argilosos	Magnésia-carbono, cromo-magnesianos, sílica etc.
Quanto ao tipo de matéria-prima	Naturais	Bauxito, grafita, cianita, andalusita, sillimanita, dolomita, magnésita etc.
	Sintéticas	Magnésia eletrofundida, mulita fundida, sílica, carbeto de silício etc.
Quanto à composição química majoritária	Aluminosos	Alumina, alta-alumina
	Sílico-aluminosos	Mulita, alumina-mulita etc.
	Cromo-magnesianos	Magnésia-crômica
	Alumina-carbono	Alumina-carbono
	Magnésia-carbono	Magnésia-carbono
	Dolomíticos	Doloma (cálcia+magnésia)
Quanto à acidez/basicidade	Zircônia	Zircônia (total ou parcialmente estabilizada por cálcia ou ítria)
	Ácidos	Sílica
	Básico	Magnésia-carbono, dolomita queimados, magnésia
Quanto ao tipo de processamento/aplicação	Neutros	Crômica
	Conformados	Tijolos, tijolos isolantes, válvulas, luvas
Quanto a densidade	Não-conformados	Concretos, argamassas, massas de projeção, massas de socagem
	Pré-moldados	Snorkels, lanças de injeção de gases/particulados
Quanto ao tipo de reação química em serviço	Densos	Tijolos, luvas, válvulas etc.
	Não densos	Tijolos isolantes, fibra-cerâmicas
Quanto ao tipo de ligação química	<i>In situ</i>	Tijolos e concretos contendo antioxidantes, espinelizáveis etc.
	<i>Ex-situ</i>	Tijolos queimados
	Liga direta	MgO-Cr ₂ O ₃
	Religados	MgO-Cr ₂ O ₃
Quanto ao tipo de fonte de carbono	Ligação via ácido fosfórico	Concretos
	Ligação via cromato	Argamassas
	Ligação via argila	Diversos
Quanto ao tipo de piche	Ligados a piche	Dolomíticos, magnésia-carbono
	Ligados a resina	Magnésia-carbono, alumina-magnésia-carbono, alumina-carbeto de silício-carbono etc.
Quanto ao tipo de impregnação	Piche líquido	Dolomíticos, magnésia-carbono etc.
	Piche sólido	Magnésia-carbono, alumina-magnésia-carbono, alumina-SiC-carbono, etc.
Quanto ao tipo de aplicação em serviço	Impregnados com piche	Magnésia-carbono, placas de alumina-carbono
	Não impregnados	Magnésia-carbono, alumina-carbono, alumina-carbeto de silício-carbono etc.
Quanto ao tipo de aplicação em serviço	Projetado	Diversos
	Vibrado	Diversos
	Vertido (alto-escoante)	Diversos
	Pré-moldados	Diversos, incluindo concretos, tijolos e isolantes

9.3 Sistemas Refratários e suas Principais Matérias-Primas

Uma das características mais importantes dos materiais refratários é a sua capacidade de serem aplicados em condições extremas de temperatura (>1.580° C) em ambientes corrosivos, sujeitos a interações complexas com metais e escórias líquidas, mantendo suas propriedades estruturais e físico-químicas, além de minimizarem as perdas térmicas nos sistemas onde são utilizados. O conjunto destas características necessárias aos materiais refratários limita a ocorrência de uns poucos compostos químicos naturais ou sintéticos que satisfazem estas exigências. A Figura 9.4 apresenta de forma esquemática os principais óxidos, carbetos e boretos utilizados nos sistemas refratários.

FIGURA 9.4 - Os principais sistemas: óxidos / carbetos / boretos utilizados como materiais refratários (HANCOCK, 1988; LEE e RAINFORTH, 1994; RAHAMAN, 2003; HAPER, 2001), 9.11-13



Refratários para Siderurgia

As matérias-primas refratárias podem ser divididas em duas grandes famílias: naturais e sintéticas. A utilização de uma ou de outra ou ainda de ambos os tipos de matérias-primas nas formulações refratárias depende de um balanço entre as propriedades desejadas e a custo do produto, uma vez que, via de regra, as matérias-primas sintéticas possuem um custo muito mais elevado.

TABELA 9.2 - Principais matérias-primas utilizadas em formulações refratárias

MATÉRIAS-PRIMAS NATURAIS	MATÉRIAS-PRIMAS SINTÉTICAS
Argilas:	Aluminas calcinadas/reativas
- silimanita/ cianita/ andalusita: $(Al_2O_3 \cdot SiO_2)$;	Aluminas eletrofundidas (branca ou escura)
- caoliníia $(Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O)$;	Espinélios eletrofundidos $(MgAl_2O_4, MgCr_2O_4 \text{ etc.})$
- pirofilita $(Al_2(Si_2O_5)_2(OH)_2 \text{ etc.})$	Cromita eletrofundida
Magnesia calcinada (Magnesita - $MgCO_3$)	Zircônia estabilizada
Dolomita calcinada (Dolomita - $CaMgCO_3$)	Mulita eletrofundida
Bauxitos calcinados $(Al_2O_3 \cdot 2H_2O)$	Sílica fundida
Grafitas (C)	Carbetos, boretos, nitretos, sialon.
Quartzo (SiO_2)	Aditivos & ligantes: resinas, pós metálicos, piches etc

Fonte: CARNIGLIA e BARNA, 1992; LEE e MOORE 1998 LEE e RAINFORTH, 1994 5-6,11

O beneficiamento das matérias-primas pode ser o mais diversificado possível em função do tipo de mina, mineral, ganga etc. De uma maneira geral, as matérias-primas naturais sofrem tratamentos que vão desde a britagem, moagem, classificação, flotação, deslamagem e separação magnética até a calcinação. As matérias-primas sintéticas usualmente passam por eletrofundição, britagem, moagem, separação magnética e classificação granulométrica

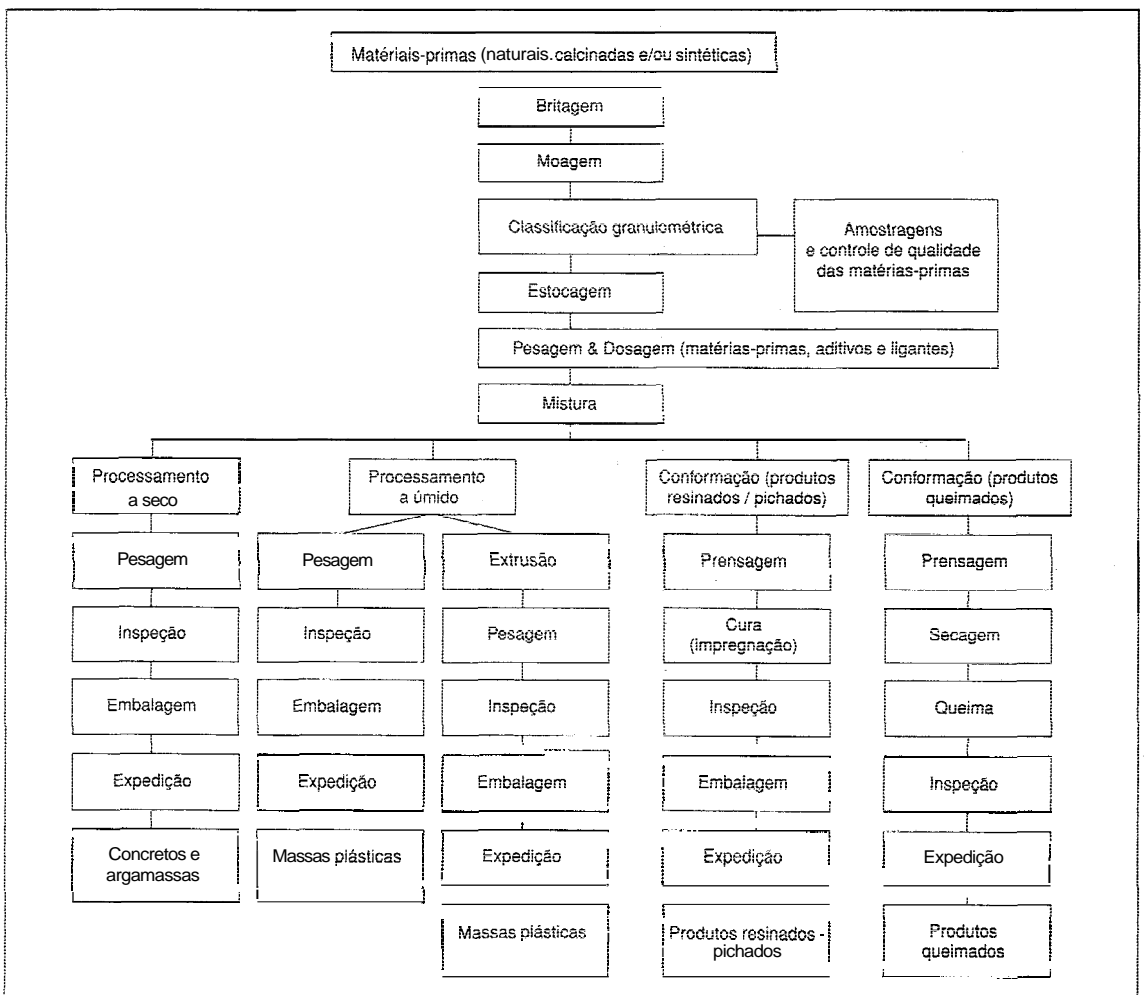
9.4 Processamento dos Materiais Refratários

Os materiais refratários usualmente podem ser divididos em duas grandes classes, de acordo com o tipo de processamento recebido. São elas: refratários conformados ou formados, que recebem sua forma final durante o processamento no fabricante dos produtos refratários, como: tijolos, válvulas, placas de controle de fluxo de aço, luvas etc.; e os refratários não-moldados (monolíticos), cuja forma final da peça refratária será obtida na aplicação do material ou na produção de peças pré-moldadas (estrutura metálica + concreto refratário, com ou sem tijolos e isolantes).

As propriedades e características dos refratários formados e não-moldados variam bastante, não existindo uma regra universal que defina a escolha entre um ou outro tipo. Basicamente, a especificação no projeto da estrutura refratária passa por uma ampla análise de custo/benefício, esforços termomecânicos, tempo de aplicação, possibilidade de ancoramento, facilidades para projeção e secagem, tipo de ambiente, formato do reator, ciclo de operação, treinamento da mão-de-obra, entre muitos outros.

A Figura 9.5 apresenta o fluxograma geral dos fluxos de produção de refratários conformados (formados) e não-moldados (monolíticos).

FIGURA 9.5 - Fluxo geral de produção dos refratários conformados e não-moldados/monolíticos (ASSOCIAÇÃO..., 2006; TECHNICAL..., 1998; ABNT, 1997).14-16



9.5 Propriedades Gerais

O conhecimento das propriedades dos materiais refratários é um ponto crucial para a correta utilização, projeto e especificação destes materiais, os quais, via de regra, estão sujeitos às mais hostis condições existentes na metalurgia extrativa dos metais e ligas. Usualmente, os materiais refratários estão em contato com líquidos fundidos (metais e escórias) e gases, sendo utilizados em processos intermitentes, sujeitos a severas variações das condições térmicas e sob condições de carregamento termo-mecânico bastante complexas. A seguir, serão apresentadas as principais propriedades e características dos materiais refratários que os qualificam para serem empregados com sucesso nestes ambientes de condições extremas.

9.5.1 Densidade

Nos materiais refratários a densidade é uma grandeza bastante importante pois interfere diretamente em outras características, como a condutividade térmica, resistência mecânica etc. Do ponto de vista prático; nem sempre se pode medir diretamente o volume de uma peça, uma vez que as geometrias normalmente são complexas e os materiais refratários não são sólidos contínuos, ou seja, apresentam descontinuidades e imperfeições como trincas e poros que podem ser abertos ou fechados.

Em virtude disto, podem-se definir diferentes tipos de cálculo de densidade, dentre eles os de densidade real e densidade aparente (LEE e MOORE, 1998; DINGER, 2005; MORREL, 1985).^{6,17,18} O cálculo da densidade real é definido como sendo a massa por unidade de volume sem incluir os poros (abertos ou fechados), enquanto o cálculo da densidade aparente é definido como sendo a massa de material dividido pelo volume, neste caso, os poros fechados são incluídos (porém não são medidos) no cálculo.

Deve-se notar que existem vários métodos que buscam determinar o volume, a distribuição e o tamanho dos poros abertos dos materiais, como a porosimetria de intrusão de mercúrio e a picnometria a Hélio. Porém, estes métodos por mais acurados que sejam não são capazes de extrair informações sobre os poros fechados dos materiais.

9.5.2 Porosidade

A porosidade é outra propriedade simples, que depende da integridade física (trincas) e de como as partículas estão conectadas de forma a promoverem ou não descontinuidades, vazios ou poros pela estrutura interna do material refratário. A Figura 9.6 apresenta um diagrama esquemático dos poros em uma estrutura hipotética bidimensional.

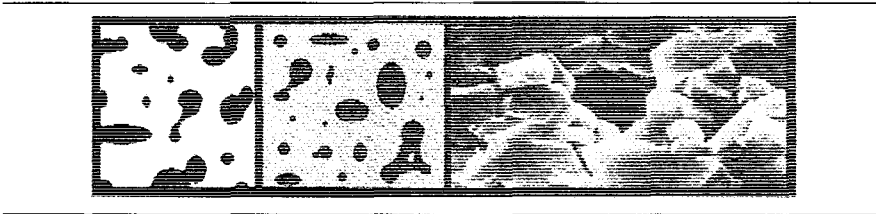


FIGURA 9.6 - (a) Tipos de poros (abertos e fechados) em uma estrutura hipotética (b) Poro em um material refratário de alta alumina, após fratura do corpo de prova (TECHNICAL..., 1996; SEGADAES e FUMO, 1999).^{15,19}

A definição de porosidade aparente é a relação entre o volume de poros abertos dividido pelo volume total de material. De maneira geral, os refratários de baixa porosidade possuem maior resistência à corrosão; maior resistência à penetração de gases, escórias e metal líquido; e maior resistência à erosão. A condutividade térmica é bastante influenciada pela porosidade. Usualmente, refratários isolantes são extremamente porosos.

Vários ensaios são padronizados para a determinação da densidade e da porosidade de materiais refratários conformados. monolíticos, isolantes, etc. Algumas normas técnicas da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) sobre estes testes são: NBR 6115 (ABNT, 1996),²⁰ NBR 6220 (ABNT, 1997),²¹ NBR 6221 (ABNT, 1995),²² NBR 8003 (ABNT, 1997),²³ NBR 8592 (ABNT, 1995),²⁴ NBR 11221 (ABNT, 1997)²⁵ e NBR 12173 (ABNT, 2002).²⁶

9.5.3 Módulo de elasticidade (Módulo de Young)

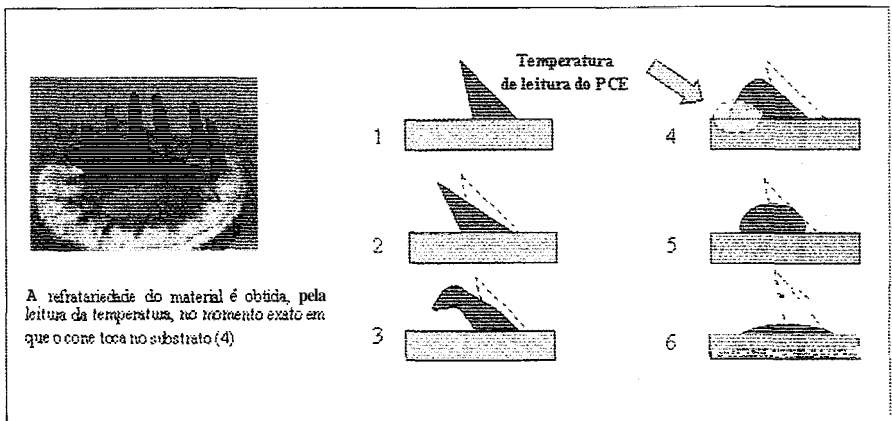
Usualmente, o módulo de elasticidade é obtido através de ensaios estáticos de tensão *versus* deformação. Porém, estes ensaios são complexos para serem realizados nos materiais refratários e nem sempre são muito precisos (PETIT, 1983).²⁷

Usualmente, outras maneiras de se determinar o módulo de elasticidade dos materiais refratários são realizadas através de diferentes metodologias: ensaios estáticos (torsão, compressão, flexão), ou ensaios dinâmicos (velocidade ultrasônica e de ressonância). Os métodos estáticos e dinâmicos são passíveis de serem utilizados como ferramentas de controle de qualidade durante a produção dos refratários, porém, para o uso em projetos de engenharia e simulação computacional, a determinação acurada do módulo de elasticidade deve ser realizada por meio de ensaios de flexão (BUTTER, 1987).²⁸

9.5.4 Refratariedade

A refratariedade dos materiais refratários é determinada através do ensaio do cone pirométrico equivalente (PCE), como mostrado na Figura 9.7. A determinação da refratariedade é obtida indiretamente, montando-se a amostra a ser ensaiada juntamente com cones padronizados que fundem em temperaturas específicas (ABNT, 1995);²⁹ porém, não se deve confundir a refratariedade com a determinação do ponto de fusão do material. Os materiais refratários usualmente são misturas de dois ou mais óxidos, em que a formação de líquido decorrente do aquecimento da amostra coexiste com o sólido. Neste caso, tem-se um ponto inicial de formação de líquido, uma mistura líquido + sólido(s), e um ponto final de fusão quando desaparecem completamente os sólidos.

FIGURA 9.7 - Diagrama esquemático do ensaio de refratariedade - PCE (LEE e MOORE, 1998; LENZ E SILVA et al., 2003).^{6,30}



9.5.5 Resistência à abrasão e à erosão

A resistência à abrasão e à erosão são propriedades importantes dos materiais refratários, especialmente quando eles são aplicados em zonas de fluxo de material particulado (abrasão) ou em contato com fluidos em movimento (erosão), durante as etapas de carregamento, transporte e tratamento metalúrgico, ou durante as etapas de injeção de misturas de materiais particulados e gases (desulfuração, descarburização, desfosforação etc.).

As áreas sujeitas ao recebimento de gusa e aço líquido, como nos canais de corria, zonas de impacto de panelas, convertedores a oxigênio e distribuidores de lingotamento contínuo, usualmente, possuem maiores teores de grãos eletrofundidos e materiais sintéticos (carbeto) em sua formulação para adequar a vida do revestimento como um todo. Refratários posicionados em zonas próximas de sistemas de carregamento de matérias-primas e sistemas de controle ambiental (topo de alto-forno cone superior de convertedores a oxigênio) estão mais sujeitos ao ataque abrasivo das partículas contidas nos fluxos de gases, em elevadas temperaturas.

A determinação da resistência à abrasão é usualmente obtida através de medida da perda de massa do corpo de prova refratário, sujeito a um fluxo de material particulado (carbeto de silício). A quantidade, ângulo de jateamento (normalmente 45° ou 90°) e granulometria do agente abrasivo devem ser controlados. Usualmente, os materiais que apresentam elevado módulo de ruptura e elevada resistência à compressão a frio apresentam elevada resistência à abrasão (LEE e MOORE, 1998).⁶

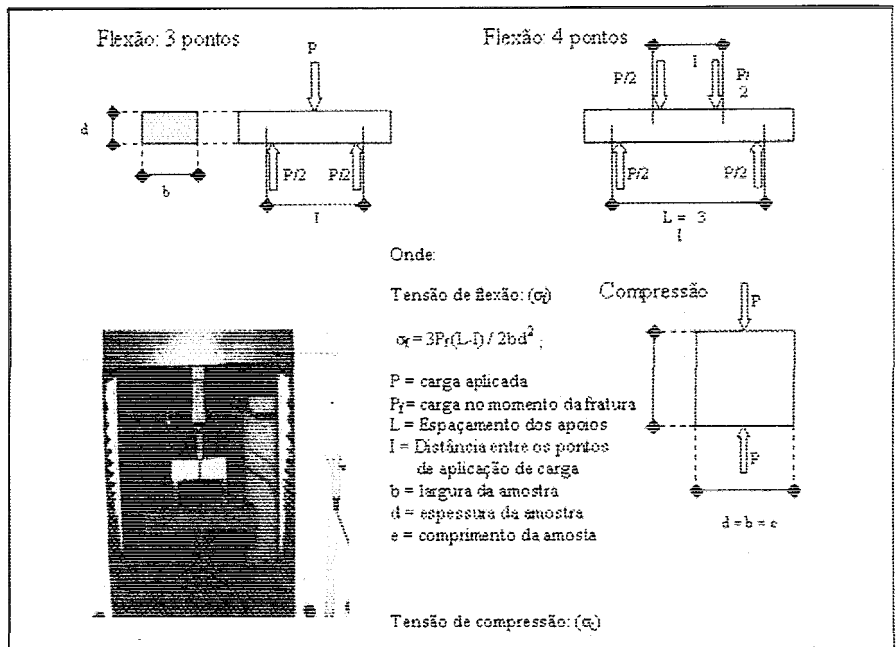
9.5.6 Resistência mecânica (compressão e flexão)

Os materiais refratários dificilmente falham em decorrência puramente de esforços de compressão. A medida da resistência à compressão a temperatura ambiente é, usualmente, um parâmetro de controle de qualidade que visa garantir a conformidade do lote (integridade física das peças); inferir sobre a homogeneidade dos tratamentos térmicos de produtos queimados; atuação do sistema ligante (mistura e prensagem) de produtos resinados, de forma que a resistência mecânica dos materiais seja suficiente para uma etapa

segura de manuseio e aplicação dos refratários, além de dar uma indicação indireta de outras propriedades como a própria resistência à abrasão.

Já a resistência à flexão é um ensaio mais sensível e bastante útil para o desenvolvimento e especificações de aplicação dos refratários sujeitos a carregamentos de esforços mais complexos, como os que ocorrem em munhões de convertedores a oxigênio LD/BOF; painéis de aço; regiões próximas à boca dos carros-torpedos etc. A Figura 9.8 apresenta os diagramas esquemáticos destes testes mecânicos que podem ser realizados a temperatura ambiente ou em elevadas temperaturas.

FIGURA 9.8 - Diagrama esquemático dos testes de resistência mecânica a compressão diametral e a flexão (3 e 4 pontos), e fotografia de um ensaio de flexão em 3 pontos para avaliação da resistência de juntas refratárias de magnésia-carbono soldadas (TECHNICAL..., 1998; LENZ E SILVA et al., 2003), 15,30



9.5.7 Resistência mecânica sob carga em elevada temperatura - (Creep)

A determinação de resistência mecânica em elevadas temperaturas sob efeito de uma carga constante (tipicamente: $2,0 \text{ kgcm}^{-2}$) é um parâmetro de controle e de engenharia muito importante, especialmente para os materiais refratários de uso prolongado em condições de carregamento termo-mecânico, como em fornos de queima tipo túnel, fornos de fusão de vidro etc.

A deformação observada nos materiais refratários (escoamento) em elevadas temperaturas sob o efeito de um carregamento estático é decorrente da formação de fase líquida e conseqüente escoamento plástico do material refratário. Porém, por ser um ensaio realizado em condição de tempo reduzido (24h ~ 48h), nem sempre o ensaio de Creep consegue representar fidedignamente as transformações de longa duração dos fornos de queima/fusão (anos ou até décadas de operação contínua). Outro ponto muito importante é que, usualmente, as atmosferas em contato com os materiais refratários possuem/transportam agentes formadores de fase líquida, que podem interferir nos mecanismos de deformação plástica ao longo do tempo, como a presença acumulativa de álcalis (Na_2O e K_2O) em atmosfera oxidante, ou SiO(g) em atmosfera redutora.

9.5.8 Resistência à oxidação (refratários contendo carbono)

A resistência à oxidação dos refratários contendo carbono ($\text{Al}_2\text{O}_3\text{-C}$; MgO-C ; $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-MgO-C}$; $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2\text{-C}$, $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-ZrO}_2\text{-C}$; etc.) é um dos pontos mais importantes para a minimização e controle dos processos de corrosão química, uma vez que a presença do carbono modifica a tensão superficial entre o sólido (refratário) e o líquido (metal-escória). O carbono ainda possui papel importante na resistência ao choque térmico e termoclase devido às suas propriedades físicas.

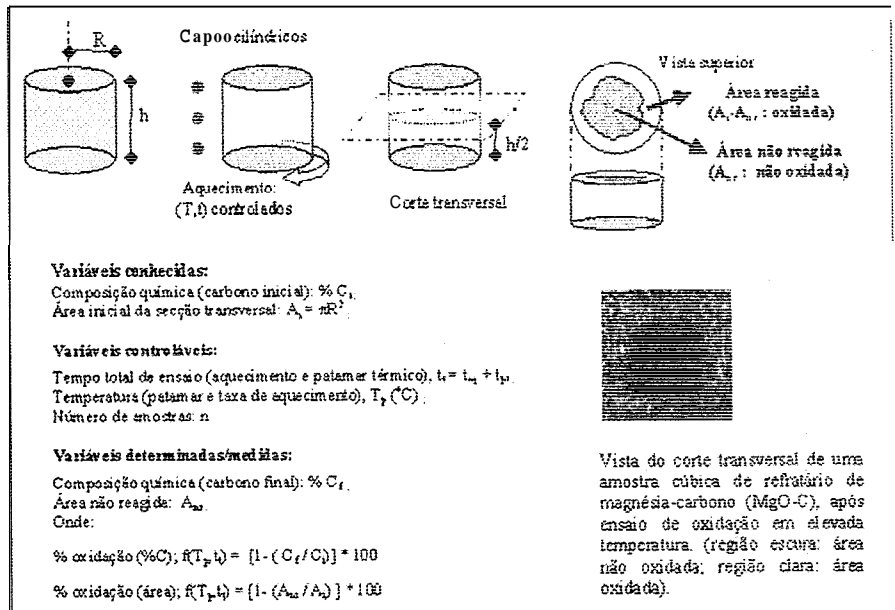
O processo de oxidação é um fenômeno complexo decorrente do grande número de fatores envolvidos, entre eles: composição química (refratário e do meio líquido/gasoso); atividade dos óxidos e potenciais químicos (PO_2 ; PCO ; PCO_2); temperatura (gradientes térmicos); porosidade e permeabilidade dos refratários; equilíbrio e reações de oxi-redução; tipo, viscosidade, reatividade (área superficial e cristalinidade) das fontes de carbono etc.

Usualmente, emprega-se a perda de massa quando o sistema refratário está sujeito somente a reações de oxidação (ex: $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-C}$). Porém, quando há uma interação de oxi-redução com a formação de compostos intermediários (carbetos, nitretos, oxi-carbetos etc.), os métodos termogravimétricos não podem mais ser aplicados satisfatoriamente. Nesses casos, a análise química (carbono total) antes e após os ensaios, juntamente com a

determinação da área reagida (região oxidada e não-oxidada) são utilizados. Novas metodologias de avaliação do grau de oxidação têm sido propostas (QUINTELA et al., 2002)³¹ visando melhorar a confiabilidade e homogeneidade e diminuir a variabilidade destes testes.

A Figura 9.9 apresenta de forma esquemática a metodologia do ensaio para determinação da resistência à oxidação de refratários contendo carbono.

FIGURA 9.9 - Diagrama esquemático do teste para a determinação da resistência a oxidação dos refratários contendo carbono (QUINTELA et al., 2002; MAGNESITA S.A., 2005).^{31,32}



9.5.9 Resistência à corrosão por fundentes e escórias

Os materiais refratários, via de regra, estão em contato com metais e escórias líquidas durante as etapas de transformação e refino metalúrgico. O ataque químico ao revestimento refratário (corrosão) é uma das principais causas de afastamento para a manutenção dos reatores metalúrgicos. Uma das maneiras de se inferir sobre a resistência dos materiais refratários à corrosão é a realização de testes em escala laboratorial, que podem ser estáticos ou dinâmicos, com ou sem controle da atmosfera gasosa.

Os principais métodos de avaliação da corrosão são os testes de escorificação em forno de indução; escorificação em forno de indução com

rotação/translação da amostra (*finger test*); escorificação em forno rotativo a gás; e o ensaio de escorificação estática em forno elétrico/gás. Os ensaios de corrosão são padronizados pela ABNT (NBR 8830; NBR 9641).^{33,34} Porém, durante o projeto e pesquisa de formulações refratárias, variações nestes ensaios são usualmente realizadas. A Figura 9.10 apresenta esquematicamente a metodologia de determinação do desgaste por corrosão realizado em fornos de indução.

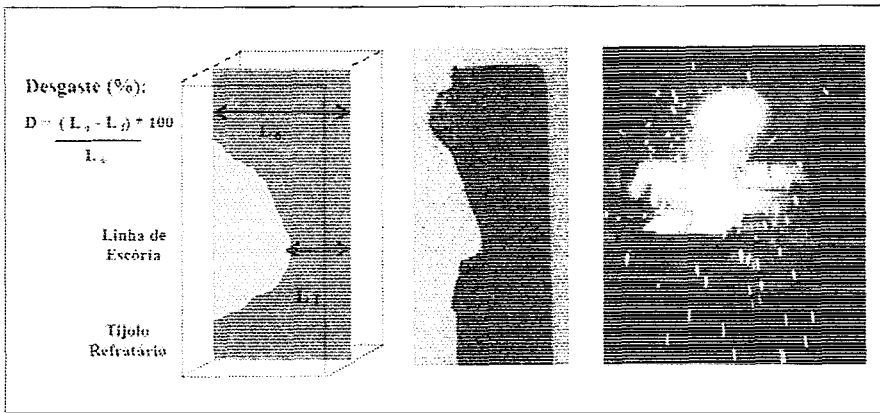


FIGURA 9.10 - Ensaio de corrosão em forno de indução (LENZ E SILVA et al., 2003).³⁰

9.5.10 Resistência ao choque térmico

As variações de temperatura (gradientes térmicos) podem causar severos danos aos revestimentos refratários como micro e macrofissuramento da face quente (termoclase térmica). A extensão do dano causado depende de uma série de fatores tanto intrínsecos aos refratários (composição química, porosidade, resistência mecânica da matriz e agregados refratários, espessura do revestimento, dilatação diferencial dos componentes etc.), como fatores extrínsecos (ciclo térmico, encharcamento térmico do revestimento, tipo de aquecimento inicialmente realizado etc.). De maneira geral, a resistência ao choque térmico depende das interações entre os defeitos (nucleação de trincas), e de como estes defeitos evoluem ao longo do tempo (interação/propagação das trincas), causando falhas mais ou menos catastróficas de acordo com a velocidade de crescimento destas trincas no material.

A determinação da resistência ao choque térmico pode ser realizada de diferentes formas e níveis de complexidade, indo desde a realização de ensaios com equipamentos e montagens de elevada sensibilidade à propagação de trincas no interior dos refratários (QUINTELA et al., 2001),³⁵ até os ensaios mais simples que visam avaliar a interação/evolução dos defeitos internos, através da medição do módulo de elasticidade ao longo das peças refratárias sujeitas à diferentes condições de choque térmico, como: tipo de resfriamento (forçado ou não), e meio de resfriamento (ar, água, placa refrigerada). Dois pontos são importantes, a escolha do meio refrigerante (hidratação) e a oxidação dos refratários (refratário contendo carbono), durante a realização dos ensaios.

9.5.11 Expansão térmica e dilatação térmica reversível

Quando os materiais refratários recebem energia (calor), as ligações entre os átomos se distanciam em decorrência do aumento das vibrações atômicas. A consequência deste processo reversível (quando não ocorrem transformações de fase) é o aumento das dimensões dos materiais (expansão). Porém, este aumento de energia térmica é capaz, também, de promover mudanças de fases irreversíveis ou metaestáveis. O método usual para a determinação da expansão dos materiais é através do ensaio de dilatométrica, em que se registra a expansão linear do corpo de prova com a elevação da temperatura.

O conhecimento destas mudanças dimensionais é um parâmetro muito importante no projeto/aplicação dos materiais refratários, que, via de regra, estão sujeitos a graus de liberdade mais restritivos (reatores fechados, de construção complexa e de elevada rigidez). Todos os cálculos de engenharia; para a definição de juntas de dilatação, ancoramento de refratários não-moldados e estruturas pré-moldadas conjugadas (carcaça metálica + refratários), utilizam dados de dilatação térmica, para a determinação das expansões e estresse termomecânico do conjunto refratário.

A Figura 9.11 apresenta o gráfico da dilatação térmica linear em função da elevação da temperatura para alguns dos principais óxidos e carbetos refratários.

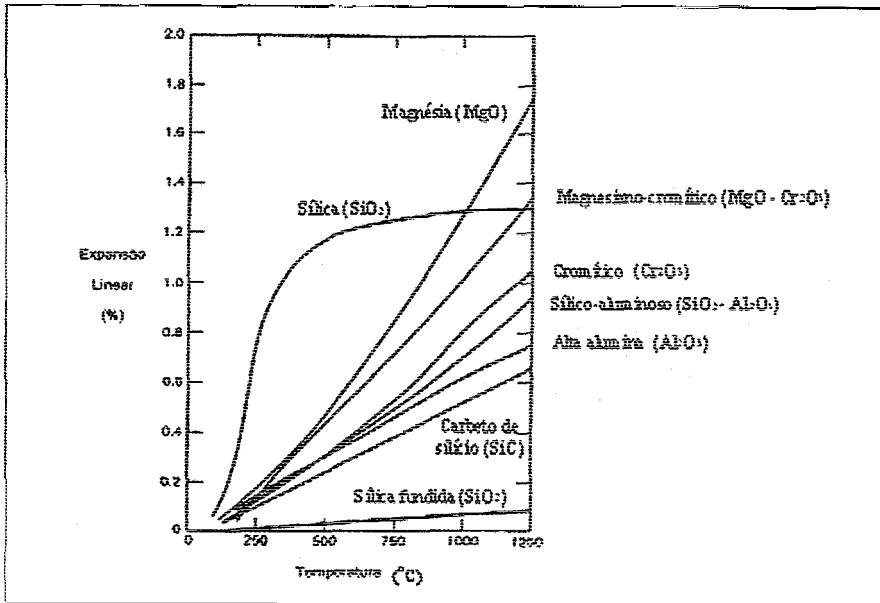


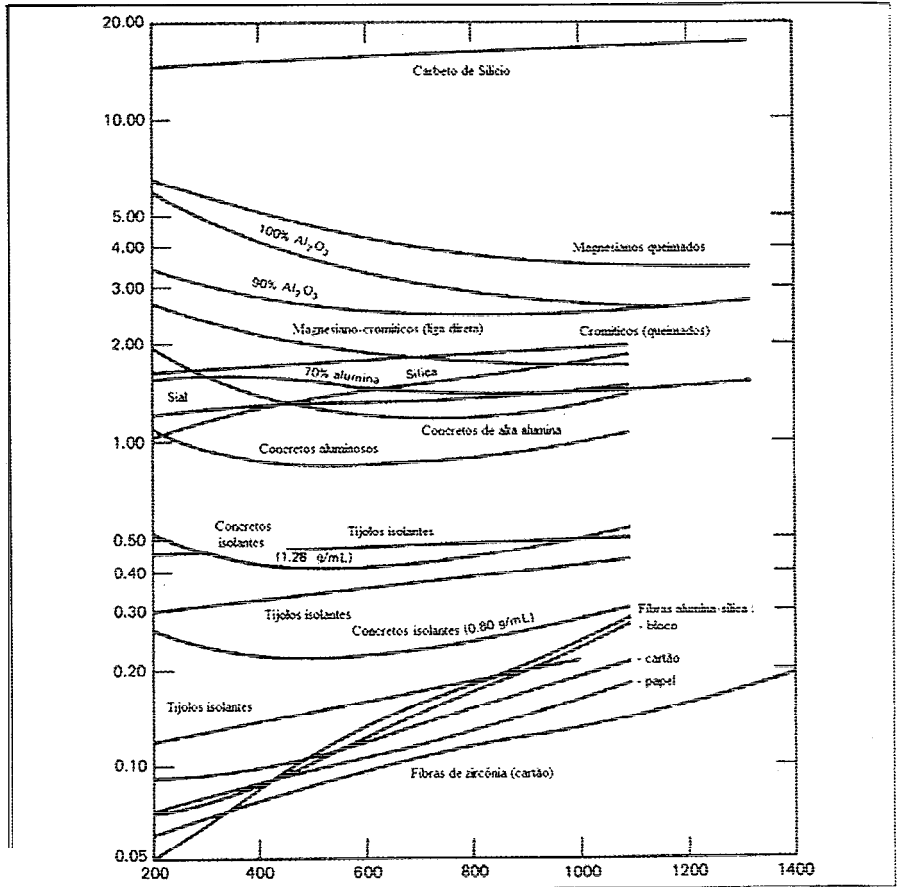
FIGURA 9.11 - Variação da dilatação térmica dos materiais refratários em função da temperatura (LEWIS, 1991).⁷

9.5.12 Condutividade térmica

Outra propriedade muito importante dos materiais refratários é a condutividade térmica, uma vez que uma das principais funções dos refratários é a retenção de calor durante os processos metalúrgicos, de modo a minimizar as perdas de calor (energia) dos sistemas. A condutividade térmica é um parâmetro importante para a determinação dos estados de tensões decorrentes de gradientes térmicos nos reatores metalúrgicos, sendo, também, uma propriedade importante para o projeto de composições refratárias de elevada resistência ao choque térmico.

Existem vários métodos para a determinação da condutividade térmica dos materiais em geral. Sendo os mais usuais o método do fio quente, que cobre uma ampla classe de materiais (SANTOS, 2002),³⁶ e o método de fluxo de calor transiente (Laser-flash) para os materiais de elevada condutividade térmica e elétrica (por exemplo, refratários contendo carbono e carbetos). Este método permite medir simultaneamente a condutividade, a difusividade térmica e o calor específico em uma ampla faixa de temperatura (-150° C a 1.500° C) (LINSEIS, 2005).³⁷

FIGURA 9.12.
Condutividade térmica
dos materiais refratários
(ENCYCLOPEDIA...,
1997).³⁸



9.5.13 Outras propriedades

Muitas outras propriedades podem ser calculadas, medidas ou estimadas para os materiais refratários, indo desde a composição química obtida por via úmida ou instrumental (fluorescência de Raios-X, ICP, absorção atômica); propriedades das soluções (viscosidade, potencial zeta, potencial de hidrogênio); métodos via espectroscopia (infravermelho, ultravioleta, Laser Raman, de massa, de energia dispersiva); métodos termo-diferenciais/calor (DTA, DTG, calorimetria); métodos óticos (microscopia de luz refletida, de luz polarizada, eletrônica de varredura, eletrônica de transmissão) etc. Todos estes métodos são usados em maior ou menor escala,

sendo aplicados desde o estudo dos fenômenos básicos em nível atômico e/ou molecular até o controle de qualidade dos produtos finais.

9.6 Classes de Refratários

A classificação dos refratários em função de sua basicidade (relação entre: $\%CaO/\%SiO_2$) é uma das divisões mais clássicas aplicadas aos materiais refratários. Este tipo de classificação facilita o entendimento das transformações, reações e estabilidade dos sistemas refratários em elevadas temperaturas. Porém, esta classificação não se aplica aos refratários à base de materiais não-óxidos (carbetos, boretos, nitretos, silicetos etc.), os quais são, então, classificados e estudados separadamente como produtos refratários especiais.

9.6.1 Refratários ácidos à base de sílica

A sílica existe na natureza em três diferentes formas polimórficas: quartzo, tridimita e cristobalita, que podem coexistir em temperatura ambiente, sendo o quartzo a fase termodinamicamente estável. As transformações entre as fases polimórficas da sílica ocorrem com apreciável expansão volumétrica, em especial na transformação de quartzo para tridimita a $870^\circ C$ acompanhada de uma expansão de aproximadamente 15%, como mostrado na Figura 9.13.

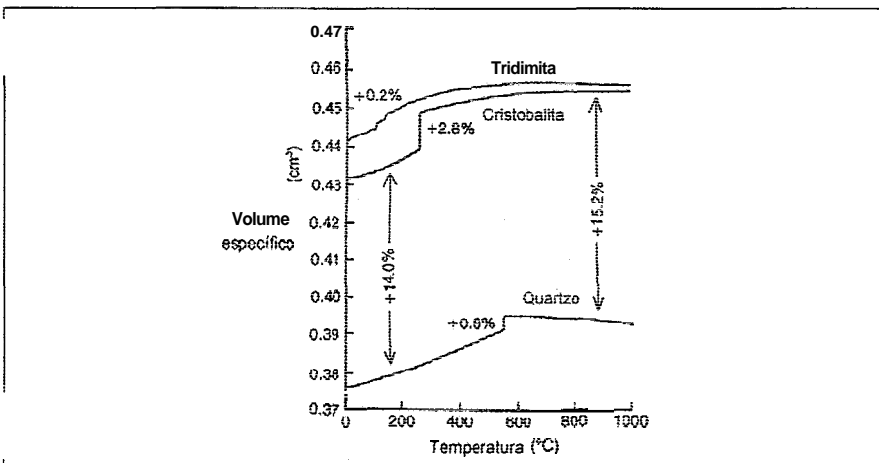


FIGURA 9.13 - Variações volumétricas decorrentes das transformações de fase do quartzo, cristobalita e tridimita em função da temperatura (LEE e RAINFORTH, 1994).¹¹

Os ciclos térmicos, através das temperaturas de transformação de fase da sílica, podem ser catastróficos para os corpos cerâmicos com efeitos perniciosos nas propriedades mecânicas dos materiais. Porém, devido à sua estabilidade na faixa de 600°C a 1.450°C, os tijolos de sílica são empregados no revestimento de coqueiras, onde a manutenção e o controle cuidadoso da temperatura de processo, do carregamento e descarregamento do carvão e alguns fatores determinantes para o prolongamento da vida útil das baterias. Uma outra categoria de tijolos de sílica são os de sílica fundida amorfa. Obtidos através da fusão e resfriamento rápido de sílica pura, cristalizando metaestavelmente a cristobalita. Dessa forma, obtém-se um material de baixa expansão térmica (0,5x10⁻⁶K⁻¹) e elevada resistência ao choque térmico.

9.6.2 Refratários silico-aluminosos, aluminosos e de alta alumina

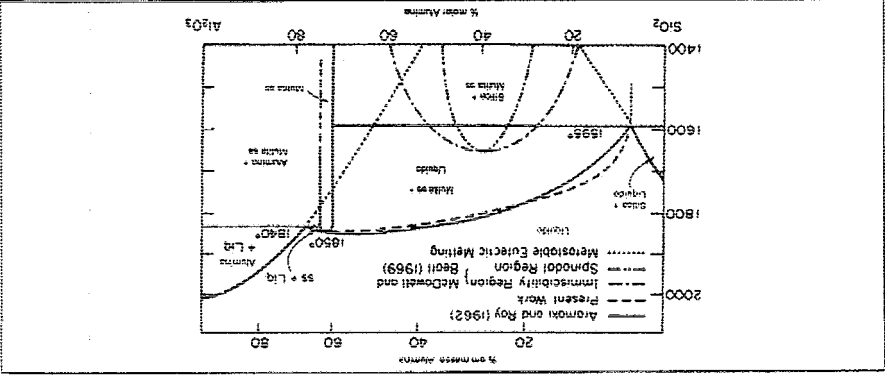
Os refratários desta classe são divididos em função do teor de alumina contido (Tabela 9.3), assim classificados como: sílica ($Al_2O_3 < 7\%$); silico-aluminosos (Al_2O_3 entre 8% e 50%); e alta-alumina (> 50% de Al_2O_3). Estes limites entre os subgrupos podem ser claramente observados pelo diagrama de equilíbrio do sistema alumina-sílica, mostrado na Figura 9.14.

Sub-grupo	Refratários
Silicosos	Sílica
Silico-aluminosos	Refratários silico-aluminosos (LEE e RAINFORTH, 1994) ¹¹
Aluminosos	Alta-alumina
Silimanita	
Mullita	
Côndon e bauxita	

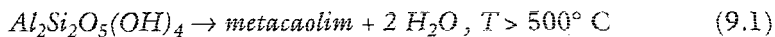
% de Al_2O_3 (em peso)
< 7,0
7,0 - 22,0
22,0 - 38,0
38,0 - 50,0
50,0 - 55,0
55,0 - 70,0
70,0 - 98,0

TABELA 9.3 - Classe de refratários silico-aluminosos (LEE e RAINFORTH, 1994)¹¹

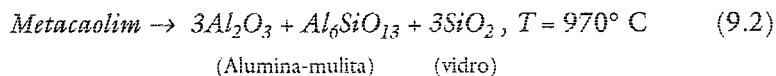
FIGURA 9.14 - Diagrama de equilíbrio de fases p sistema alumina-sílica (THE AMERICAN CERAMIC SOCIETY, 2003)³⁹



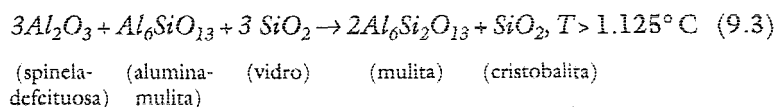
Refratários sílico-aluminosos - A saída de água combinada nas ~~propriedades~~ (dehidroxilação) ocorre acima de 500° C formando o metacaolím, conforme indicado pela equação química (9.1).



A decomposição do metacaolím, pela remoção final dos radicais hidroxílicos em 970° C, desencadeia a separação de uma considerável quantidade de sílica livre amorfa, com a formação de mulita fracamente cristalina e outra fase de estrutura cúbica (espinela-defeituosa) semelhante à gama-alumina.



Com o aquecimento acima de 1125° C, a fase espinela-defeituosa é convertida em mulita pela reação da sílica amorfa, que eventualmente pode ser transformada em cristobalita.



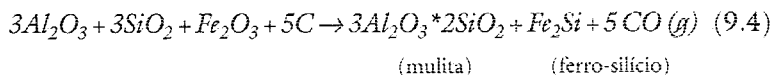
A temperatura na qual os refratários sílico-aluminosos (à base de argila) são queimados está intimamente ligada ao teor de alumina presente, sendo o teor de sílica o principal fator determinante na temperatura de uso destes refratários. Secundariamente, o teor de impurezas formadoras de pontos eutéticos de baixo ponto de fusão (TiO₂, FeO, K₂O, Na₂O), também, limitam a temperatura máxima de uso dos refratários.

Refratários aluminosos - Os refratários aluminosos são usualmente produzidos a partir da prensagem de materiais argilosos (secos) com adições de chamota refratário (alumino-silicatos contendo de 40% a 45% de alumina, previamente queimados). A elevação das ~~propriedades mecânicas~~ ^{propriedades mecânicas}, a ~~refratariedade~~ ^{refratariedade}, a resistência ao choque térmico, pode ser obtida através da utilização de ~~areias~~ ^{areias}

de elevado teor de alumina. A refratariedade do sistema é bastante elevada com a diminuição do teor de impurezas e elevação do teor de alumina presente.

Refratários de alta-alumina - Os refratários de alta-alumina incluem os subgrupos de refratários de silimanita (cianita e andalusita: $Al_2O_3 \cdot SiO_2$), mulita ($3Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$ até aproximadamente $2Al_2O_3 \cdot SiO_2$) e córindon-bauxitos calcinados (Al_2O_3). São um dos mais importantes grupos de materiais refratários, devido às suas excelentes propriedades como: resistência à abrasão, termoclase, resistência mecânica, refratariedade e corrosão por escórias ácidas.

Um “bom” refratário à base de mulita contém em média 85% de mulita, e a quantidade de vidro não deve exceder 5%. Usualmente, observa-se de 3% a 5% de alumina não-reativa. Os refratários de mulita, também, podem ser produzidos pela fusão da alumina e da sílica em fornos elétricos a arco (Processo Corhart - marca registrada pela Corning Glass), como mostrado pela reação (9.4), apresentada a seguir.



Vários óxidos possuem efeitos mineralizantes na formação dos cristais de mulita, por exemplo, o CaO ou Na_2O adicionados criam condições favoráveis durante o processo de cristalização. Adições de MgO, MnO ou TiO_2 não causam modificações na natureza da composição de fase (mulita); porém, auxiliam na distribuição uniforme da fase vítrea de sílica.

Os refratários de alta alumina à base de bauxito calcinado ou alumina fundidas (branca e/ou escura) são empregados em aplicações especiais (pontos de elevada temperatura em fornos tipo túnel).

9.6.3 Refratários à base de aluminatos de cálcio (*calcium aluminate cements - CAC's*)

Uma das maiores tendências no campo dos materiais refratários nestes últimos 25 anos é o incremento da utilização de refratários não-moldados ou

monolíticos (LEE et al., 2001).⁴⁰ Esta tendência é decorrente da grande quantidade de pesquisas realizadas no desenvolvimento de concretos refratários de elevado desempenho, versatilidade e facilidade de sua aplicação, facilidade de manuseio e do menor custo das instalações de produção destes materiais (LEE et al., 2001; SCRIVENER e CAPMAS, 2004; NISHIKAWA, 1999).⁴⁰⁻⁴²

A classificação dos concretos refratários à base de aluminatos de cálcio é, usualmente, definida de acordo com o teor de cimento (%CaO) contido. A Tabela 9.4 apresenta a classificação dos concretos refratários de acordo com este parâmetro. A Figura 9.15 mostra o diagrama de equilíbrio de fases do sistema CaO-Al₂O₃.

CLASSIFICAÇÃO	TEOR DE CAO CONTIDO (% EM MASSA)
Concretos convencionais (CC)	> 2,5%
Concretos de baixo teor de cimento (CBC)	1,0 % ~ 2,5%
Concretos de ultra-baixo teor de cimento (CUBC)	0,2 % ~ 1,0%
Concretos sem cimento (CSC)	< 0,2%

TABELA 9.4 –
Classificação ASTM mais usual dos concretos à base de aluminatos de cálcio (LEE et al., 2001).⁴⁰

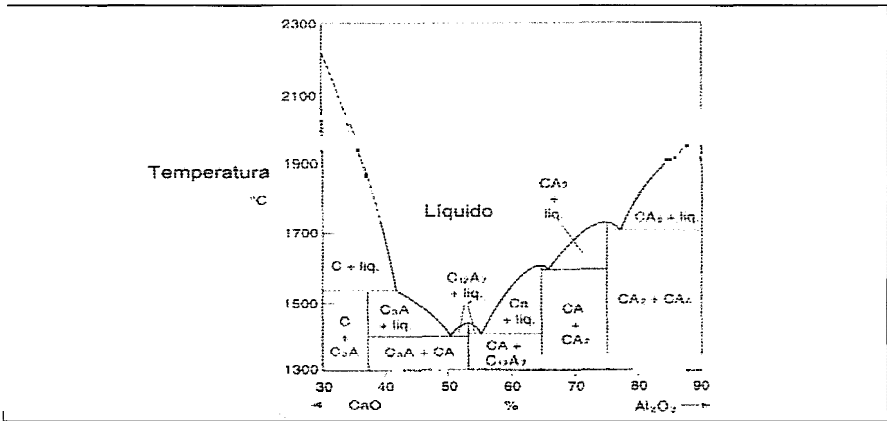


FIGURA 9.15 - Diagrama de equilíbrio de fases do sistema CaO-Al₂O₃ (SCRIVENER e CAPMAS, 2004).⁴¹

Atualmente, novas pesquisas têm sido conduzidas na busca do desenvolvimento de concretos refratários contendo carbono; concretos com adição de espinélio (MgAl₂O₄); espinelizáveis (adição de MgO); e concretos CAC's multifuncionais. A Tabela 9.5 apresenta a composição química típica de vários concretos à base de aluminato de cálcio utilizados em elevadas temperaturas.

Refratários para Siderurgia

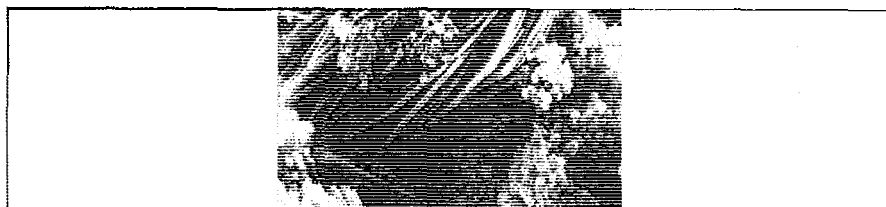
TABELA 9.5 -
Composição química
típica de vários concretos
CAC's (LEE et al.,
2001).⁴⁰

Composição Química (%)	Classe I – 40 % a 60 % Al ₂ O ₃	Classe II – Especiação japonesa (JIS)	Classe III – Cimentos de alta pureza (76% Al ₂ O ₃)	Classe IV – Cimentos de alta pureza (90% Al ₂ O ₃)
Fornecedores e nomes comerciais	Cimento Fondu e Lumnite	Vários	Denka, Secar 71 (Lafarge)	Denka super, CA 25 (Alcoa) e Secar 80 (Lafarge)
SiO ₂	3,05	2,52	0,20	0,08
TiO ₂	1,95	3,23	Traços	Traços
Al ₂ O ₃	42,11	56,69	71,07	80,22
Fe ₂ O ₃	15,55	0,89	0,09	0,15
CaO	37,46	35,75	27,70	17,63
MgO	0,65	0,43	0,33	0,35
Na ₂ O	0,08	0,06	0,1	0,56
K ₂ O	0,05	0,11	0,02	Traços

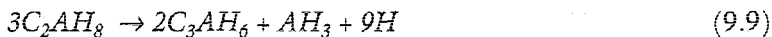
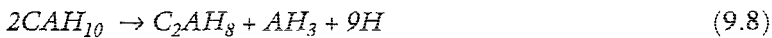
Tecnologia dos concretos CAC's - Alguns pontos são relevantes para o completo domínio da tecnologia dos materiais refratários monolíticos (LEE et al., 2001; OLIVEIRA et al., 2000).^{40,43} São eles: a reologia do sistema (água+ cimento+ agregados); os processos de dispersão (aditivos aceleradores/retardadores de pega, redutores de água, fluidizantes, plasticizantes, polímeros etc.); e o empacotamento das partículas (matriz e agregados). Secundariamente, porém não menos importante, é o conhecimento das transformações microestruturais, morfológicas e das fases cristalinas durante os processos de hidratação, secagem e queima dos concretos refratários.

O processo de hidratação tem sido estudado amplamente, porém, por se tratar de um fenômeno complexo (multifásico), envolvendo muitas variáveis como a composição química, homogeneidade, temperatura, umidade ambiente, relação água/cimento e a presença de impurezas que interferem na formação dos diferentes hidratos, a completa identificação e quantificação das fases presentes nem sempre é possível. A Figura 9.16 apresenta a micrografia eletrônica de varredura da fase C₂AH₈ de um cimento de aluminato de cálcio com relação água:cimento = 2,0 a temperatura ambiente.

FIGURA 9.16 -
Micrografia eletrônica de
varredura de hidratos:
2CaO*Al₂O₃*8H₂O, com
sua morfologia típica no
formato de placas
hexagonais (SEGADÃES e
FUMO, 1999).¹⁹



O processo de hidratação e formação de fases hidratadas pode variar bastante em baixas temperaturas (< 40° C) o que do ponto de vista prático é um grande problema para a etapa de secagem das peças refratárias. De acordo com o tipo e a extensão da formação de hidratos amorfos, pode-se facilmente modificar a permeabilidade e a porosidade das peças refratárias. Em casos críticos, o processo de secagem pode causar o fissuramento ou até a explosão das peças durante a etapa de secagem. Várias técnicas têm sido utilizadas para garantir uma secagem segura, especialmente em refratários de grande diâmetro, como: a utilização de pós metálicos; fibras poliméricas e/ou naturais; ciclos, curvas e batamares de aquecimento controlados; pré-secagem a vácuo. A seguir, são apresentadas, de forma simplificada, as principais reações do processo de hidratação de cimentos à base de aluminatos de cálcio (LEE et al., 2001; SCRIVENER e CAPMAS, 2004; CAPMAS e DAMIDOT, 1990).^{40,41,44}



Onde:

- Os processos de hidratação do CA e do $C_{12}A_7$ são análogos;
- Em baixas temperaturas (< 10° C) a formação de CAH_{10} é predominante;
- Entre 10 e 21° C as fases CAH_{10} e C_2AH_8 formam-se conjuntamente;
- A fase AH_3 é um gel quando formada abaixo de 21° C, passando a ser cristalina acima de 35° C;
- Com a elevação da temperatura, a fase CAH_{10} não é mais formada, enquanto as fases estáveis C_3AH_6 e AH_3 passam a ser predominantes.

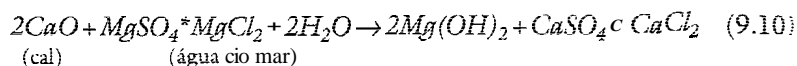
Outro ponto importante na tecnologia dos refratários monolíticos, à base de aluminatos de cálcio, são as transformações em elevadas temperaturas (SCRIVENER e CAPMAS, 2004).⁴¹ O entendimento dos processos de

transformações micro e macroestruturais (matriz e agregados) e as conseqüentes variações nas propriedades termomecânicas dos materiais monolíticos, como: microfissuramento durante o aquecimento; modificação do módulo de elasticidade; variações na dilatação térmica reversível entre os agregados e a matrix; formação de fases de baixa viscosidade (presença de SiO₂) etc., são pontos essenciais na formulação, aplicação e desenvolvimento de refratários monolíticos de elevado desempenho.

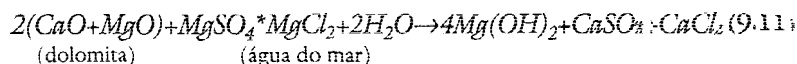
9.6.4 Refratários magnesianos

Os refratários básicos englobam diferentes tipos de materiais desenvolvidos tendo a magnésia (MgO) como o óxido principal, sempre presente e, na maioria dos casos, como componente majoritário. As variações usualmente existentes destes sistemas de óxidos englobam: MgO, MgO-CaO, MgO-Cr₂O₃, MgO-Al₂O₃, MgO-C, Al₂O₃-MgO-C. Em razão desta diversidade de combinações, há um campo extenso e diversificado de aplicações, indo desde fornos de calcinação e cimento, revestimentos de painéis de aço, passando por reatores e desgaseificadores (RH, VOD, AOD), até convertedores a oxigênio e fornos elétricos a arco.

A magnésia (MgO) é um óxido de elevado ponto de fusão, possuindo estrutura cristalina cúbica (tipo: NaCl) sendo obtida usualmente pela calcinação do carbonato de magnésio (MgCO₃ - Magnesita), ou através de processamento químico (precipitação hidroxí-salina) da água do mar, como indicado pela seqüência de reações mostradas a seguir.



ou



A grande vantagem da produção de óxido de magnésio, por meio de reações de precipitação do hidróxido de magnésio, está relacionada com a existência de uma grande reserva de magnésio na água do mar (1 kg de MgO para 500 litros de água do mar). Porém, os sinteres de magnésia para aplicação refratária, obtidos através do óxido de magnésio precipitado da água do mar.

normalmente possuem menor tamanho de grão (cristais) e maior teor de óxido de boro (B_2O_3), o que diminui a sua resistência à corrosão química; quando comparado com sinteres obtidos por meio de decomposição térmica da magnesita (Reação 9.12).



Uma maneira de se diminuir o teor de B_2O_3 nas magnésias, proveniente da água do mar, é a utilização de uma maior quantidade de CaO durante a etapa de precipitação do hidróxido de magnésio $Mg(OH)_2$.

Alguns fatores possuem relevância fundamental no controle da evolução microestrutural e na formação de fases secundárias nos tijolos magnesianos, são eles: composição química e mineralógica (teores de MgO , CaO , SiO_2 , Fe_2O_3); tamanho dos cristais de magnésia; massa e porosidade aparente; presença e quantidade de impurezas (em especial o teor de B_2O_3); e a basicidade do sinter de MgO (WHITE, 1970).⁴⁵

Os tijolos magnesianos, normalmente, possuem pequenas quantidades de impurezas provenientes das matérias-primas, ou mesmo adicionadas intencionalmente, tais como: SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , Cr_2O_3 , FeO e CaO , que proporcionam fases ligantes do tipo silicato.

Um vez que estas fases secundárias apresentam solubilidade sólida, como o $FeO:MgO$ e o $(Cr_2O_3+Al_2O_3):Fe_2O_3$, a relação entre as fases pode ser determinada pelo diagrama quaternário: $MgO-CaO-SiO_2-Fe_2O_3$, apresentado na Figura 9.17.

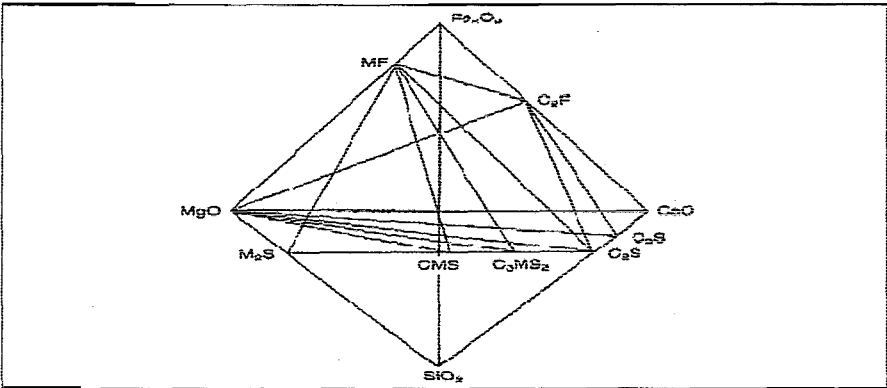


FIGURA 9.17 -
Relacionamento das
fases no estado sólido
do sistema:
 $CaO-MgO-Fe_2O_3-SiO_2$
(SIMONIN et al., 2000).⁴⁶

O efeito pernicioso do óxido de boro nos refratários magnesianos é conhecido há muito tempo, porém, o completo entendimento de seu mecanismo de atuação ainda é incerto em decorrência das complexas reações envolvendo as várias fases presentes. O óxido de boro é capaz de reduzir drasticamente a resistência mecânica sob carga (Creep) dos refratários magnesianos em temperaturas baixas, como 1.200° C. Esta drástica redução das propriedades mecânicas ocorre mesmo quando o teor de óxido de boro não passa de 0,02%.

Um dos ‘calcanhares de Aquiles’ dos refratários básicos, em geral é sua capacidade de reação com a água (líquida ou vapor). Este processo de hidratação das matérias-primas (magnésia e dolomita) deve ser bem controlado e sincronizado com o fluxo fabril (demanda e rotatividade das matérias-primas). Porém, quando há formação de carbonato hidroxilado de magnésio na superfície dos sínteres magnésia (camada protetora superficial), o processo de hidratação dos sínteres de magnésia é minimizado não causando problemas relevantes à qualidade do produto (BRANDÃO, GONÇALVES e MORATO, 2000).⁴⁷

Uma vez controlados os problemas de hidratação das matérias-primas durante o processamento fabril (incluindo a estocagem), resta a manutenção e proteção contra umidade dos produtos finais (JELLINGLAUS, 1989).⁴⁸ que devem estar protegidos e devidamente embalados, especialmente contra a exposição direta à água. No caso de produtos espinelizados o teor de CaO livre deve ser minimizado, evitando, assim, a formação de aluminatos de cálcio, após o tratamento térmico. Finalmente, no caso de refratários de dolomita queimados há ainda, a necessidade de uma proteção adicional (imersão em parafina e embalagem a vácuo com agentes higroscópicos) para criar uma barreira contra a hidratação.

Durante a campanha dos refratários básicos, o controle de vazamentos de água, aplicação de reparos a úmido, ou mesmo, práticas de resfriamento forçado para intervenções mecânicas devem ser cuidadosamente conduzidos, a fim de evitar danos aos revestimentos decorrente da hidratação destes materiais. Estudos de modificação superficial por vários métodos têm sido conduzidos visando proteger as partículas de dolomita e de magnésia em face do processo de hidratação. Desde a década de 1960, estes estudos têm sido realizados visando estabilizar ou diminuir o processo de hidratação dos

refratários básicos, em especial, dos refratários à base de CaO, em que a hidratação é mais crítica (KAPPEYER e HUBLE, 1970).⁴⁹

O processo de hidratação depende basicamente das seguintes variáveis: tipo de óxido ($\text{CaO} \gg \text{CaO-MgO} \gg \text{MgO} > \text{MgO-Al}_2\text{O}_3 > \text{MgO-Cr}_2\text{O}_3$); da área superficial (tamanho dos cristais/grãos); temperatura de queima; teor e tipo de impurezas; pressão parcial do vapor de água e de CO_2 . No caso dos refratários básicos, as alternativas usualmente utilizadas para diminuir a taxa de hidratação são: o aumento do tamanho dos grãos pela elevação da temperatura de queima; utilização de fases acessórias sinterizantes (Fe_2O_3 , TiO_2 , Al_2O_3 , ZrO_2 , La_2O_3 , CeO_2); e o recobrimento dos grãos com piche (KAPPEYER e HUBLE, 1970; OTHMAN, EL-MAATY e SERRY, 2001; ANTONOV et al., 2004).⁴⁹⁻⁵¹

9.6.5 Refratários dolomíticos

A dolomita é uma matéria-prima utilizada em refratários básicos (LEE e MOORE, 1998),⁶ consistindo da mistura de dois carbonatos ($\text{CaCO}_3 + \text{MgCO}_3$), que após a sua calcinação decompõem-se em cálcia (CaO) e magnésia (MgO). A Figura 9.18 apresenta o diagrama de equilíbrio de fases do sistema binário CaO-MgO, e a Figura 9.19 apresenta as micrografias óticas das seções polidas de uma dolomita crua e de uma dolomita calcinada.

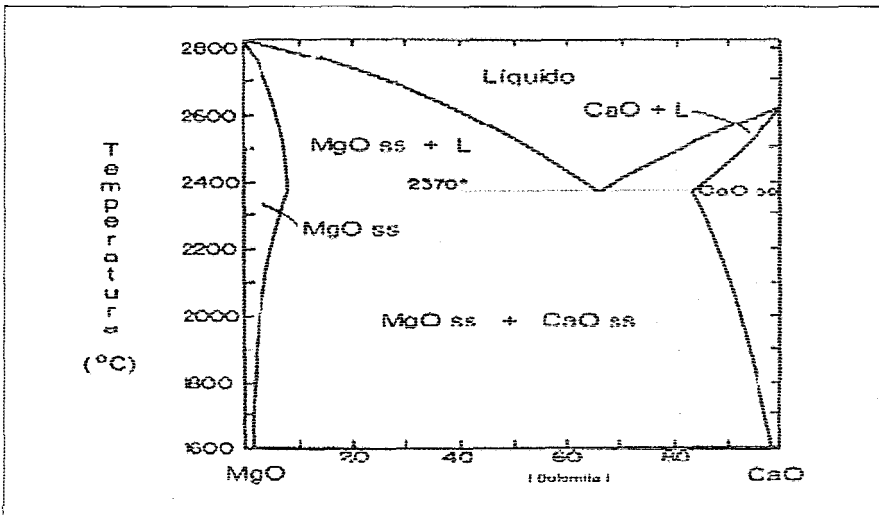
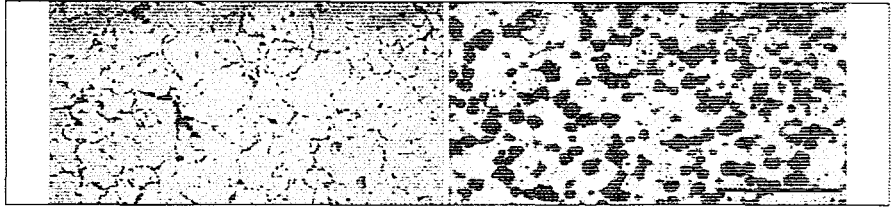


FIGURA 9.18 - Diagrama de equilíbrio de fases do sistema binário CaO-MgO (WHITE, 1970).⁴⁵

FIGURA 9.19 -
Micrografias eletrônicas
de vareadura: a) dolomita
crua b) doloma -
(elétrons retro-
espalhados: Fase escura:
MgO; fase clara
majoritária: CaO) -
materiais: seção polida
sem ataque, composição
química: 57% CaO; 41%
MgO e 3% de fases
secundárias (Fe_2O_3 , SiO_2
e Al_2O_3) (LEE, 2005).⁵²



Os refratários dolomíticos podem ser divididos em duas classes distintas, a classe dos dolomíticos queimados (doloma) e a dos dolomíticos contendo carbono (ligados a piche ou resina). A primeira classe de refratários dolomíticos possui aplicações em zonas de queima de fornos de cimento que, nas últimas décadas, juntamente com os materiais à base de $MgO-Al_2O_3$ e $MgO-ZrO_2$ têm substituído os refratários cromo-magnesianos (Cr_2O_3-MgO), devido a razões ambientais ligadas à formação de cromo hexavalente potencialmente cancerígeno (VELEZ, 2005 e MATOS JÚNIOR, 2001).^{53,54}

Os refratários dolomíticos ligados a piche foram os precursores dos modernos tijolos de magnésia-carbono utilizados atualmente. Seu desenvolvimento acompanhou a evolução do processo de refino primário nos convertedores a oxigênio, impulsionados pelo desenvolvimento do processo LD (Linz-Donawitz). Atualmente, os tijolos dolomíticos são empregados em fornos elétricos a arco, em convertedores a oxigênio e em revestimentos refratários de panelas de aço. No Brasil, o desenvolvimento de tijolos dolomíticos ligados a piche iniciou-se na década de 1990, com o objetivo de atender ao mercado das aciarias elétricas (OLIVEIRA JÚNIOR, 2000).⁵⁵

As vantagens dos tijolos dolomíticos ligados a piche são: elevada resistência ao choque térmico, elevada refratariedade e resistência ao ataque de escórias básicas, decorrentes da formação de uma cobertura de escória protetora (*coating*). O mecanismo de formação do *coating* na superfície dos tijolos dolomíticos é o seguinte:

- A escória insaturada em CaO reage com a face quente iniciando um processo de dissolução do tijolo dolomítico;
- Esta reação entre a escória e a superfície do tijolo forma uma fase líquida de elevada basicidade e viscosidade; e
- Forma-se, então, uma fase protetora de C_2S ($2CaO \cdot SiO_2$) com elevada refratariedade ($T_{fusão}: 2.130^\circ C$).

Escórias ricas em Fe_2O_3 ou Al_2O_3 (escórias oxidadas ou desoxidadas com alumínio), porém, são extremamente prejudiciais aos tijolos dolomíticos, uma vez que propiciam a formação de cálcio-ferritas e aluminatos de cálcio de baixo ponto de fusão. Outro fator importante para a elevação do desempenho das panelas dolomíticas é a manutenção da temperatura, uma vez que em 675°C ocorre uma transformação de fase $\beta\text{-C}_2\text{S}$ para $\gamma\text{-C}_2\text{S}$, acompanhada de grande expansão volumétrica que tende a destacar a *coating* protetor da superfície do revestimento.

9.6.6 Refratários cromíticos, magnesianos-cromíticos, cromíticos-magnesianos e espinélios

Os espinélios são uma série de minerais de estrutura cúbica e fórmula geral $\text{MO} \cdot \text{M}_2\text{O}_3$ com vastas aplicações na indústria de refratários, seja como constituinte principal ou fase acessória. Os espinélios podem ser produzidos sinteticamente (calcinados, sinterizados ou eletrofundidos) ou mesmo ser encontrados em minerais naturais, como na cromita, um mineral de estrutura bastante complexa contendo: cromita ($\text{FeO} \cdot \text{Cr}_2\text{O}_3$); picrocromita ($\text{MgO} \cdot \text{Cr}_2\text{O}_3$); espinélio ($\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$); magnésio-ferrita ($\text{MgO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$); magnetita ($\text{FeO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$); podendo conter, ainda, outras impurezas como silicatos: serpentina ($\text{Mg,Fe}_3\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$); talco ($\text{Mg}_3\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$); enstatita MgSiO_3 , entre outros (GRAY, 1971; DANA, 1984; ULMER, 1970).⁵⁶⁻⁵⁸ A Figura 7.20 apresenta o diagrama esquemático com os principais exemplos de espinélios de interesse da indústria de materiais refratários.

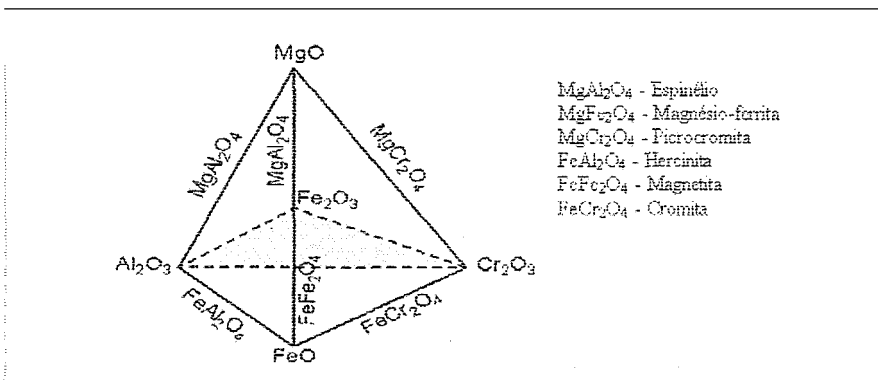
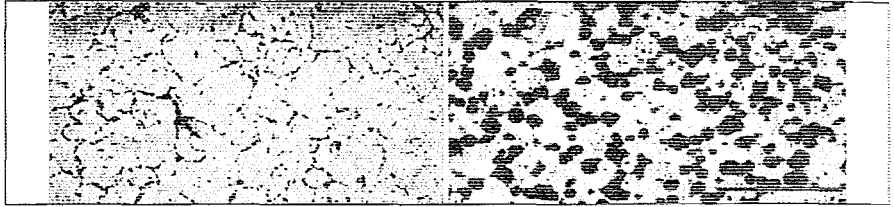


FIGURA 9.20 - Exemplos de espinélios do sistema: (Mg, Fe, Cr, Al, O) (GRAY, 1971).⁵⁶

FIGURA 9.19 -
Micrografias eletrônicas
de varredura: a) dolomita
crua b) doloma -
(elétrons retro-
espalhados: Fase escura:
MgO; fase clara
majoritária: CaO) -
materiais: seção polida
sem ataque, composição
química: 57% CaO; 41%
MgO e 3% de fases
secundárias (Fe_2O_3 , SiO_2
e Al_2O_3) (LEE, 2005).⁵²



Os refratários dolomíticos podem ser divididos em duas classes distintas, a classe dos dolomíticos queimados (doloma) e a dos dolomíticos contendo carbono (ligados a piche ou resina). A primeira classe de refratários dolomíticos possui aplicações em zonas de queima de fornos de cimento que, nas últimas décadas, juntamente com os materiais à base de $MgO-Al_2O_3$ e $MgO-ZrO_2$ têm substituído os refratários cromo-magnesianos (Cr_2O_3-MgO), devido a razões ambientais ligadas à formação de cromo hexavalente potencialmente cancerígeno (VELEZ, 2005 e MATOS JÚNIOR, 2001).^{53,54}

Os refratários dolomíticos ligados a piche foram os precursores dos modernos tijolos de magnésia-carbono utilizados atualmente. Seu desenvolvimento acompanhou a evolução do processo de refino primário nos convertedores a oxigênio, impulsionados pelo desenvolvimento do processo LD (Linz-Donawitz). Atualmente, os tijolos dolomíticos são empregados em fornos elétricos a a-se, em convertedores a oxigênio e em revestimentos refratários de panelas de aço. No Brasil, o desenvolvimento de tijolos dolomíticos ligados a piche iniciou-se na década de 1990, com o objetivo de atender ao mercado das aciarias elétricas (OLIVEIRA JÚNIOR, 2000).⁵⁵

As vantagens dos tijolos dolomíticos ligados a piche são: elevada resistência ao choque térmico, elevada refratariedade e resistência ao ataque de escórias básicas, decorrentes da formação de uma cobertura de escória protetora (*coating*). O mecanismo de formação do *coating* na superfície dos tijolos dolomíticos é o seguinte:

- A escória insaturada em CaO reage com a face quente iniciando um processo de dissolução do tijolo dolomítico;
- Esta reação entre a escória e a superfície do tijolo forma uma fase líquida de elevada basicidade e viscosidade; e
- Forma-se, então, uma fase protetora de C_2S ($2CaO \cdot SiO_2$) com elevada refratariedade ($T_{fusão}: 2.130^{\circ}C$).

Escórias ricas em Fe_2O_3 ou Al_2O_3 (escórias oxidadas ou desoxidadas com alumínio), porém, são extremamente prejudiciais aos tijolos dolomíticos, uma vez que propiciam a formação de cálcio-ferritas e aluminatos de cálcio de baixo ponto de fusão. Outro fator importante para a elevação do desempenho das panelas dolomíticas é a manutenção da temperatura: uma vez que em 675°C ocorre uma transformação de fase $\beta\text{-C}_2\text{S}$ para $\gamma\text{-C}_2\text{S}$, acompanhada de grande expansão volumétrica que tende a destacar o *coating* protetor da superfície do revestimento.

9.6.6 Refratários cromíticos, magnesianos-cromíticos, cromíticos-magnesianos e espinélios

Os espinélios são uma série de minerais de estrutura cúbica e fórmula geral $\text{MO}\cdot\text{M}_2\text{O}_3$ com vastas aplicações na indústria de refratários, seja como constituinte principal ou fase acessória. Os espinélios podem ser produzidos sinteticamente (calcinados, sinterizados ou eletrofundidos) ou mesmo ser encontrados em minerais naturais, como na cromita, um mineral de estrutura bastante complexa contendo: cromita ($\text{FeO}\cdot\text{Cr}_2\text{O}_3$); picrocromita ($\text{MgO}\cdot\text{Cr}_2\text{O}_3$); espinélio ($\text{MgO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$); magnésio-ferrita ($\text{MgO}\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$); magnetita ($\text{FeO}\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$); podendo conter, ainda, outras impurezas como silicatos: serpentina ($(\text{Mg},\text{Fe})_3\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$); talco ($(\text{Mg},\text{Fe})_3\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$); enstatita MgSiO_3 , entre outros (GRAY, 1971; DANA 1984; ULMER, 1970).⁵⁶⁻⁵⁸ A Figura 9.20 apresenta o diagrama esquemático com os principais exemplos de espinélios de interesse da indústria de materiais refratários.

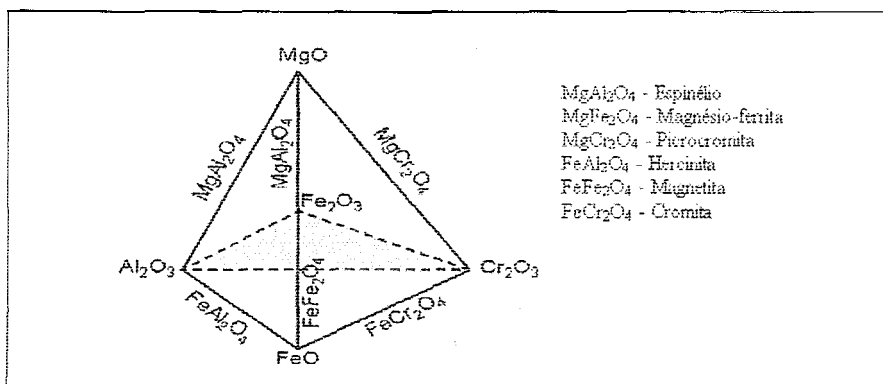
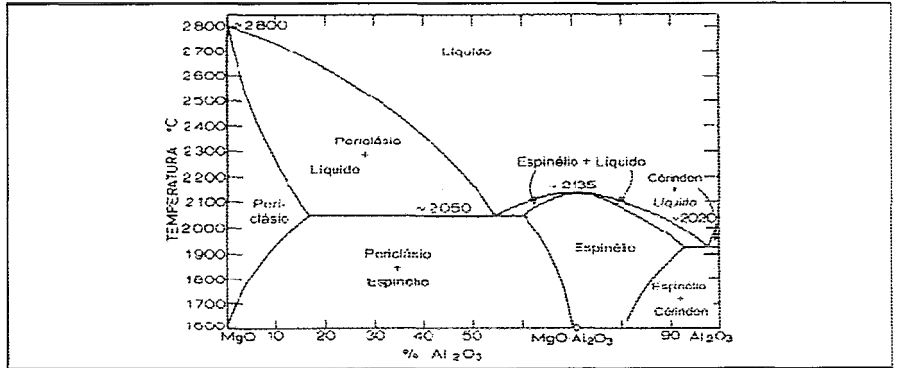


FIGURA 9.20 - Exemplos de espinélios do sistema: (Mg, Fe, Cr, Al, O) (GRAY, 1971).⁵⁶

Sistema Al_2O_3 - MgO - A composição química teórica do espinélio MgO - Al_2O_3 corresponde a 28,3% de MgO e 71,7% de Al_2O_3 . No entanto, em função da aplicação, os espinélios podem ser enriquecidos com Al_2O_3 (> 70%) ou MgO (> 30%). A Figura 9.21 mostra o diagrama de equilíbrio de fases do sistema MgO - Al_2O_3 .

FIGURA 9.21 - Diagrama de fases de equilíbrio do sistema MgO - Al_2O_3 (LEE e MOORE, 1998).⁶



O espinélio de MgO - Al_2O_3 possui um vasto campo de aplicação como material refratário, sendo utilizado em refratários de fornos de calcinação e cimento, concretos refratários, tijolos de Al_2O_3 - MgO -C para revestimento de panelas de aço, refratários de Al_2O_3 - MgO -SiC-C para transporte de gusa, entre outros.

Uma característica especial do espinélio de magnésia-alumina é que durante a sua formação em elevadas temperaturas (900° C - 1.200° C) ocorre uma expansão volumétrica de grande intensidade. Este processo de espinelização pode ser utilizado vantajosamente para travar e fechar juntas entre os tijolos e materiais refratários, durante o uso do material. Porém, um descontrole do processo de espinelização pode causar, também, falhas no revestimento pela formação de trincas e cisalhamento da estrutura. Em função disso, a maior parte dos materiais refratários utiliza o espinélio já formado (*ex-situ*) produzido por calcinação, sinterização ou fusão dos óxido de alumina e de magnésio.

Sistema MgO - Cr_2O_3 - Atualmente, os refratários cromo-magnesianos possuem aplicações em vários campos da metalurgia e indústria química, sendo utilizados em fornos de cimento, fornos de vidro, fornos de incineração,

reatores de desgaseificação de aço e metalurgia de metais não-ferrosos como cobre e chumbo. Nos últimos 20 anos, porém, pressões ambientais decorrentes da disposição dos resíduos refratários ou de interações e transformações químicas destes refratários (formação de cromo-hexavalente: Cr^{6+}) têm causado a substituição dos refratários contendo cromo por outros sistemas: $MgO-Al_2O_3$, doloma-zircônia, alumina-zircônia-sílica, zircônia e $MgO-C$ (LEE e MOORE, 1998; LEE e RAINFORTH, 1984).^{6,11} Do ponto de vista tecnológico, os tijolos cromo-magnesianos podem ser divididos em duas classes de produtos: os produtos quimicamente ligados e os produtos religados. A Figura 9.22 apresenta o diagrama de equilíbrio de fases do sistema $MgO-Cr_2O_3$.

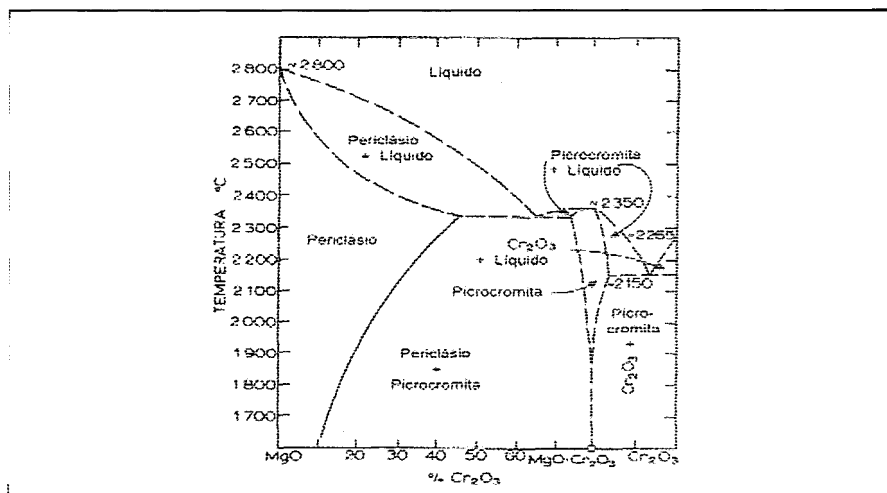
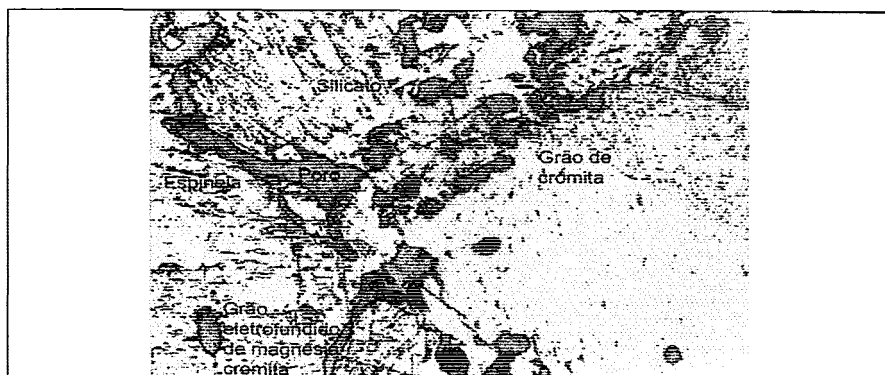


FIGURA 9.22 - Diagrama de equilíbrio de fases do sistema $MgO-Cr_2O_3$ (LEE e MOORE, 1998).⁶

Estes materiais são caracterizados por terem elevada resistência mecânica em elevadas temperaturas, elevada resistência à corrosão por escórias e estabilidade dimensional em temperaturas de até $1.800^{\circ}C$.

Os materiais cromo-magnesiano religados diferem-se dos tijolos quimicamente ligados apenas pelo tipo de matéria-prima. Enquanto os refratários quimicamente ligados utilizam misturas de cromita com magnésia calcinada (usualmente sintéticas), os produtos religados utilizam matérias-primas processadas por fusão em elevadas temperaturas ($\sim 2.450^{\circ}C$). A Figura 9.23 apresenta a microestrutura de um tijolo cromo-magnesiano do tipo religado.

FIGURA 9.23 -
Micrografia ótica da
seção polida de um tijolo
cromo-magnesiano
religado (MATOS
JÚNIOR, 2001).⁵⁴



9.6.7 Refratários contendo carbono (sistemas: óxidos + grafite + metal)

A utilização de carbono em refratários não é nova. Seu emprego foi, e ainda é, importante nos refratários à base de doloma resinados ou ligados a piche. Porém, a partir da década de 1970, com a utilização de grafita e resina no sistema MgO-C e a expansão do seu uso para outros sistemas refratários, como: Al_2O_3 -C; Al_2O_3 -MgO-C; Al_2O_3 -SiC-C; Al_2O_3 -MgO-SiC-C; Al_2O_3 -ZrO₂-C etc., transformaram os materiais: óxido refratário + carbono (grafita + ligante orgânico) + antioxidantes, nos principais materiais compósitos de alta tecnologia e de elevado desempenho, capazes de suportar condições operacionais cada vez mais agressivas e complexas.

Os sistemas óxidos + grafite podem ter composições tão variáveis quanto a sua aplicação, porém; são basicamente misturas de um ou mais óxidos, contendo carbono de 1% a 35% para aplicações desde altos-fornos até as panelas para transporte e refino secundário do aço líquido, passando por desgaseificadores, convertedores a oxigênio, fornos elétricos, panelas de transporte e tratamento dos gusa líquido e carro-torpedos. A Tabela 9.6 resume as principais variantes dos refratários de óxido+carbono.

TABELA 9.6 -
Composições dos
refratários: óxidos +
grafita (carbono) (LEE e
RAINFORTH, 1984;
NEMATÍ, SADRNEZHAAD
e MOOGHARI, 2005).^{11,59}

COMPONENTES		COMPOSIÇÃO (%)
Óxidos	MgO, Al ₂ O ₃ , ZrO ₂ ,	50 - 95
Carbono	Grafita lamelar, grafita particulada, piches etc.	5 - 35
Ligantes	Piche líquido, resinas fenólicas etc.	2 - 3
Antioxidantes metais	Al, Al-Mg, Si, Al-Si, Fe-Si, outras ligas etc	0 - 5
Antioxidantes especiais	SiC, B ₄ C, outros carbetos, nitretos e boretos etc.	0 - 15

Carbono: grafita + ligante - O composto carbono/grafita + óxido/antioxidante (Figura 9.24) é capaz de modificar o comportamento termomecânico e termoquímico do material refratário, de modo que as propriedades do conjunto sejam superiores às dos componentes separadamente (sinergia). Em termos gerais, o carbono/grafita muda a tensão superficial do refratário diminuindo a molhabilidade por metais e escórias líquidas. Outro ponto importante são as reações entre os óxidos + antioxidantes com o carbono em elevadas temperaturas (especialmente MgO+C) capazes de diminuir a porosidade da face quente do refratário, em virtude de processos de redução/oxidação do óxido de magnésio = mudanças do potencial de oxigênio do sistema: refratário-escória-metal. A Tabela 9.7 apresenta as principais variáveis que controlam os fenômenos de oxirredução nos produtos refratários contendo carbono.

SISTEMA REFRAATÁRIO (MATRIZ E AGREGADOS)	FONTE DE CARBONO	ANTIOXIDANTES	VARIÁVEIS EXTERNAS
- Tipos de óxidos refratários;	- Tipo de fonte de carbono;	- Tipos;	- Temperatura e gradiente térmico;
- Tipo, tamanho e área superficial dos cristais;	- Sistema ligantes;	- Quantidade adicionada;	- Tipo do aço/escória
- Fases acessórias;	- Grafitação do sistema ligante;	- Estabilidade química;	- Grau de oxidação do aço/escória;
- Porosidade;	- Quantidade inicial;	- Utilização simples ou conjunta;	- Basicidade e fluidez da escória;
- Permeabilidade;	- Tamanho das partículas/lamelas;	- Área e tamanho das partículas;	- Estabilidade do coating de escória;
- Distribuição e tamanho dos poros;	- Área superficial;	- Afinidade química com os óxidos refratários	- Sistema gasoso: PH ₂ O, PH ₂ , PGO, PCO ₂ , PN ₂ , PO ₂ etc.
- Condutividade térmica etc.	- Defeitos superficiais;	- Grau de hidratação após queima redutora;	
	- Teores de cinza etc.	- Grau de homogeneização da matriz refratária etc.	

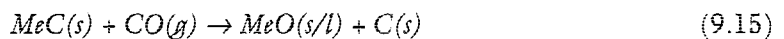
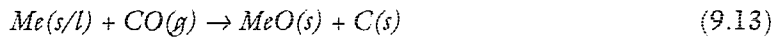
TABELA 9.7 - Principais variáveis ligadas aos processos de oxirredução nos sistemas refratários: óxido + carbono + antioxidantes (LEE e RAINFORTH, 1994; ODEN e MCCUNE, 1987; MOCHIDA, 1987), 11, 60, 61

O maior problema dos refratários contendo carbono é o processo de oxidação em elevadas temperaturas. Uma das alternativas para diminuir este processo de oxidação é a utilização de antioxidantes (metais, ligas ou não-metais) adicionados à composição refratária, como mostrado na Figura 9.24. Em altas temperaturas estes antioxidantes atuam de forma a prevenir/diminuir o processo de oxidação do carbono.

FIGURA 9.24 -
Micrografia ótica de um
refratário de magnésia-
carbono, contendo grãos
eletrofundidos e
sinterizados óxido de
magnésic, grafita lamelar
e alumínio metálico como
antioxidante
(MAGNESITA S.A.,
2005).⁶²



Usualmente, estes materiais são metais ou ligas de elevada afinidade química pelo carbono, ou compostos não-metálicos (carbetos, nitretos, boretos etc.). De maneira geral, os aditivos utilizados como antioxidantes funcionam através da deposição de carbono, proveniente das reações entre as espécies metálicas ou carbetos com o monóxido de carbono, conforme apresentado a seguir, pelas equações (9.13) a (9.15).



Onde:

$Me(s/l/g)$ – metal de elevada afinidade pelo carbono e pelo oxigênio;

$MeC(s)$ – carbeto metálico; e

$MeO(s/l)$ – óxido do metal (Me)

O emprego correto (tipo e quantidade adicionada) do antioxidantes é a variável mais importante para a especificação de um refratário do tipo óxido+carbono, pois todas as transformações químicas *in situ* estão relacionadas com modificações estruturais, termomecânicas e físicoquímicas durante a campanha do refratário. A Tabela 9.8 mostra os principais sistemas

refratários do tipo: óxido + carbono + antioxidante, utilizados em siderurgia (CARNIGLIA e BARNA, 1982; LEE e MOORE, 1998; GRAYSON, 1985; LEE e RAINFORTH, 1984; TECHNICAL ASSOCIATION OF REFRACTORIES OF JAPAN, 1998). 5,6,8,11,15

SISTEMA	EQUIPAMENTOS
MgO-C	Panelas de aço para transporte e refino secundário (linha de metal e/ou escória), Convertedores a oxigênio (LD/BOF)*
MgO-CaO-C	Fornos elétricos a arco (FEA)*
MgO-Al ₂ O ₃ -C	Panelas de aço de aciarias elétricas (aços acalmados ao silício).
Al ₂ O ₃ -C	Panelas de aço (linha de metal e zona de impacto), placas de mecanismos de válvula gaveta, panelas de transporte de gusa.
Al ₂ O ₃ -ZrO ₂ -C	Válvulas longas e submersas, carros torpedos (impregnados).
Al ₂ O ₃ -SiC-C	Placas de mecanismos de válvula gaveta.
Al ₂ O ₃ -MgO-SiC-C	Carro-torpedos, panelas de gusa com dessulfuração na panela.

TABELA 9.8 – Principais sistemas refratários de óxidos + carbono utilizados e siderurgia.

A Figura 9.25 apresenta dois dos principais equipamentos siderúrgicos onde a utilização de tijolos refratários de MgO-C é predominante: o forno elétrico à arco e o convertedor a oxigênio.

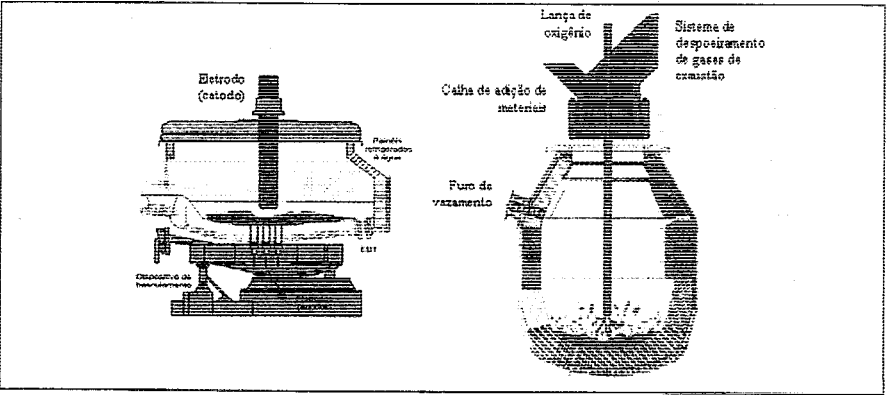


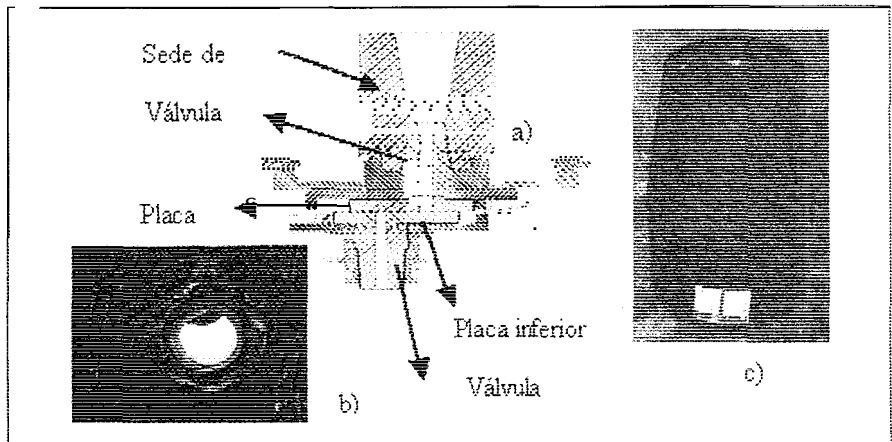
FIGURA 9.25 - Diagrama esquemático dos projetos refratários em um forno elétrico a arco (DC-FEA) e, em um convertedor a oxigênio (BOF/LD) (MAGNESITA S.A., 2006).⁶²

Outra aplicação especial dos sistemas: óxido+carbono+antioxidante é a utilização do antioxidante carbetto de silício, como no sistema alumina-carbetto de silício-carbono (Al₂O₃-SiC-C). Este sistema é usualmente utilizado em equipamentos de transporte de gusa líquido (LENZ E SILVA e BITTENCOURT, 2003)⁶³ e em altos-fornos de pequena capacidade. O carbetto de silício, além de funcionar como antioxidante de longa duração, aumenta também a resistência à erosão destes refratários.

9.6.8 Refratários especiais

Os refratários especiais incluem poucos tipos de sistemas, entre eles os refratários de zircônia (parcial ou completamente estabilizada) $ZrO_2-Al_2O_3-SiO_2$, além de algumas classes de refratários de alta alumina ligados a SIALON ($SiO_2-Al_2O_3-N$), carbetos, boretos, silicetos, nitretos etc. Entretanto, o seu emprego é restrito e bastante específico. Duas aplicações clássicas dos refratários de zircônia em lingotamento contínuo são em válvulas de sistemas de controle de vazamento de aço líquido (válvula superior e/ou em insertos), ou como adições em refratários de placas deslizantes como mostrado na Figura 9.26.

FIGURA 9.26 - a) Projeto refratário de um mecanismo de válvula gaveta, onde se utilizam adições ou válvulas de zircônia estabilizada (insertos); b) Foto de uma válvula superior refratária de alta alumina ligada a SIALON em uso; c) Válvula superior da panela de aço da CSN (MAGNESITA S.A., 2006; VEIGA, 2004).^{62,64}



A zircônia possui propriedades especiais, como: elevado ponto de fusão, elevada resistência à erosão e elevada resistência à corrosão por espécies ácidas, tornando seu emprego ideal em sistemas de controle de fluxo de aço líquido. Porém, a zircônia pura possui transformações de fase durante o aquecimento/resfriamento (monoclínica \rightarrow tetragonal \rightarrow cúbica). A transformação tetragonal \leftrightarrow monoclínica ocorre sem difusão (martensítica reversível) associada com uma larga histerese ($\sim 200^\circ C$) e acompanhada de uma variação volumétrica em torno de 4% a 5% (BASU, VLEUGELS e BIEST, 2004).⁶⁵ Esta transformação é capaz de degradar completamente os dispositivos refratários.

Uma das alternativas para a estabilização do óxido de zircônio é a sua dopagem com óxidos modificadores, como: - CaO, MgO, terras-raras etc. - que propiciam uma mudança metaestável do equilíbrio de fases (modificação das relações entre os tamanhos atômicos do retículo cristalino). Esta estabilização pode ser completa ou parcial em função da quantidade de estabilizantes, distribuição espacial e do tipo de tratamento térmico realizado.

9.7 Engenharia e Aplicação de Refratários

A tendência tecnológica no desenvolvimento da tecnologia refratária pode ser dividida em três áreas:

- Pesquisa & Desenvolvimento;
- Engenharia de Manufatura e Processo; e
- Engenharia de Aplicação e Assistência Técnica.

De maneira geral estas três áreas cobrem todo o ciclo necessário da concepção do produto até o fim da cadeia produtiva, onde os processos de reciclagem, disposição dos resíduos e dos materiais inservíveis fecham/ reiniciam o ciclo de desenvolvimento. A Figura 9.27 apresenta o diagrama destas relações.

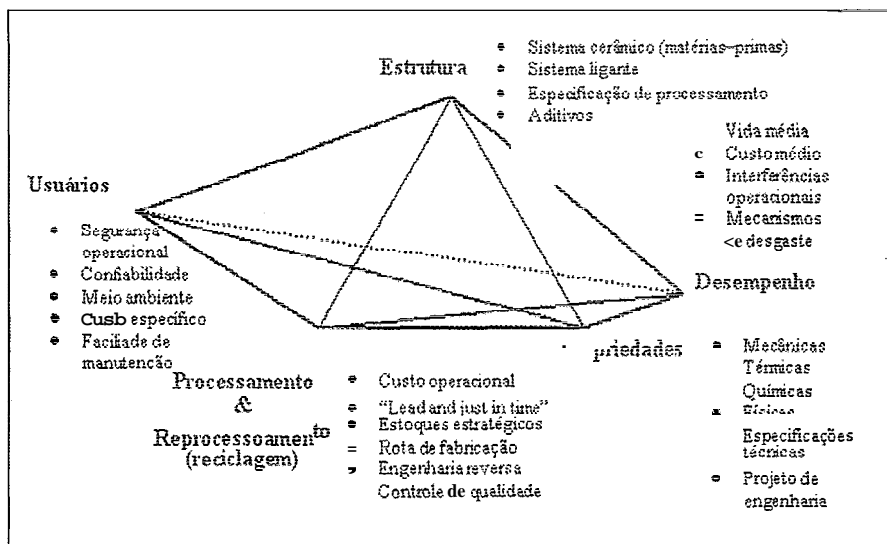


FIGURA 9.27 Interligações entre os vários elos da cadeia de desenvolvimento dos produtos refratários: da concepção do produto até o usuário final (LENZ E SILVA; BITTENCOURT, 2002; 2003; MIT, 2005), 63,66,67

Todas estas áreas são intrinsicamente interligadas e estão focadas para garantir as expectativas e as necessidades dos clientes (diminuição dos custos, garantia de desempenho, garantia de qualidade, diminuição de estoques, disponibilidade operacional, ambientais etc.).

9.7.1 Principais ferramentas utilizadas no desenvolvimento e no aprimoramento dos produtos refratários

Um campo de grande crescimento e importância no auxílio do desenvolvimento e do aprimoramento dos produtos refratários é a utilização de ferramentas de várias áreas do conhecimento de engenharia no projeto, implantação, modelamento, otimização e simulação das características e propriedades dos refratários. A utilização destas ferramentas de forma conjunta e integrada tem os seguintes objetivos:

- Diminuição do tempo e do custo de desenvolvimento de novos produtos;
- Diminuição da quantidade e da necessidade de testes laboratoriais;
- Garantia de um desenvolvimento mais focado nas necessidades e expectativas dos clientes;
- Visão integrada do processo: pesquisa, desenvolvimento, fabricação, aplicação e manutenção; e
- a Visão global do ciclo de vida e dos processos de reciclagem dos produtos refratários após o uso.

9.7.2 Estudo *post-mortem* dos produtos refratários

O desempenho dos materiais refratários depende de uma série de fatores que vão desde a escolha adequada da especificação técnica do projeto de engenharia até as condições operacionais dos processos metalúrgicos.

Uma das ferramentas mais úteis para a determinação das causas fundamentais das falhas dos revestimentos e entendimento dos mecanismos de desgaste é a realização de caracterizações sistemáticas do produto refratário após o término de sua campanha. Este tipo de estudo recebe o nome de análise *post-mortem*. A Tabela 9.9 apresenta a seqüência de etapas de um estudo *post-mortem*, juntamente com alguns pontos críticos necessários à condução adequada deste tipo de investigação (LENZ E GILWA, 2004).68

ETAPA	TAREFA	OBSERVAÇÕES E VARIÁVEIS	TABELA 3.3 - Etapas de um estudo <i>post-mortem</i> de refratários
Definição de um estudo <i>post-mortem</i>	Levantamento das condições operacionais às quais o material refratário esteve sujeito	Tempo de operação; Tratamentos metalúrgicos; <i>Power on</i> - ~ volume e vazão de gases; Carga média transportada; Temperaturas (médias, máximas e mínimas); Paradas operacionais e intervenções mecânicas; Tipos de tratamentos metalúrgicos e escórias.	
Coleta da amostra	Coleta e identificação correta do posicionamento da amostra e do reator metalúrgico	Tipo de dispositivos mecânicos para a coleta da amostra (uso de dispositivos pneumáticos, hidráulicos, água etc.) e tempo de espera (saída de operação - coleta da amostra).	
Envio da amostra	Embalagem, identificação e envio das amostras	Tempo e acondicionamento e meio de transporte das amostras	
Recebimento das amostras	Análise inicial e definição dos testes a serem realizados	Levantamento fotográfico das condições das amostras recebidas, visualização de condições iniciais: formatos, presença de trincas, cheiro, áreas oxidadas, área reagida, presença de metais e escória etc.	
Definição dos testes	Mecânicos, químicos, físicos, microscopia e microanálise etc.	Porosidade, densidade, composição química, determinação de fases mineralógicas, seção polida etc.	
Realizações de análises e conclusões sobre os mecanismos de desgaste	Análise, modelamento e diagnóstico da falha	Finalização do estudo e avaliação conjunta de melhoria do produto ou processo	

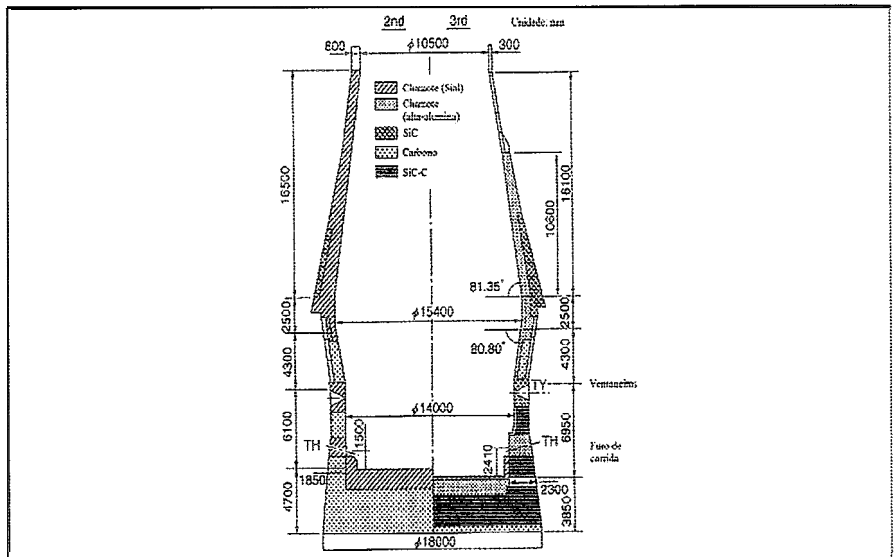
Nem sempre é possível determinar a causa fundamental de um desgaste prematuro de um refratário, através de um estudo *post-mortem*, uma vez que o estudo *post-mortem* não consegue detectar ou avaliar todas as mudanças que ocorreram durante a campanha (meio do processo), mas somente aquelas modificações estruturais, químicas e mecânicas que aconteceram no final da vida do revestimento ou que permaneceram no material refratário.

9.7.3 Exemplos de aplicações e principais usos dos materiais refratários em siderurgia

O emprego dos materiais refratários nos equipamentos siderúrgicos depende de uma série de fatores intrinsecamente ligados com a etapa de transformação metalúrgica do gusa e do aço. A definição de cada projeto refratário é específica para cada usuário (usina, planta, ciclo operacional, carteira de produtos etc.). Porém, de modo geral, pode-se dividir a aplicação dos refratários em algumas classes e tipos de produtos.

- *Redução: (altos-fornos, área de corrida e de transporte de gusa líquido)* - Os refratários aplicados nos altos-fornos englobam uma vasta gama de produtos: dos blocos de carbono utilizados nas regiões dos cadinhos, aos tijolos sílico aluminosos, aluminosos e de alumina-carbeto de silício-carbono. E as propriedades e especificações técnicas dependem basicamente da posição de aplicação dos refratários ao longo do forno (Figura 9.28), do tipo de interação com as matérias-primas e dos produtos das reações de transformações metalúrgicas dentro do alto-forno, tais como:
 - Características das matérias-primas: composição química e tipo da fonte redutora (carvão vegetal, coque, injeção de finos, enriquecimento de oxigênio, umidade da carga etc.);
 - Interação sólido-sólido (erosão decorrente da descida da carga, carregamento das matérias-primas);
 - Interação sólido-gás (erosão pelo furo de gases/particulados em contracorrente, ataque pelo monóxido de carbono, recirculação do álcalis e zinco);
 - Interação sólido-líquido (erosão pelo metal líquido e corrosão pela escória);
 - Temperaturas e gradientes térmicos (sistemas de refrigeração);
 - Qualidade do gusa (temperatura e composição química) e volume de escória;
 - Ciclos operacionais de aberturas para vazamento do gusa/escória;
 - Proteção do cadinho (TiO_2/TiC);
 - Produtividade etc.

FIGURA 9.28- Diagrama esquemático da evolução do projeto refratário das campanhas 2 e 3 do alto-forno número 4 da usina de Fukuyama (NKK) (TECHNICAL ASSOCIATION OF REFRACTORIES OF JAPAN, 1998).¹⁵



As grandes evoluções dos projetos de altos-fornos contemplam mudanças substanciais na engenharia térmica (sistemas de resfriamento) conjugadas com a utilização de materiais refratários de elevada condutividade térmica ou com a utilização de materiais refratários de baixa condutividade térmica e propriedades termoquímicas e termomecânicas superiores.

Uma atenção especial é dada à área de corrida do alto-forno, pois esta é sem nenhuma dúvida o setor mais dinâmico do ponto de vista de engenharia refratária do alto-forno, não só por seus ciclos e campanhas serem menores em termos relativos, mas também porque sua gestão interfere diretamente na produtividade e na disponibilidade de produção dos altos-fornos.

Os refratários aplicados na área de corrida podem ser divididos em dois locais distintos: massas refratárias de tamponamento aplicadas nos furos de corrida e os refratários dos canais de corrida (principal e secundário). As massas de tamponamento são multicomponentes, baseadas em sistemas do tipo Al_2O_3 -SiC-C, podendo ter adições de metais (Si, Fe, Fe-Si₃N₄) e sistema ligante baseado em resinas ou piche. Os materiais aplicados nos canais são usualmente concretos de elevado teor de alumina/SiC.

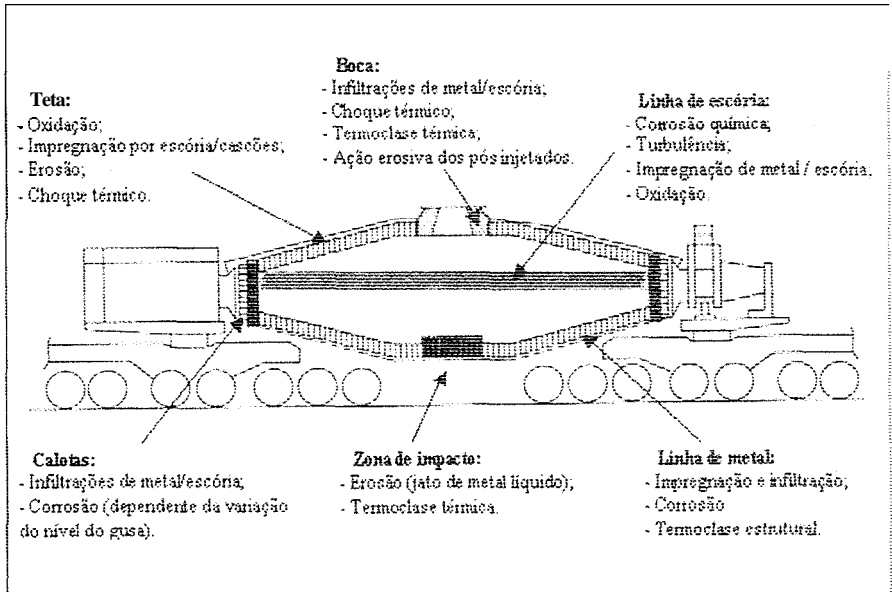
Outros equipamentos importantes em contato direto com o gusa líquido são os carros-torpedos que transportam o gusa dos altos-fornos para serem transformados em aço nas aciarias. Os carros-torpedos, além de funcionarem como um pulmão de metal líquido para ajuste de sincronismo entre a redução e a aciaria, são usualmente os reatores onde se removem o enxofre do gusa, através da adição de agentes dessulfurantes (CaO, CaO-CaC₂, CaO-Mg, CaO-Al, CaO-Al-C etc.). Nos últimos dez anos tem-se observado no Brasil uma migração do processo de dessulfuração realizado nos carros-torpedos para a panela de gusa.

Os principais mecanismos de desgaste dos refratários usados nos carros-torpedos podem ser visto na Figura 9.29. Estes mecanismos estão intimamente ligados às interações entre o metal líquido, a escória e a condição térmica dos carros-torpedos. Em especial, na manutenção do calor e na realização de pré-tratamentos do gusa dentro dos carros-torpedos.

De maneira geral, os refratários utilizados nos carros-torpedos são tijolos da família Al_2O_3 -SiC-C, podendo ter adições de MgO e/ou espinélio (MgO* Al_2O_3), ou tijolos aluminosos e sílico aluminosos impregnados com piche. Na boca dos carros-torpedos, usualmente, aplicam-se concretos refratário de alta alumina/SiC com adições de fibras metálicas.

Refratários para Siderurgia

FIGURA 9.29 - Principais mecanismos de desgaste dos carros-torpedos por zonas (TECHNICAL ASSOCIATION OF REFRACTORIES OF JAPAN, 1998; LENZ E SILVA e BITTENCOURT, 2002).^{15,66}



Aciaria - Do ponto de vista dos materiais refratários, a aciaria é onde se encontram as maiores variações de composição, formatos e tipos. É também o local de maior aplicação e consumo dos materiais refratários em uma usina siderúrgica, seja na forma de tijolos, concretos, argamassas, materiais de projeção, fibras isolantes ou dispositivos especiais, como válvulas e mecanismos de controle de vazão de aço líquido.

Esta diversidade de tipos e sistemas refratários é decorrente das várias etapas de transformação metalúrgica envolvidas no processo de refino metalúrgico primário e secundário nas aciarias. A Tabela 9.10 apresenta de forma resumida os principais sistemas de óxidos refratários e compósitos empregados nos diferentes reatores metalúrgicos de processamento do aço líquido (LEE e MOORE, 1998; LEE e RAINFORTH, 1994; TECHNICAL ASSOCIATION OF REFRACTORIES OF JAPAN, 1998).^{6,11,15}

Após o término dos tratamentos metalúrgicos de refino secundário, o aço é finalmente transferido das panelas para as máquinas de lingotamento contínuo ou para as lingotciras (no caso do lingotamento convencional), onde se solidifica na forma de lingotes, placas ou tarugos, seguindo para as etapas subsequentes de conformação mecânica nas laminações.

EQUIPAMENTO	REGIÃO	PRINCIPAIS SISTEMAS REFRACTÁRIOS
Convedeadores a oxigênio	Revestimento de segurança	MgO, SiO ₂ -Al ₂ O ₃
	Revestimento de trabalho	MgO-C (ligados à resina, ligados a piche e/ou impregnados)
Fornos elétricos	Revestimento de trabalho, luvas EBT	MgO-C (ligados à resina, ligados a piche e impregnados), massa básicas
	Delta	Concretos pré-moldados de alta alumina/Cr ₂ O ₃
Desagaseificadores (RH – Ruhrstahl-Heraus)	Pernas (subida v descida)	MgO-Cr ₂ O ₃ (quimicamente ligados)
CAS-OB (Composition adjustment by sealed argon bubbling)	Snorkel	Concretos aluminosos e/ou de alta alumina (> 90%), concretos de alta alumina/espínélio
AOD (Argon oxygem decarburization)	Reator (revestimento de trabalho)	MgO-Cr ₂ O ₃ (quimicamente ligados), tijolos dolomíticos
Painéis de aço	Fundo/impacto	Al ₂ O ₃ -MgO-C; Al ₂ O ₃ -C; MgO-C
	Linha de metal	MgO-C, CaO-MgO-C, Al ₂ O ₃ -MgO-C, Al ₂ O ₃ (concretos de aluminato de cálcio)
	Linha de escória	MgO-C, Cr ₂ O ₃ -MgO;
Snorkels e lanças	-	Al ₂ O ₃ (concretos de aluminato de cálcio), concretos alta alumina + espínélio (Al ₂ O ₃ -MgO)
Painéis de gusa	Fundo/impacto/linha de metal	Al ₂ O ₃ -C, Al ₂ O ₃ -MgO-C, Al ₂ O ₃ -SiC-C
	Linha de escória	Al ₂ O ₃ -C; Al ₂ O ₃ -SiC-C
Distribuidores	Revestimento de trabalho	Concretos / tijolos de alta alumina
	Massa de cobertura	MgO
Mecanismos e sistema de lingotamento contínuo	Placas de válvula gaveta	Al ₂ O ₃ -C, Al ₂ O ₃ -ZrO ₂ -C,
	Válvula longa	Al ₂ O ₃ -C
	Tubo submerso	Al ₂ O ₃ -C, ZrO ₂ -SiO ₂ -C
	Tampão	Al ₂ O ₃

TABELA 9.10 - Principais equipamentos e tipos de refratários empregados durante o reino primário e secundário do aço.

REFERÊNCIAS

- 1 MAGNESITA S.A. *Catálogo técnico de produtos*. Belo Horizonte, 2004.
- 2 MILLER, J. Today's refractory market and the refractory market of the future. In: CONGRESO DA ASOCIACIÓN LATINOAMERICANA DE FABRICANTES DE REFRACTARIOS. 2000, Pucon. *Anais ... Chile: Alafar*, 2000. / Cd-rom.

- 3 DUARTE, A.K.; GONÇALVES, G.E.; BITTENCOURT, P.R.H.M.; JUNQUEIRA, J.O.F. Latin american refractory industry overview. *Refractories Applications and News: TRI/ACerS*, v. 10, n. 5, Sept./Oct. 2005.
- 4 SEMLER, C. E. Continuous improvement of refractories continues. *Refractories Applications and News*, v. 10, n. 6, p. 4-5,14, Nov.-Dec. 2005.
- 5 CARNIGLIA, S.C.; BARNA, G.L. *Handbook of industrial refractories technology: principles, types, properties and applications*. New Jersey: Noyes Publications, 1992,
- 6 LEE, W.E; MOORE, R. E. Evolution of in situ refractories in the 20th Century. *Journal of American Ceramic Society*, v. 81, n. 6, p. 1385-1341. 1998.
- 7 LEWIS, G. Applications for traditional ceramics. In: AMERICAN SOCIETY FOR METALS INTERNATIONAL HANDBOOK COMMITTEE. *Engineered materials handbook: ceramics and glasses*. Materials Park. 1991. v
- 8 GRAYSON, M. (Ed.). Refractories. In: _____. *Encyclopedia of glass, ceramics, and cement*. New York: Wiley, 1985.
- 9 HANCOCK, J.D. *Practical refractories*. Netherton: Hensman Graphics, 1988.
- 10 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 10237: Materiais refratários: classificação*. Rio de Janeiro, 2001.
- 11 LEE, W.E.; RAINFORTH, W.M. *Ceramic microstructures: property control by processing*. London: Kluwer, 1994.
- 12 RAHAMAN, M. N. *Ceramic processing and sintering*. 2.ed. New York: Marcel Dekker, 2003.
- 13 HAPER, C. A. (Ed). *Handbook of ceramics, glasses, and diamonds*. New York: McGraw-Hill, 2001.
- 14 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CERÂMICA. *Informações técnicas, processo de fabricação, fluxogramas*. Disponível em: <http://www.abceram.org.br/asp/abc_503.asp>. Acesso em: 5 out. 2006.
- 15 TECHNICAL ASSOCIATION OF REFRACTORIES OF JAPAN. *Refractories handbook*. Tokyo, 1998.

- 16 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 8826*: Materiais refratários: terminologia. Rio de Janeiro, 1997.
- 17 DINGER, D. R. *Characterization techniques for ceramists*. Kearney: Morris, 2005.
- 18 MORREL, R. *Handbook of properties of technical and engineering ceramics*: Part I: An introduction for engineer and design. London: National Physics Laboratory, 1985.
- 19 SEGADÃES, A.M.; FUMO, D. A. LC and ULC refractory castables: Reaction with the fine component matrix. In: UNIFIED INTERNATIONAL TECHNICAL CONFERENCE ON REFRACTORIES, 8., 1999, Berlin. *Proceedings...* Berlin: German Refractories Association, 1999. p. 81-85.
- 20 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 8115*: Materiais refratários isolantes conformados - Determinação da densidade de massa aparente. Rio de Janeiro, 1996.
- 21 _____. *NBR 6220*: Materiais refratários densos conformados - Determinação da densidade de massa aparente, porosidade aparente: absorção e densidade aparente da parte sólida. Rio de Janeiro, 1997.
- 22 _____. *NBR 6221*: Materiais refratários - Determinação da densidade de massa real. Rio de Janeiro, 1995.
- 23 _____. *NBR 8003*: Materiais refratários isolantes conformados - Determinação da porosidade total. Rio de Janeiro, 1997.
- 24 _____. *NBR 8592*: Materiais refratários densos granulados - Determinação da densidade de massa aparente, da absorção e da porosidade aparente. Rio de Janeiro, 1995.
- 25 _____. *NBR 11221*: Materiais refratários não-conformados - Determinação da densidade aparente. Rio de Janeiro, 1997.
- 26 _____. *NBR 1273*: Materiais refratários granulados finos - Determinação da massa específica aparente solta. Rio de Janeiro, 2002.
- 27 PETIT, J. Relation entre le module d'élasticité et les propriétés physiques des matériaux réfractaires: APPLICATION AUX DIQUES DE POUCHES D'ACIÈRE. *Revue de Métallurgie*, v. 80, n. 8-9, p. 657-663, Août/Sept., 1983.
- 28 BUTTER, J. A. M. The significance of the modulus of elasticity for refractory materials and engineering. Ijmuiden. Pays-bas: Hoogovens report, 1987.

- 29 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 6222*: Material refratário - Determinação do cone pirométrico equivalente. Rio de Janeiro, 1995.
- 30 LENZ E SILVA, G. F. B., BITTENCOURT, L. R. M.; FREITAS, C. R.; NUNES, J.M.; AUAD, M. V. Welding: a new development for MgO-C materials. In: UNITECR'03 CONGRESS, 2003, Osaka/Japan. Japan : The Technical Association of Refractories, 2003. 1 cd-rom.
- 31 QUINTELA, M. A; PESSOA, C. A; RODRIGUES, J. A. E PANDOLFELLI, V. C. A novel methodology to evaluate the oxidation resistance of carbon-containing refractories. *Refractories Applications and News*, v. 7, n. 1, Jan./Feb. 2002.
- 32 MAGNESITA S.A. Centro de Pesquisa e Desenvolvimento "Antônio Mourão Guimarães". Laboratório de Microscopia. *Banco de dados de microestruturas cerâmicas*. Contagem, 2005.
- 33 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 8830*: Material refratário - Determinação do ataque por escória pelo método dinâmico. Rio de Janeiro, 1985.
- 34 _____ *NBR 9641*: Materiais refratários densos - Determinação do ataque por escória pelo método estático. Rio de Janeiro, 1995.
- 35 QUINTELA, M. A; MELO, T. M. F.; LAGE, I. J.; PANDOLFELLI, V. C.; RODRIGUES, J. A. Análise da resistência ao choque térmico de refratários contendo carbono. *Cerâmica*, v. 47, n. 304, p. 174-179, dez. 2001.
- 36 SANTOS, W. N. O método do fio quente: técnica em paralelo e técnica de superfície. *Cerâmica*, v. 48, n. 306, p. 86-91, abr.-jun. 2002.
- 37 LINSEIS. *Thermal analysis instruments*. Disponível em: <http://www.linseis.net/html_en/home.php>. Acesso em: 03 set. 2005.
- 38 ENCYCLOPEDIA of chemical technology. 4.ed. New York: John Wiley & Sons, 1997. v. 24.
- 39 THE AMERICAN CERAMIC SOCIETY. *ACerS-NIST Phase equilibria diagrams software, version 2.1*. Westerville: 2003. 1 CD-Rom.
- 40 LEE, W, E., VIEIRA, W., ZHANG, S., AHARI, K.; GHANBARI, S. H.; PARR, C. Castable refractory concretes. *International Materials Reviews*. v. 46 , n. 3, p. 145-107, Mar. 2001.

- 41 SCRIVENER, K.L.; CAPMAS, A. Calcium aluminate cements. In: LEA, F.M. *Chemistry of cement and concrete*. 4.ed. Oxford: Elsevier Butterworth - Heinemann, 2004.
- 42 NISHIKAWA, A. *PLIBRICO: technology of monolithic refractories*. Tokyo: Plibrico, 1999.
- 43 OLIVEIRA, I. R.; STUART, A. R.; PILEGGI, R. G.; PANDOLFELLI, V.C. *Dispersão e empacotamento de partículas: princípios e aplicações em processamento cerâmico*. São Paulo: Fazenda Arte, 2000.
- 44 CAPMAS, A.; DAMIDOT, D. Effect of temperature on setting time of calcium aluminate cements. In: AUTORES. *Calcium aluminates cements*. London: E & F. N. Spon, 1990. p. 65-80.
- 45 WHITE, J. Magnesia-based refractories. In: ALPER, A.M. (Ed.). *High temperature oxides*. Part I: Magnesia, lime, and chrome refractories. New York: Academic Press, 1970. p. 77-139.
- 46 SIMONIN, F.; OLAGNON, C.; MAXIMILIEN, S.; FANTOZZI, G.; DIAZ, L.A.; TORRECILLAS, R. Thermomechanical behavior of high alumina refractory castables with synthetic spinel additions. *Journal of American Ceramical Society*, v. 83, n. 10, p. 2481-2499, 2000.
- 47 BRANDÃO, P. G. GONÇALVES, G. E.; MOTATO, A; G. Mecanismos de hidratação/carbonatação de sínteres de magnésia. In: CONGRESSO DA ASSOCIACION LATINOAMERICANA DE FABRICANTES DE REFRACTÁRIOS – ALAFAR, 2000, Santiago/Chile. *Anais...* 1 cd-rom.
- 48 JELLINGLAUS, M. *Electric steelmaking*. Düsseldorf: Verlag Stahleisen, 1989.
- 49 KAPPMAYER, K. K., HUBLE, D. H. Pitch-bearing MgO-SaO refractories for BOP process. In: ALPER, A.M. (Ed.). *High temperature oxides*. Part I: Magnesia, lime, and chrome refractories. New York: Academic Press, 1970. p. 140-167.
- 50 OTHMAN, A. G. M., EL-MAATY, M. A. ABOU, SERRY, M. A. Hydration-resistant lime refractories from Egyptian limestone and raw materials. *Ceramics International*, v. 27, n. 7, p. 801-807, 2001.
- 51 ANTONOV, G. I., NEDOSVITII, V. P., KULK, A. S., SEMENENKO, O. M. Stabilized dolomite refractories. *Refractories and Industrial Ceramics*. v. 45, n. 3, p. 160-164, May 2004.

- 52 LEE, W. E. In: DOITPOMS Micrograph Library – University of Cambridge. Disponível em: <<http://www.msm.cam.ac.uk/doitpoms/miclib/index.php>>. Acesso em: 10 out. 2005.
- 53 VELEZ, M. Chromium in refractories. Disponível em; <<http://www.chromium-asoc.com/chromium/thcrfl1.htm>>. Acesso em: 08 set. 2005.
- 54 MATOS JÚNIOR, J.V. Concepção cerâmica dos produtos básicos: aplicações e variáveis que afetam seu desempenho. In: MAGNESITA S.A. Primeira etapa do programa de formação e desenvolvimento: Relatório interno. Contagem, 2001.
- 55 OLIVEIRA JÚNIOR, A.; CASSÉTE, W. Q.; NUNES, J. M. Estágio ~~atual~~ do desenvolvimento de tijolos dolomíticos ligados a pitch Brasil. In: CONGRESSO DA ASOCIACION LATINOAMERICANA DE FABRICANTES DE REFRACTÁRIOS – ALAFAR, 2000, local do **evento**. *Anais.*, Chile: Alafar, 2000. 1 Cd-rom.
- 56 GRAY, T. L. Oxide spinels. In: ALPER, A.M. (Ed.). *High temperature oxides*. Part IV: Refractory glasses, glass-ceramics, and ceramics. New York: Academic Press, 1971. p. 77-108.
- 57 DANA, J. D. *Manual de mineralogia*. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 1984.
- 58 ULMER, G. C. Chromite spinels. In: ALPER, A.M. (Ed.). *Magnesia, lime, and chrome refractories*. New York: Academic Press, 1970.
- 59 NEMATI, Z. A.; SADRNEZHAAD, S. K.; MOOGHARI, H. R. A. Effect of ferrosilicon, silicon and aluminum antioxidants on microstructure and mechanical properties of magnesia-graphite refractory. *Refractories Application News*, v. 10, n. 5, p. 17-23, Nov.-Dec. 2005.
- 60 ODEN, L.L, McCUNE, R. A. Phase equilibria in the Al-Si-C system. *Metallurgical Transactions A*, v. 18-A, p. 2005-2014, Dec. 1987.
- 61 MOCHIDA, I. Roles of carbons in composites refractories. *Taikabutsu Overseas*, v. 8, n. 4, p. 36-47>1987.
- 62 MAGNESITA S.A. Disponível em: <[HTTP://www.magnesita.com.br](http://www.magnesita.com.br)>. Acesso em: 1 jul. 2006.
- 63 LENZ E SILVA, A. B.; BITTENCOURT, L.R.M. Refratários para carros torpedos. *Revista Metalurgia e Materiais*, v. 59. n. 532. p. 198-201, abr. 2003.

- 64 VEIGA, A.F. *Comparação entre refratário aluminoso ligado à resina e a SIALON para válvula superior da panela de aço*. 2004. p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) – Faculdade de Engenharia Química de Lorena-FAENQUIL, Lorena, 2004.
- 65 BASU, B.; VLEUGELS, J.; BIEST, O. Transformation behaviour of tetragonal zirconia: role of dopant content and distribution. *Materials Science and Engineering-A*, v. 366, n. 2, p. 338-347, Feb. 2004.
- 66 LENZ E SILVA, G. F. B.; BITTENCOURT, L. R. M. Refratários para carros torpedos: evolução e tendências. In: ENCONTRO DE REFRATARISTAS E USUARIOS DE REFRATÁRIOS, 2., 2002, Vitória. *Anais... Local/ de Publicação: ABC*, 2002. p. 1-20.
- 67 MIT. *History of recent science and technology*. History of materials research. Disponível em: <http://hrst.mit.edu/hrs/materials/public/driving_forces.htm>. Acesso em: 1 jul. 2005.
- 68 LENZ E SILVA, G.F.B. Gestão e ferramentas para o desenvolvimento de produtos refratários. In: MAGNESITA S.A. *Documentação eletrônica interna*. Contagem, 2004. p. 54.

Estima-se que aproximadamente 80% de todo o aço usado hoje em dia foi submetido a pelo menos uma operação de transformação mecânica. Dentre os processos de transformação mecânica, a laminação é o principal, dado o enorme volume de produtos laminados de aço: tais como chapas, placas, tiras, folhas, barras etc.

Assim, ao se abordar o assunto de produtos siderúrgicos, deve-se sempre sublinhar o importante papel que os produtos laminados planos (e em menor grau, os não-planos) têm, e daí a relevância de rever as principais conceitos relativos à laminação dos aços.

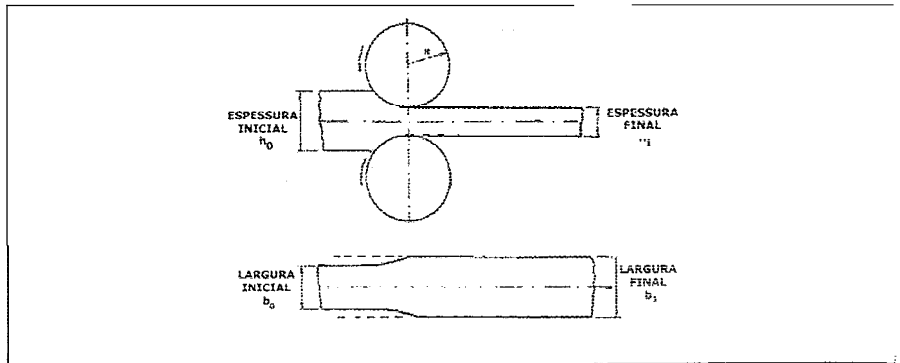
Neste breve texto informativo, apresentado a seguir, que é uma compilação de textos já existentes sobre laminação e assuntos correlatos, será enfocada com mais ênfase a laminação de planos (já que estes são os produtos siderúrgicos mais importantes), embora conceitos básicos de laminação de produtos não-planos sejam, também, rapidamente apresentados.

10.1 Conceitos Básicos de Laminação

A laminação é um processo de conformação que essencialmente consiste na passagem de um corpo sólido (peça) entre dois cilindros (ferramentas) que giram à mesma velocidade periférica, mas em sentidos contrários (Figura 10.1). Dessa forma, tendo o corpo da peça inicial uma dimensão maior que a distância entre as superfícies laterais dos cilindros, ele sofre uma deformação plástica na passagem entre os cilindros que resulta na redução de sua seção transversal e no aumento de seu comprimento e largura. Para se obter, então, uma determinada dimensão (espessura) do corpo, deve-se submeter a peça a sucessivos passes através dos cilindros com as distâncias entre si decrescentes.

Laminação de Produtos Planos e Não-planos

FIGURA 10.1 - Esquema do processo de laminação (BRESCIANI FILHO et al, 1991)



A passagem da peça pelos cilindros ocorre através da ação da força de atrito que atua na superfície de contato entre as peças e os cilindros. Essa força é proporcional ao coeficiente de atrito entre peça e cilindro e à força normal na superfície de contato. A força normal dividida pela área da superfície de contato é a pressão exercida pelos cilindros que, por sua vez, resulta da resistência à deformação plástica do material da peça nas condições de processamento (temperatura e velocidade de trabalho).

O processo de laminação pode ser conduzido a frio ou a quente, dependendo das dimensões e da estrutura do material da peça especificada, para o início e final do processamento.

10.1.1 Laminação a quente

A peça inicial é comumente um lingote fundido obtido de lingotamento convencional, ou uma placa ou tarugo processado previamente em lingotamento contínuo; a peça intermediária e final assume, após diversos passes pelos cilindros laminadores, as formas de perfis diversos (produtos não-planos) ou de placas e chapas (produtos planos). A temperatura de trabalho se situa acima da temperatura de recristalização do metal da peça, a fim de reduzir a resistência à deformação plástica em cada passagem e permitir a recuperação da estrutura do metal, evitando o encruamento para os passes subseqüentes. A laminação a quente, portanto, comumente se aplica em operações iniciais (operações de desbaste), onde são necessárias grandes reduções de seções transversais.

10.1.2 Laminação a frio

A peça inicial para o processamento, neste caso, é um produto semi-acabado (chapa), previamente laminado a quente. Como a temperatura de trabalho (temperatura ambiente) situa-se abaixo da temperatura de recristalização, o material da peça apresenta uma maior resistência à deformação e um aumento dessa resistência com a deformação (encruamento), não permitindo, dessa forma, intensidades elevadas de redução de secção transversal. Um tratamento térmico de recozimento, entre uma e outra seqüência de passes, pode se tornar necessário em função do programa de redução estabelecido e das propriedades exigidas do produto final. A laminação a frio é aplicada, portanto, para as operações finais (operações de acabamento), quando as especificações do produto indicam a necessidade de acabamento superficial superior (obtido com cilindros mais lisos e na ausência de aquecimento, o que evita a formação de cascas de óxidos) e de estrutura do metal encruada, com ou sem recozimento final.

As temperaturas de laminação e de recozimento têm seus limites, superior e inferior, definidos criteriosamente em função do tipo de material a ser processado e das condições de cada processamento em particular.

Na laminação a quente é utilizada um conjunto de dois cilindros para as primeiras etapas de redução, de tal modo que a peça é conduzida diversas vezes para o passe entre esses cilindros. Nas etapas finais da laminação a frio e na maioria das etapas de laminação a frio, o trabalho é efetuado em diversos conjuntos (gaiolas) de cilindros dispostos em seqüência (trem de laminação).

A seqüência e o número de etapas de laminação dependem das condições iniciais da peça (forma e natureza) e das condições finais especificadas (dimensões, formas, acabamento superficial, propriedades mecânicas e metalúrgicas).

10.2 Laminadores

Os laminadores são classificados de acordo com o número e arranjo de cilindros (Figura 10.2), e os três principais tipos são os laminadores duo, trio e quádruo.

Laminação de Produtos Planos e Mão-planos

O laminador duo possui seus dois cilindros girando somente numa direção, o que obriga a peça laminada a retornar por cima (ou pelo lado), para ser submetida a uma nova passagem. É denominado “laminador de retorno por cima” e sua aplicação atualmente é menos comum que a do laminador duo reversível. Este último pode ter o movimento de rotação do cilindro nos dois sentidos, permitindo a passagem da peça pelos cilindros na direção de ida e volta (Figura 10.3). Com o laminador duo reversível é possível trabalhar peças pesadas e longas (blocos, tarugos, placas, chapas grossas, vergalhões, barras e perfis). Como alternativa, pode-se adotar o laminador trio, no qual dois de seus cilindros, o superior e o inferior, maiores do que o intermediário, são acionados por motores, o cilindro intermediário se movimenta pela ação de atrito e a movimentação da peça se dá com a ajuda de uma mesa de levantar ou uma mesa inclinada.

FIGURA 10.2 - Configurações de laminadores típicos em siderurgia (BRESCIANI FILHO et al., 1991).¹

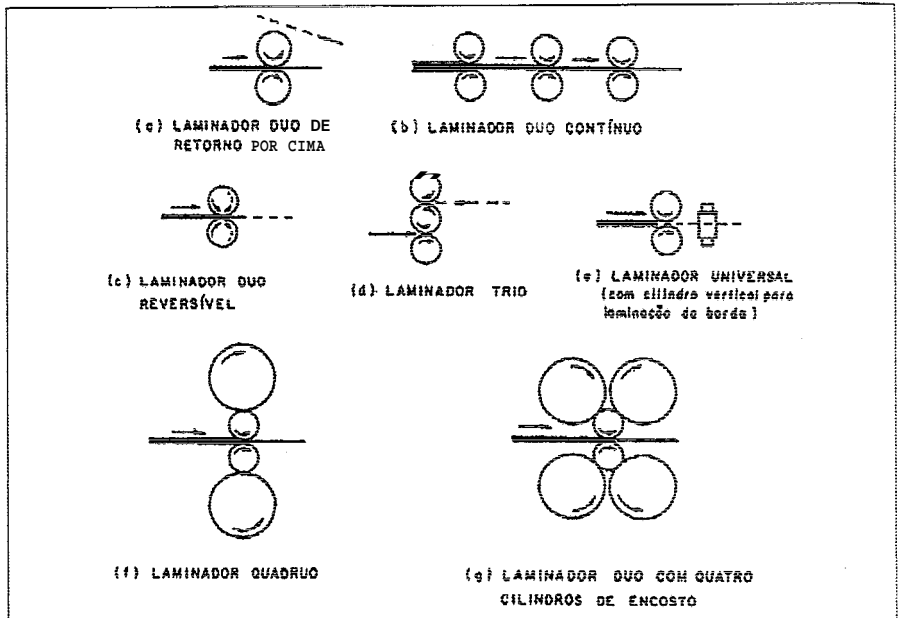
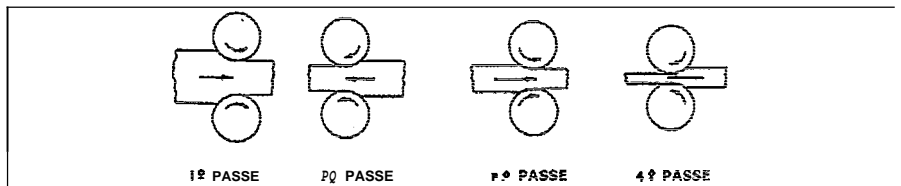


FIGURA 10.3 - Esquema de passes num laminador duo reversível (BRESCIANI FILHO et al., 1991).¹



O laminador quádruo é utilizado para o trabalho a quente e a frio com produtos planos (chapas grossas e finas). São necessários dois cilindros de encostos maiores que os cilindros de trabalho, podendo ser todos acionados por motores. Em geral, esses laminadores são dispostos em série formando linhas de laminação contínuas. Para chapas finas, utiliza-se o laminador duo com quatro ou mais cilindros de encosto.

A instalação dos laminadores mais simples é aquela que é constituída de uma única gaiola, com um dos seguintes arranjos de cilindros: duo não-reversível, duo reversível, trio e quádruo. Para a laminação de barras, por exemplo, pode-se dispor de diversos laminadores duo ou trio combinados em diversos tipos:

- O *laminador de guias* consiste de diversas gaiolas arranjadas em série de laminação e possui guias metálicas que posicionam a peça quando de sua passagem pelas ranhuras de laminador.
- O *laminador de voltar* (belga) consiste num conjunto de gaiolas dispostas paralelamente, ou em linha lateral, de modo a obrigar a barra, ao passar de uma gaiola a outra, a formar uma volta em arco.
- O *laminador zigue-zague* contém um conjunto de gaiolas dispostas de forma a se adaptar à necessidade de movimentação de uma peça ~~na~~ modo permite, pela dimensão de sua secção transversal, a formação de uma volta em arco.
- O *laminador contínuo* é constituído de diversas gaiolas dispostas em série de forma que os cilindros das gaiolas subseqüentes giram a velocidades proporcionalmente maiores, para evitar acúmulo de material entre uma e outra gaiola. Este tipo de laminador é comumente empregado para o trabalho com vergalhões, barras, tiras e chapas.
- O *laminador semi-contínuo* é formado também com uma gaiola reversível para laminação de desbaste que processa a peça antes de ela entrar na instalação de laminação contínua. O laminador misto é aquele no qual a maior parte da redução (inclusive o desbaste) é realizada num laminador contínuo e a conformação final num laminador de guias ou belga.
- O *laminador universal* é formado por um conjunto de cilindros horizontais e outro vertical, e se destina à produção de placas que necessitam ter também as bordas laminadas. Um tipo particular é o laminador Gray para vigas com perfil H de grande largura; outros tipos particulares são:

Laminação de Produtos Planos e Não-planos

laminador Wenstrom, de perfis retangulares; laminador Sack, de perfis em cruz; e laminador Shoen, para rodas de carro.

- O laminador *Morgan contínuo de tarugos* consiste de uma série de gaiolas de cilindros horizontais, colocadas umas após as outras, de forma que a peça passa a ser trabalhada ao mesmo tempo em diversas gaiolas; os cilindros de cada gaiola subsequente giram a uma velocidade maior que a da gaiola anterior. O trem de laminação Garret para vergalhões consiste de um laminador de desbaste (trem de voltar com três gaiolas ou duas ou mais gaiolas em série), seguido de dois trens, de quatro ou cinco gaiolas cada um, colocados em paralelo ao primeiro.
- O laminador planetário a quente *Sendzimir* (Figura 10.4) foi desenvolvido para reduzir a quente, uma placa em uma tira em bobina numa única passagem. O laminador a frio *Sendzimir* (Figura 10.5) consiste de um conjunto de cilindros dispostos na seqüência 1-2-3-4, ou com outros arranjos. Destina-se à laminação a frio de chapas com grandes reduções.

FIGURA 10.4 – Esquema de um laminador planetário (BRESCIANI FILHO et al., 1991).¹

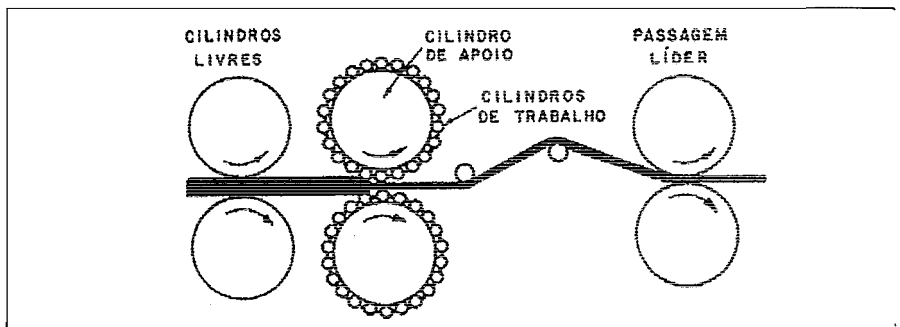
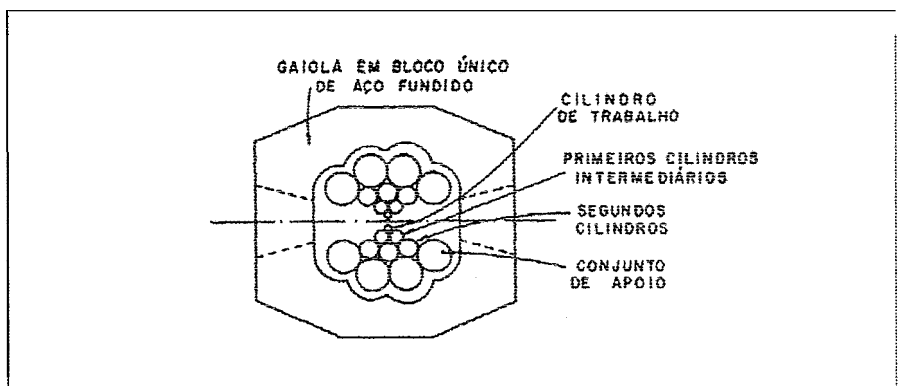


FIGURA 10.5- Esquema do laminador Sendzimir (BRESCIANI FILHO et al., 1991).¹



A fabricação de tubos sem costura é realizada em laminador-mandrilador de diversos tipos, com particular destaque para o tipo Mannesmann (Figura 10.6).

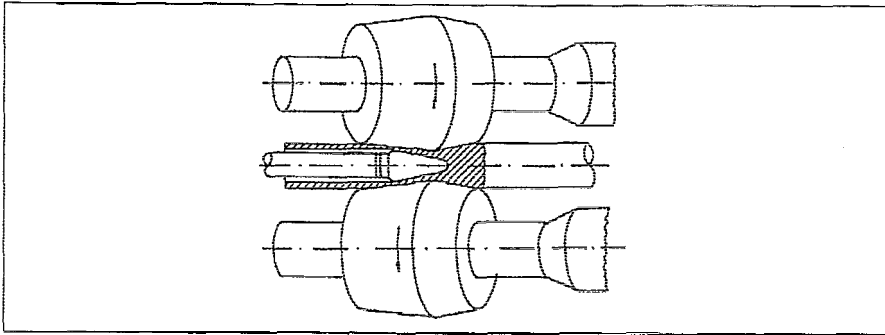


FIGURA 10.6 - Esquema de um laminador de tubos Mannesmann (BRESCIANI FILHO et al. 1991).¹

10.3 Cilindros de Laminação

Os cilindros de laminação são a principal parte de um laminador, pois promovem diretamente a conformação da peça atuando como ferramentas de fabricação.

Analisando um cilindro, pode-se distinguir nele três partes básicas (Figura 10.7):

- *corpo* – onde ocorre o processo de laminação da peça;
- *pescoço* – onde o peso do cilindro e a carga de laminação devem ser suportados; e
- *trevo* – onde ocorre o acoplamento com o eixo motor através de uma manga de engate.

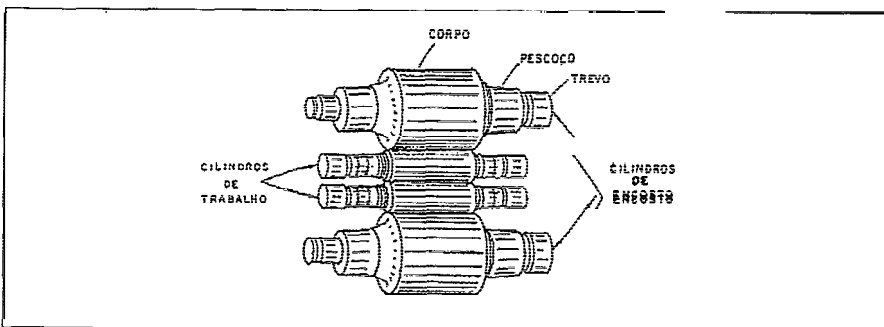


FIGURA 10.7 - Cilindros de laminação num laminador quádruplo (BRESCIANI FILHO et al. 1991).¹

Os cilindros com superfícies cilíndricas (geratriz reta) são utilizados para a laminação de placas e chapas; os cilindros com ranhuras ou passagem, que são aberturas formadas na superfície, destinam-se à laminação de perfis e barras.

As seguintes recomendações podem ser feitas para um projeto eficiente de um cilindro:

- Quanto menor for o número de passes, menor será o custo de fabricação do cilindro.
- A redução por passe deve se adequar aos diâmetros dos cilindros e à capacidade da instalação de tratamento térmico, de forma a tornar pequena as fraturas de cilindros e reduzir a potência necessária do sistema laminador.
- As passagens devem ter suficiente inclinação lateral nas diversas partes para se adaptarem ao gabarito do perfil da peça (este deve ser elaborado com tolerâncias estreitas e considerando a contração devido ao resfriamento).
- As seções transversais ao longo da peça devem resultar as mais uniformes possíveis.
- A quantidade de metal laminado por cilindro é um fator de custo importante e o desgaste dos cilindros deve ser minimizado.
- Tanto as deformações da peça na direção longitudinal como as na direção transversal devem ser consideradas. Materiais diferentes apresentam espalhamentos laterais diferentes.
- Uma velocidade de laminação elevada restringe o espalhamento lateral e a intensidade de redução.
- Uma temperatura de trabalho maior permite uma maior intensidade de redução.
- Um diâmetro maior de cilindro permite uma maior intensidade de redução sem fratura de cilindro, e uma maior facilidade de entrada da peça com uma área de contato maior. Exige, contudo, maior potência motora, provoca maior espalhamento e reduz a deformação na direção da laminação.

Os cilindros de laminação primária (de blocos e placas) têm como principal requisito a resistência mecânica, pois são submetidos, na laminação de grandes massas com elevadas reduções, a pressões elevadas e choques intensos, que se associam à solicitação térmica transmitida à superfície. Essa solicitação térmica pode provocar a formação de fissuras superficiais que têm a possibilidade de se expandirem com os choques mecânicos e provocarem a

fratura dos cilindros. Para tais aplicações, os cilindros são comumente constituídos de aço liga (por exemplo: 0,85% C; 1,00% Mn; 1,00% Cr; 0,25% Mo) e fabricados por fundição, com tratamentos térmicos posteriores de recozimento, têmpera e revenido.

Da laminação primária à de acabamento, os diâmetros dos cilindros diminuem e as durezas das materiais constituintes se elevam. De forma geral, as especificações para cilindros fabricados por fundição indicam:

- para desbaste – aço-carbono e aço-liga;
- para trabalhos intermediários – aço liga e ferro fundido; e
- para acabamento – ferro fundido de diversos tipos.

Os cilindros de aço (por exemplo: 0,25%-0,30% C; 0,05% max S; 0,05% max P; 0,25%-0,30% Si; 1,60%-2,50% Cr; 0,25% Mo) podem ser forjados a partir de um lingote fundido, normalizados e usinados até o diâmetro próximo do diâmetro final. Um furo central é mandrilado para facilitar o tratamento de endurecimento da luva cilíndrica – nesse caso, o cilindro de laminação fica constituído de duas partes: luva e eixo-mandril.

A disposição de cilindros nas gaiolas ou cadeiras pode ser observada na Figura 10.8.

A especificação mais detalhada dos materiais para os cilindros está em Selection... (1980).²

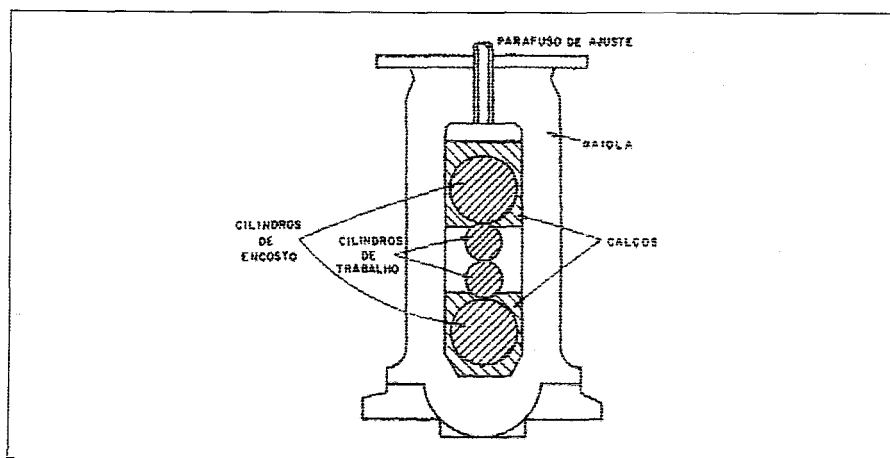


FIGURA 10.8 - Esquema de uma gaiola ou cadeira quádruplo (BRESCIANI FILHO et al., 1991).¹

10.4 Descrição do Processo de Laminação

A seqüência de fabricação numa usina de laminação é complexa e diversificada (Figura 10.9). O fluxograma simplificado de laminação do lingote ao produto acabado pode ser analisado no quadro da Figura 10.10.

A descrição resumida dos processos de laminação será apresentada para algum dos produtos típicos em aço:

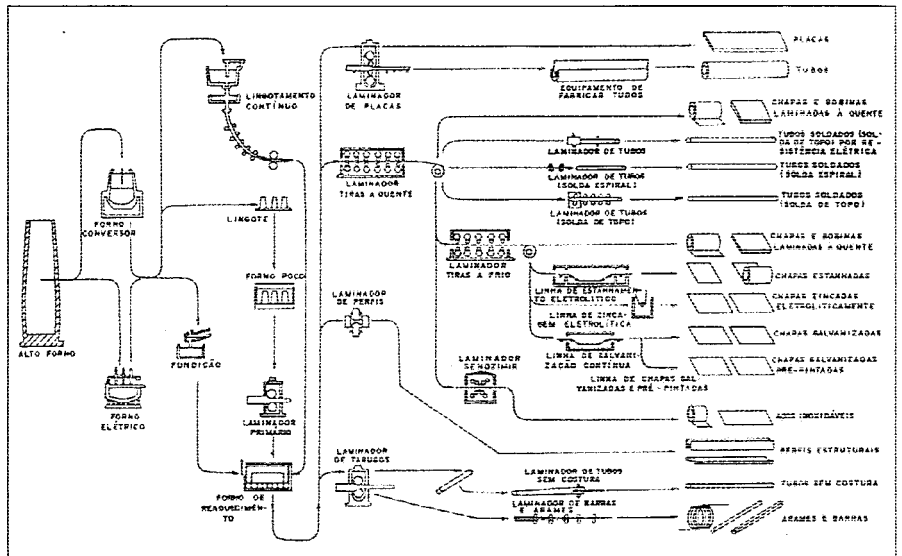
- blocos e placas laminados a quente;
- chapas finas laminadas a quente; e
- chapas finas laminadas a frio.

10.4.1 Laminação a quente de blocos e placas

Os lingotes aquecidos podem ser laminados, para a obtenção de blocos e placas e de produtos acabados, em uma instalação constituída de diversos (até vinte) conjuntos laminadores (trens de laminação) em operação contínua sem reaquecimento.

O mais freqüente é o processamento do lingote para a obtenção de blocos e placas que serão, posteriormente à laminação, resfriados e armazenados. Essa fase do processo pode ser genericamente denominada de “laminação primária”.

FIGURA 10.9 - Operações e tipos de produtos na usina siderúrgica integrada (BRESCIANI FILHO et al., 1991).¹



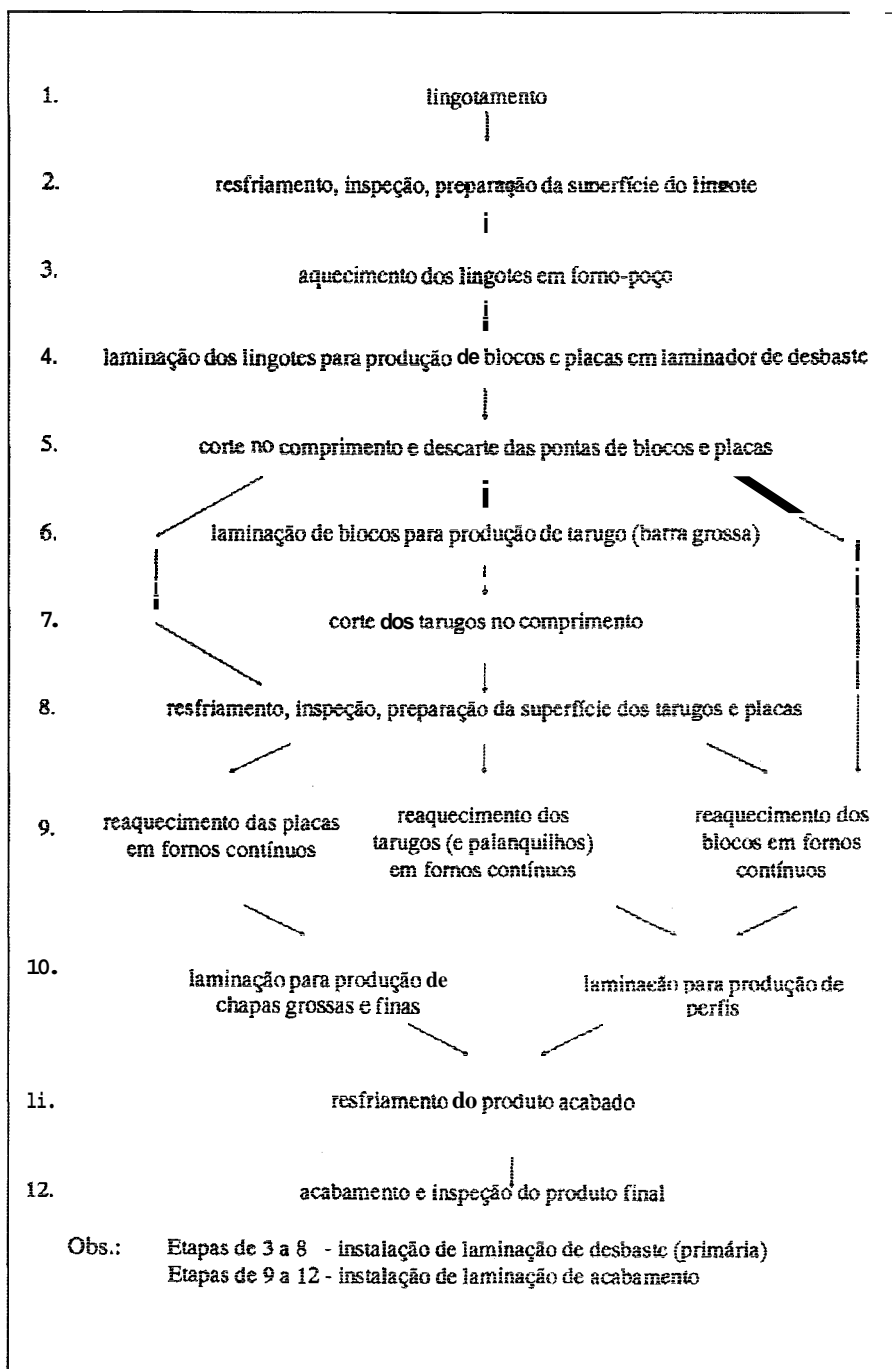


FIGURA 10.10 - Fluxograma de operações de laminação a quente numa usina siderúrgica (BRESCIANI FILHO et al., 1991).¹

A laminação primária tem dois objetivos básicos que são:

- A conversão do lingote fundido em produtos laminados; e
- A obtenção de produtos laminados na forma de peças, com dimensões e massas especificadas.

Uma seqüência de operações típicas para a laminação primária, constituída de tratamentos térmicos e mecânicos e operações auxiliares, é a seguinte:

- *Aquecimento dos lingotes* - É realizado para tornar o material suficientemente plástico para a operação de laminação com reduções grandes de secções. Essa operação é conduzida em forno-poço de rea aquecimento a chama (forno profundo, para uniformização da temperatura), com controle de temperatura, do tempo de permanência e das condições de combustão. As temperaturas usuais ficam na faixa de 1.100° C a 1.350° C e os tempos de aquecimento de lingotes frios são de oito a doze horas. É possível estimar as diferenças de temperatura entre a superfície e o núcleo dos lingotes em função das relações de tempo-temperatura e de consumo de combustível obtidas através de leituras em instrumentos de medição. Dependendo da natureza do material, pode ser considerada conveniente – para evitar o aparecimento de tensões internas devido a um acentuado gradiente de temperatura – a execução do aquecimento em diversos patamares crescentes de temperatura. O controle da relação combustível-ar permite regular as características da chama que influenciam a distribuição da temperatura no forno e a atmosfera deste (que afeta a formação de óxidos superficiais na peça). Dois fatores importantes para controlar a produtividade do equipamento são: produção em toneladas por hora e por área do forno (da ordem de 30 t a 100 t de lingotes de aço por hora para uma área de 90 m²); e o consumo de combustível por tonelada de material aquecido (da ordem de 400.000 a 2.000.000 Btu por tonelada de aço). As faixas indicadas são amplas em face dos diferentes tipos e tamanhos de poços.
- *Laminação a quente dos lingotes* - É conduzida para transformar a estrutura cristalina grosseira (bruta de fusão) dos lingotes em uma estrutura de grãos finos através da deformação plástica intensa e recristalização subsequente. Além disso, a laminação a quente provoca o alívio dos vazios internos decorrentes do processo de solidificação do lingote. Na seqüência

do processamento, são retiradas por corte as partes dos lingotes que apresentam heterogeneidades físicas e químicas (inadequadas à qualidade exigida dos produtos), e, quando for o caso, é promovido o resfriamento dos lingotes laminados até a temperatura ambiente para um posterior reaquecimento e laminação. Atinge-se, com isso, o primeiro objetivo básico da laminação primária. O segundo objetivo é atingido na continuidade do processamento, com a laminação a quente em cilindros de perfis adaptados à forma dos produtos desejados e ao corte das peças laminadas, nas dimensões e pesos especificados.

A operação principal numa instalação de laminação primária é a gradual compressão do lingote entre dois cilindros laminadores, em diversos passes com distâncias decrescentes entre os cilindros. A seqüência dos passes é estabelecida em função da natureza do metal e economia do processo (Figura 10.3). O projeto da instalação de laminação, por sua vez, é dependente dos seguintes fatores: força de laminação; peso e tamanho das peças; movimentação do material; tempo de operação; e produção por unidade de tempo. Em decorrência disso, podem ser encontradas em operação diversas combinações de equipamentos de laminação e tipos de laminadores.

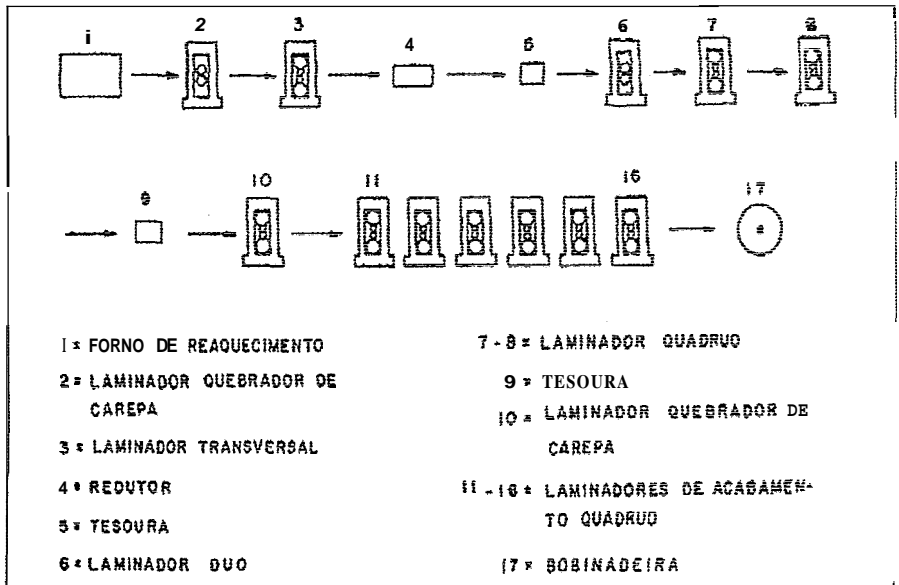
10:4:2 Laminação a quente de chapas finas

A laminação a quente de chapas é comumente conduzida numa instalação de laminação contínua, isto é, numa disposição em série de um conjunto de equipamentos de laminação (Figura 10.11). Uma seqüência típica de processamento inicia-se com as chapas grossas, provenientes da laminação a quente das placas, sendo aquecidas em dois ou mais fornos contínuos de reaquecimento. A seguir, passam pelos equipamentos: laminador quebrador de carepa (uma gaiola duo); laminador transversal (uma gaiola quádruplo); redutor (espremedor) de chapas grossas; tesoura de corte de chapa a quente; conjunto de laminadores (uma gaiola duo e duas quádruplo) de desbaste; tesoura de corte das extremidades; laminador-quebrador de carepa; laminador de tiras a quente (seis gaiolas quádruplo) de acabamento; e bobinadeiras. A movimentação das chapas do forno de reaquecimento para as gaiolas é feita com auxílio da mesa transportadora de rolos, o laminador transversal é utilizado para alargar a chapa e permitir, desse

Laminação de Produtos Planos e Não-piofios

modo, a laminação de chapas de largura maior; antes dessa gaiola, coloca-se uma mesa transportadora giratória para posicionar a placa a 90°. Um redutor lateral e uma tesoura conferem à chapa a dimensão necessária às operações seguintes de desbaste. Entre os laminadores de desbaste e de acabamento se coloca uma mesa de espera. precedendo o trem de acabamento, coloca-se uma tesoura para corte das extremidades e um laminador quebrador de carepa. Após os laminadores desse último tipo, instala-se um jato de água de alta pressão para remoção da carepa (casca de óxidos). Uma longa mesa de saída situa-se após a laminação de acabamento e, ao final da mesa, encontra-se uma bobinadeira, ou se for especificado, um produto de menor comprimento; instala-se, então, uma tesoura volante.

FIGURA 10.11 - Etapas de laminação a quente na produção de bobinas a quente (BRESCIANI FILHO et al., 1991).¹



Essa instalação de laminação a quente contínua, com trens de laminação de desbaste e de acabamento, apresenta elevada produtividade com uma utilização elevada da capacidade de laminação associada a um mínimo de perda de energia. No entanto, falta a esse sistema flexibilidade para adaptação a diferentes tipos de produto, além de apresentar elevados custos de investimento. Desse modo, outros conjuntos de equipamentos podem ser concebidos, como, por exemplo, um laminador de desbaste reversível associado a um trem de laminação de acabamento contínuo, ou ainda, um laminador de desbaste

reversível (ou trem de laminação de desbaste contínuo) associado a um laminador de acabamento reversível. Essas disposições exigem modificações nos equipamentos de aquecimento que necessitam, dependendo do caso, de fornos para reaquecimento ou fornos de aquecimento nas bobinadeiras.

A presença de óxidos superficiais na chapa laminada a quente é uma característica do produto e, quando a chapa tiver que sofrer processamentos posteriores, há necessidade de sua remoção. Exemplos são os casos de estampagem (os óxidos reduzem a vida da ferramenta e causam defeitos superficiais na peça estampada); os de revestimento superficial (os óxidos impedem a aderência de revestimentos metálicos ou de tintas); e os de laminação a frio (os óxidos causam defeitos superficiais). O principal processo de remoção de óxidos superficiais é a decapagem, que consiste na imersão da peça num banho de solução de ácidos inorgânicos (clorídrico, sulfúrico) em água durante um determinado tempo – esses banhos podem conter ainda agentes inibidores e umectantes. As instalações para esse processamento podem ser dos tipos: decapagem por lotes, decapagem semi-contínua e decapagem contínua. Para complementar o tratamento superficial, as chapas são comumente oleadas para efeito de proteção contra a corrosão até sua utilização.

Outras operações, que dependendo das especificações podem ser aplicadas aos produtos da laminação a quente, são:

- Laminação de acabamento e de encruamento superficial, com a finalidade de melhorar a planicidade da chapa e o acabamento superficial (redução de rugosidade) e alterar as propriedades mecânicas;
- Aplainamento por rolos ou por estiramento, para elevar substancialmente a planicidade da chapa (Figura 10.12);
- Corte com facas circulares ou cilindros para reduzir a largura da chapa; e
- Tratamento térmico de normalização ou de recozimento contínuos em fornos com rolos transportadores.

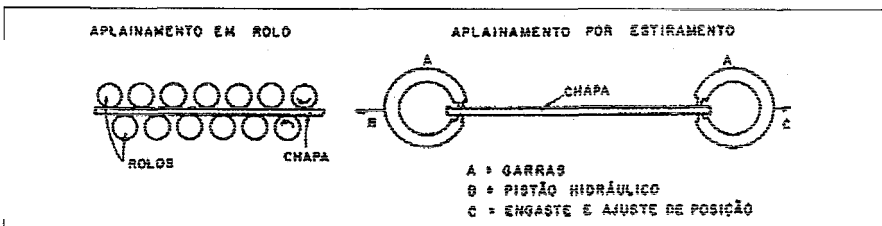


FIGURA 10.12 -
Aplainamento de chapas laminadas a quente (BRESCIANI FILHO et al., 1991).¹

10.4.3 Laminação a Frio de chapas finas

Praticamente quase toda chapa de aço carbono laminada a frio é obtida a partir de chapas semi-acabadas laminadas a quente. O processamento desse produto ocorre em dois estágios: redução da espessura na dimensão (bitola) especificada e operações de acabamento.

A laminação a frio, além de reduzir a espessura da chapa, cria nesse produto um acabamento superficial elevado (pequena rugosidade) e confere ao material melhores propriedades mecânicas. A redução da espessura inicial é de 25% a 90%; o acabamento final é obtido na operação de laminação de encruamento, precedida do tratamento superficial de limpeza e do tratamento térmico de recozimento ou normalização, em que a redução de espessura é da ordem de 1% a 2%. A seqüência típica de operações é a seguir descrita.

Após a laminação a quente, as chapas semi-acabadas na forma de bobinas são desenroladas, decapadas em instalação de processamento contínuo, secadas, oleadas e enroladas novamente. O óleo protege as chapas da corrosão e atua como lubrificante na operação de laminação a frio.

A laminação a frio pode ser conduzida num laminador quádruplo reversível simples, onde o produto é movimentado para frente e para trás, entre os cilindros de trabalho até que a espessura especificada seja atingida. No processo conduzido num trem de laminação contínuo, com três a seis gaiolas de laminadores quádruplo, cada laminador promove uma determinada redução de espessura. As velocidades dos cilindros das diversas gaiolas são crescentes, desde a alimentação, passando pelas diversas gaiolas, até o carretel de rebobinamento.

Na laminação a frio não ocorre a formação de cascas de óxido como na laminação a quente, as pressões e forças motoras, contudo, são muito maiores para a mesma redução de espessura. As resultantes das forças de compressão entre os cilindros e das forças de tração entre as bobinas e as gaiolas devem provocar a deformação plástica da chapa. Os níveis dessas forças crescem à medida que a chapa passa pelas diversas gaiolas, devido ao encruamento do material. A programação de redução em cada estágio deve ser estabelecida de modo que as cargas nos laminadores sejam uniformemente distribuídas e aproveitem a capacidade de cada

estágio, capacidade esta que depende de diversos fatores: projeto do laminador; potência disponível; largura e redução da chapa; condições de lubrificação; resistência do material; planicidade da chapa; acabamento das superfícies da chapa e dos cilindros; e diâmetros dos cilindros. Em geral, no último estágio de redução, procede-se a uma pequena deformação plástica para conferir ao produto melhor acabamento, planicidade e tolerância dimensional na espessura. Num trem de laminação com laminadores quádruplos, comumente promove-se a redução de 25% a 45% em cada estágio inicial e intermediário e cerca de 10% a 30% no estágio final; a redução total, dependendo do produto, pode variar de 45% a 90%. Essa redução provoca a elevação da temperatura da peça e dos cilindros. Os níveis de temperatura na peça são da ordem de 65° C a 120° C, mas, nos trens de alta velocidade, podem atingir valores da ordem de 200° C. O calor gerado é dissipado com auxílio de um jato de mistura de óleo solúvel-água dirigido diretamente às superfícies dos cilindros e das chapas, para manter as temperaturas nesses níveis máximos indicados,

A disposição mais comum de cilindros na gaiola é aquela do laminador tipo quádruplo: os cilindros de trabalho são de diâmetros menores (para reduzir a pressão de laminação) e os cilindros de apoio impedem a flexão dos cilindros de trabalho. Esse laminador é usado nas instalações com uma única unidade ou em trens de laminação. Outros tipos de arranjos de cilindros, contudo, são encontrados, utilizando mais de dois cilindros de apoio para cada cilindro de trabalho de diâmetro menor. Os laminadores duplos reversíveis ou trens, porém, também são empregados.

Na produção de chapas de aço laminadas a frio, as bobinas são em geral aparadas lateralmente na mesma linha contínua & decapagem, antes da laminação a frio e, após a laminação, elas são conduzidas diretamente à instalação de tratamento térmico de recozimento, para, em seguida, sofrerem a laminação de acabamento com encruamento.

A maior parte dos produtos sai na forma de bobinas. Quando são especificadas peças na forma de fardo de chapas, procede-se, ao corte em linha contínua de tesoura. Para as bobinas que serão utilizadas nas linhas contínuas de estanhagem ou galvanização, devem ser aplicados os tratamentos de limpeza superficial, para remoção dos resíduos de óleo que sofreram decomposição no processo de recozimento.

Em geral, as chapas laminadas são submetidas ao ~~tratamento~~ de recozimento ou normalização, para recuperar a ductilidade e controlar as propriedades mecânicas de acordo com as especificações. O tratamento pode ser conduzido em dois tipos básicos de instalações: fornos de tratamento intermitente (de fornadas individuais) e fornos de tratamento contínuo. No primeiro caso, uma bobina estacionária é envolta pela cobertura do forno e é submetida ao ciclo completo de tratamento térmico, com variação de temperatura e tempo de permanência e com controle da atmosfera do forno. No segundo caso, a bobina desenrolada passa pelo forno em velocidade controlada, sendo submetida a diversas temperaturas, correspondentes ao ciclo de tratamento: distribuído ao longo do forno com atmosfera controlada. O recozimento é, na maioria das vezes, conduzido em fornos intermitentes em caixa. Quando não é possível obter a qualidade desejada nesse tratamento, realiza-se então a normalização. Tanto a normalização como o recozimento podem ser conduzidos em fornos contínuos; a relação do tipo de instalação e do ciclo de tratamento térmico depende da composição, da microestrutura e das propriedades mecânicas do material inicial e da especificação do produto final. Maiores detalhes a respeito & etapa de recozimento serão dados mais à frente no texto.

Para alguns produtos é necessário elevar a resistência, a planicidade e o acabamento superficial, e isso é obtido na laminação de acabamento com encruamento. O processamento pode se dar para chapas individuais ou para bobinas. Os laminadores são do tipo duo ou quádruplo montados em uma gaiola única, e, no caso de processamento de bobinas para níveis de resistência mais elevados, utiliza-se um trem de laminação com duas gaiolas com a disposição de cilindros duo. O acabamento superficial dos produtos é controlado pelo acabamento superficial com que os cilindros são fabricados, podendo variar de superfícies brilhantes na peça, obtidas com cilindros polidos, a superfícies foscas, que decorrem do uso de cilindros que sofreram tratamento superficial com jato de areia. A redução é pequena e depende do grau de ductilidade especificado para a chapa; por exemplo, para o caso de chapas de aço para estampagem profunda, a redução é da ordem de 0,25% a 1% (que é suficiente para eliminar as linhas de distensão que podem surgir no produto estampado). Em outras aplicações, onde a exigência de ductilidade é menor, a redução pode atingir valores de 1% a 1,5%.

Como a maior parte do produto da laminação a frio é comercializado na forma de bobinas, não se utiliza muito da operação de corte de chapas. Contudo, quando é necessário o corte transversal, este é conduzido comumente com tesouras volantes dos tipos com guilhotina ou com facas montadas em cilindros. O corte lateral é freqüentemente realizado no final da linha de decapagem, e o produto não precisa, após a laminação, ser novamente aparado lateralmente. Quando isso é necessário, são utilizadas facas circulares, montadas em árvores, que operam de forma contínua.

As Figuras 10.13 e 10.14 ilustram a seqüência de processamento em instalações de laminação a frio de chapas.

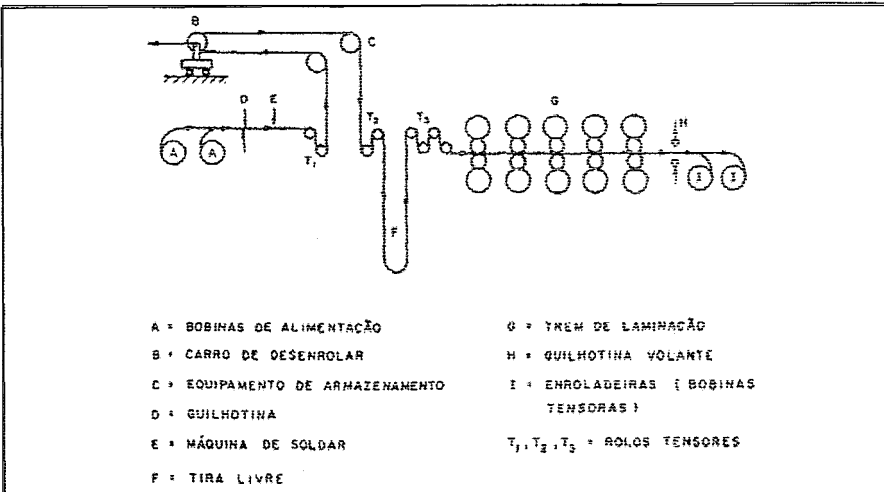


FIGURA 10.13 - Esquema típico das operações de laminação a frio (BRESCIANI FILHO et al., 1991).¹

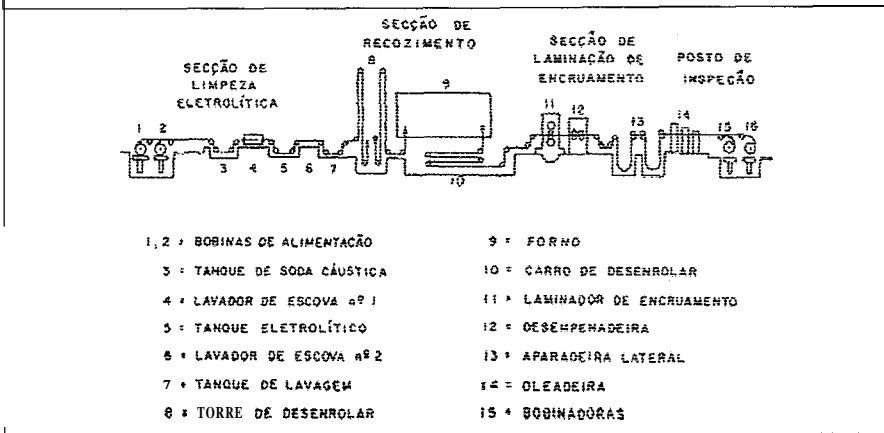


FIGURA 10.14 - Linha de recozimento e laminação de encruamento (BRESCIANI FILHO et al., 1991).¹

10.4.4 Controle do processo de laminação

O controle do processo de laminação e o controle da qualidade da matéria-prima e dos produtos da laminação são importantes procedimentos para garantir a eficiência operacional da instalação fabril de laminação.

O controle da qualidade se inicia com a atividade de inspeção e análise do material fundido, antes do lingotamento convencional ou contínuo. Dependendo do tipo de produto final, a composição química do aço é controlada, para estar de acordo com as especificações, realizando-se análises químicas de amostras de metal líquido, retiradas da panela de corrida, conduzidas por métodos convencionais ou espectrográficos. Outros ensaios que podem ser realizados, em corpos-de-prova retirados dos lingotes, são: análise macro e micrográfica; análise de fratura; determinação do tamanho do grão; determinação da temperabilidade; e ensaios mecânicos.

Após o controle da matéria-prima, na forma de lingote, procede-se ao controle do processo de aquecimento. Verisca-se, inicialmente, a temperatura superficial do lingote (solidificado, mas ainda aquecido), antes de colocá-lo no forno-poço, para evitar a possibilidade de um choque térmico, pela diferença entre essa temperatura e aquela do forno – a temperatura do forno e da chama do maçarico são controladas com auxílio de instrumentação.

Na laminação a quente é importante o controle das temperaturas da peça antes e após o processamento, bem como o controle da programação de passes. Em geral, na laminação devem ser verificados, com instrumentação específica, os seguintes parâmetros do processo: posicionamento dos cilindros em função das dimensões do produto laminado em cada passe; condição das ranhuras dos cilindros; pressão de laminação (com auxílio de células de carga); e torque de laminação.

As linhas de laminação contínua apresentam comumente um alto grau de automação, o que permite a operação em elevados níveis de velocidade de trabalho, particularmente, no caso de laminação a frio de chapas de aço. Em face da elevada velocidade, os instrumentos de medição da espessura da chapa devem operar sem manter contato com a superfície da chapa, o que é obtido com o emprego de aparelhos de ensaios não destrutivos apoiados no princípio da radiação penetrante (no caso, raios beta ou raios

gama de isótopos radioativos). Dessa forma, pode-se controlar automaticamente a posição dos cilindros e a tensão de tração aplicada às chapas (Figura 10.15).

Durante o processo de laminação retiram-se, comumente, amostras para determinar a qualidade do produto e, em particular, para verificar as condições da superfície ao final do processo. A qualidade do produto é confrontada com a qualidade especificada, realizando-se ensaios químicos, metalográficos, mecânicos e dimensionais.

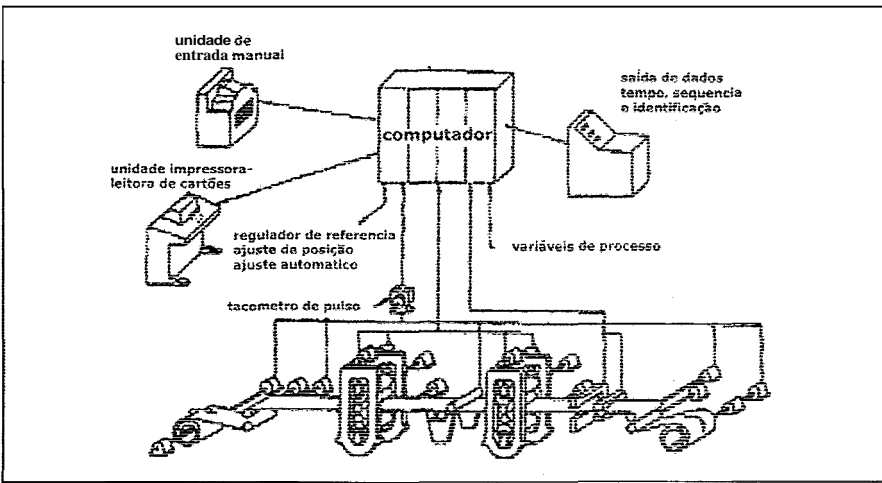


FIGURA 10.15 - Esquema de controle dinâmico do processo em laminação (BRESCIANI FILHO et al., 1991).¹

10.4.5 Esquema de passes de laminação

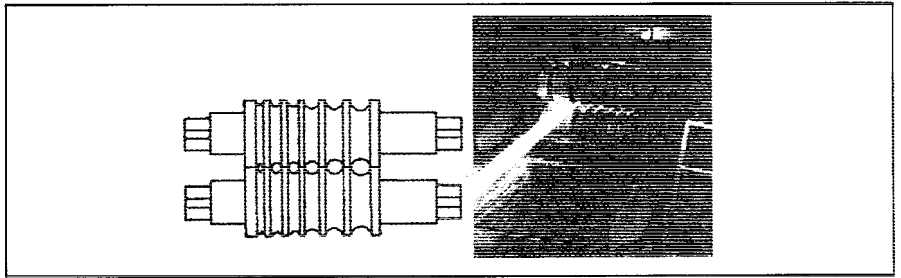
Os produtos planos são laminados em cilindros com geratriz aproximadamente reta, ou seja, ligeiramente côncava ou convexa para compensar a deformação elástica. A redução de espessura é uniforme ao longo da largura da peça e o espalhamento dessa direção é livre.

A sequência de passes, portanto, é projetada para a redução da espessura de acordo com as características de confiabilidade do material (no nível de temperatura de trabalho), a capacidade do laminador e as especificações do produto final.

O projeto da sequência de passes para os produtos não-planos (chamada de calibração), também, é função desses fatores e, ainda mais, de uma sequência

de modificação de formas da secção transversal dos produtos. Nesse caso, os cilindros de laminação apresentam um perfil com diversas ranhuras ou passagens, que se adaptam à seqüência de formas a que a peça em processamento deve ser submetida para atingir a forma final sem apresentar defeitos (Figura 10.16).

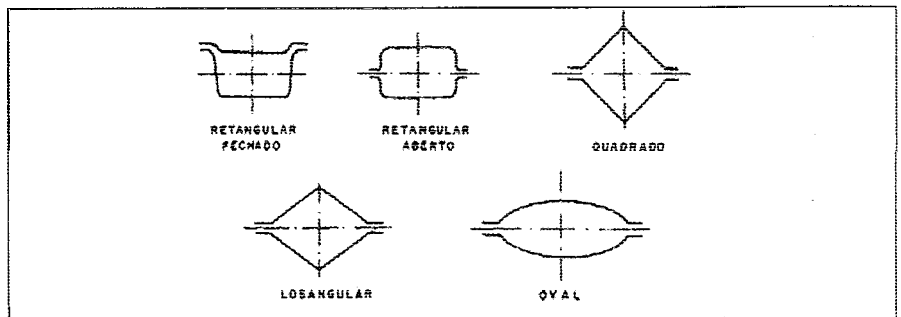
FIGURA 10.16 -
Laminador de canais
para produção de
laminados não-planos
(BRESCIANI FILHO et al.,
1991).¹



Os passes iniciais e intermediários, realizados unicamente com o objetivo de redução de secção, são denominados passes de desbaste. Os passes finais são chamados de passes de acabamento e se distinguem dos primeiros quanto ao projeto, que deve levar em consideração o coeficiente de expansão térmica do material trabalhado e as tolerâncias dimensionais da secção.

A seqüência de passes para a obtenção de um determinado perfil pode ser estabelecida através de diferentes combinações de secções (Figura 10.17). As seqüências de desbastes podem ser dos tipos com séries retangulares, losangulares-losangulares, losangulares-quadrados e ovais-quadrados (Figura 10.18). Para a obtenção de barras de secção circular, por exemplo, existem diversas seqüências de laminação, sendo que as mais comuns, particularmente para barras acabadas de 5 a 20 mm, são as que se iniciam com uma forma quadrada, passam para oval e terminam com forma circular (Figura 10.19).

FIGURA 10.17 - Tipos
típicos de canais em
laminadores de produtos
não-planos (BRESCIANI
FILHO et al.,¹ 1991).



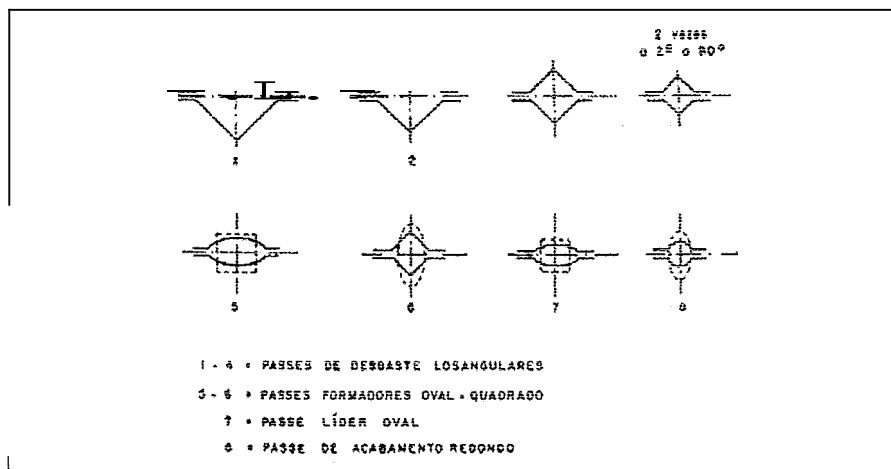


FIGURA 10.18 - Exemplo de esquema de passes para produção de barra redonda (BRESCIANI FILHO et al., 1991).¹

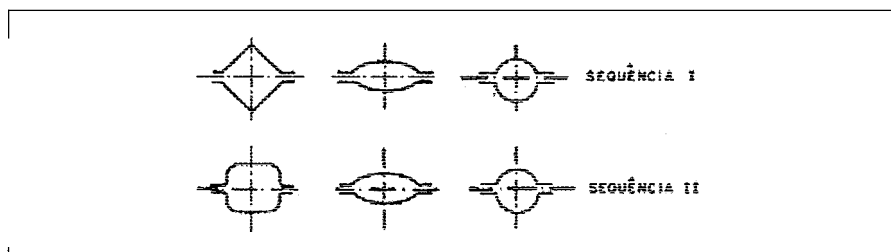


FIGURA 10.19 - Exemplos de esquemas de passes para produção de barra redonda (BRESCIANI FILHO et al.,¹ 1991).

10.5 Produtos Laminados

10.5.1 Classificação dos produtos laminados

A classificação dos produtos laminados é realizada em função de suas formas e dimensões e de acordo com as normas técnicas tradicionalmente estabelecidas. Essas normas apresentam diferenças nas indicações entre si e quando se trata de produtos siderúrgicos ou de produtos de metais não-ferrosos. No quadro da Figura 10.20 indica-se o sistema de definição para os laminados de aço.

Os produtos laminados podem ser inicialmente classificados em: produtos semi-acabados e produtos acabados. Os produtos semi-acabados são os blocos, as placas e os tarugos (ou palanquilhas). Os produtos acabados, por sua vez, se subdividem em dois grupos: produtos não-planos e produtos planos.

Laminação de Produtor; Planos e Não-planos

FIGURA 10.20 - Produtos siderúrgicos laminados (BRESCIANI FILHO et al., 1991).¹

<i>Produto semi-acabado</i>	Produto que, para a utilização final, necessita de acabamento (por exemplo, placa, tarugo, etc.)
<i>Produto acabado</i>	Produto que pode ser empregado na forma em que se encontra
<i>Produto plano</i>	Produto obtido com cilindros de geratriz aproximadamente reta
<i>Bloco</i>	Produto semi-acabado de secção transversal $> 15.600 \text{ mm}^2$, de relação largura/espessura ≤ 2 e com arestas arredondadas
<i>Placa</i>	Produto semi-acabado com espessura $> 40 \text{ mm}$, relação largura/espessura > 2 e com arestas arredondadas
<i>Platina</i>	Produto semi-acabado com largura $\geq 150 \text{ mm}$ e espessura ≥ 6 e $\leq 40 \text{ mm}$
<i>Tarugo</i>	Produto semi-acabado de secção transversal $\leq 15.600 \text{ mm}^2$, de espessura mínima = 40 mm , relação largura/espessura ≤ 2 , e com arestas arredondadas; outra denominação possível é palanquilha
<i>Barra</i>	Produto acabado de secção transversal constante e com forma geométrica simples (barra quadrada, retangular, oval, sextavada, etc)
<i>Vergalhão</i>	Barra redonda laminada a quente com amplias tolerâncias dimensionais ou de superfície (uso comum em concreto armado)
<i>Perfil</i>	Produto acabado de secção transversal com forma geométrica simples ou composta de formas geométricas simples
<i>Perfil leve</i>	Perfil com dimensões nominais $< 80 \text{ mm}$
<i>Perfil médio</i>	Perfil com dimensões nominais $> 80 \text{ mm}$ e $< 200 \text{ mm}$
<i>Perfil pesado</i>	Perfil com dimensões nominais $> 200 \text{ mm}$
<i>Trilho</i>	Perfil de secção transversal especial destinado a formar a pista de rolamento dos veículos do tipo ferroviário
<i>Tubo</i>	Produto oco de secção constante e parede uniforme, geralmente retilíneo e de secção circular
<i>Viga Metálica</i>	Perfil de secção transversal na forma de H, I, U, etc.
<i>Fio-máquina</i>	Produto intermediário de secção circular utilizado para a fabricação de arames, fios, rebites, etc., e geralmente fornecido em rolos
<i>Chapa</i>	Produto plano de espessura $\geq 0,3 \text{ mm}$ e largura $\geq 300 \text{ mm}$
<i>Tira</i>	Produto plano de espessura $> 0,30 \text{ mm}$ e $\leq 5,00 \text{ mm}$, e largura $< 300 \text{ mm}$
<i>Chapa grossa</i>	Chapa com espessura $> 5,00 \text{ mm}$ e largura $\geq 300 \text{ mm}$
<i>Chapa fina</i>	Chapa com espessura $\geq 0,30 \text{ mm}$ e $\leq 6,00 \text{ mm}$, e largura $\geq 300 \text{ mm}$
<i>Folha</i>	Produto plano com espessura $< 0,30 \text{ mm}$ e com qualquer largura
<i>Fita</i>	Produto plano de largura $\leq 300 \text{ mm}$ e fornecida em bobina

Os produtos não-planos, fabricados a partir de blocos, são as perfis estruturais (na forma de I, T, L, C etc.) e os trilhos (trilhos convencionais, trilhos para pontes rolantes etc.).

Os produtos não-planos, obtidos a partir de tarugos, são as barras (de secção redonda, quadrada, hexagonal etc.); as barras para trefilação (fio-máquina); e os tubos sem costura.

Os produtos planos, provenientes do processamento de placas, são as chapas grossas; as chapas e tiras laminadas a quente; as chapas e tiras laminadas a frio; as fitas e tiras para a fabricação de tubos com costura; e as folhas. As chapas laminadas a frio podem ainda se apresentar na forma de chapas revestidas (chapas zincadas, estanhadas, chumbadas; cromadas e pintadas).

10.5.2 Propriedades de produtos laminados

As propriedades mecânicas, metalúrgicas e geométricas dos produtos laminados dependem da composição química da matéria-prima, do processo de laminação a quente e a frio e da forma do produto. Diversos parâmetros de qualidade devem ser controlados durante o processamento para serem atingidas as propriedades especificadas, ou seja: a sanidade interna; a uniformidade da composição química; a ausência de defeitos superficiais; e a uniformidade microestrutural da matéria-prima (lingote). As propriedades, mecânicas e geométricas dos produtos semi-acabados e acabados, são condicionadas pelos parâmetros de processamento (temperaturas e tempos de aquecimento e resfriamento associados as intensidades de deformação plástica).

Muitos dos diversos tipos de produtos, quer quanto à composição, quer quanto à forma, têm as suas propriedades especificadas - em função da aplicação - em normas nacionais e internacionais.

No caso de chapas laminadas a frio para estampagem, são indicados os graus EM (estampagem média), EP (estampagem profunda) e EEP (estampagem extraprofunda resistente ao envelhecimento). A norma especifica ainda as condições de superfície e de acabamento, com existência ou não de proteção com óleo; a apresentação de bordas aparadas ou não aparadas; a quantidade e a natureza de defeitos superficiais; a intensidade da rugosidade, classificando o acabamento em brilhante, fosco e áspero; as composições químicas dos aços dos &e-ntes

graus, indicando os teores máximos de elementos presentes; as propriedades mecânicas, indicando a sua manutenção, após a entrega do material, por quinze dias para os graus EM e EP e seis meses para o grau EEP (devido ao envelhecimento); e a possibilidade de soldagem e de revestimento posterior.

No caso de chapas laminadas a quente para estampagem, são indicados os mesmos graus EM e EP, e ainda o grau EPA (estampagem profunda, aço acalmado). São também especificados os mesmos itens que no caso anterior, podendo-se destacar os seguintes aspectos particulares: as qualidades da superfície são indicadas em apenas duas categorias, ao invés das três correspondentes às chapas laminadas a frio, e as propriedades mecânicas são garantidas, a partir da data do fornecimento, por quinze dias para os graus EM e EP e dois meses para o grau FPA.

10.6 Manipulação e Acabamento de Produtos Planos

10.6.1 Manuseio de bobinas

As bobinas, ao deixarem o laminador de tiras a quente e antes do tratamento de decapagem, são depositadas quer com o seu eixo na horizontal, quer na vertical. De qualquer modo, não se deve colocar mais que três bobinas uma sobre a outra, para evitar deformá-las, achatando-se aquelas da parte inferior das pilhas. À saída da decapagem, são manuseadas com o seu eixo na horizontal e não se deve empilhar uma sobre a outra. O meio mais comum e eficiente, de manuseio de bobinas até 20 t, nas áreas de acabamento, é o trator com garfos elevatórios. Alguns inconvenientes dos tratores de garfos, muito pesados, são: a necessidade de se construírem pisos com elevada capacidade de carga e corredores bastante largos para permitir a manobra para colocação e retirada do material das linhas de processamento. Um piso para ~~um~~ trator capaz de transportar bobinas de 15 t precisa de 20 cm de concreto, revestido de blocos de madeira de 10 cm de altura.

Outro meio de transporte usado especialmente para bobinas com o seu eixo na vertical, é a ponte rolante, empregando-se eletroímãs ou garras articuladas especiais, ou ainda, quando o eixo das bobinas é horizontal, um gancho em forma de C. O inconveniente da ponte rolante é que, normalmente,

o seu operador está muito afastado da área de trabalho, torna-se difícil depositar cuidadosamente a bobina, sem danificar seus bordos. Quase sempre é necessária a presença de um ajudante para assistir ao operador da ponte.

Os transportadores de rolos em V podem ser usados para transferir, de um edifício para outro, bobinas de pequeno peso e com seu eixo na horizontal. Para transportar as bobinas sem danificá-las, o método mais eficiente, embora mais caro, é a corrente sem fim, com patins sobre os quais a bobina é depositada. A vantagem deste sistema é que a bobina não roda sobre si mesma durante o manuseio com todo o peso sobre as espiras externas, o que seria prejudicial no caso de material já pronto.

10.6.2 Acabamento de chapas finas

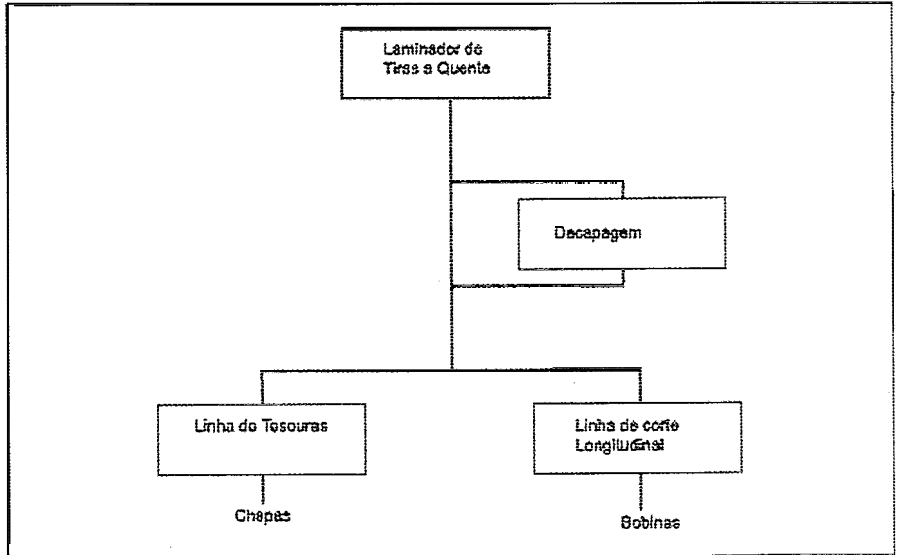
Nos laminadores de tiras a quente mais antigos, cujas bobinadoras não conseguiam enrolar material de maior espessura que 4 mm, a tira era cortada na tesoura volante (colocada depois da última caçota acabadora) e empilhada. O material, em comprimentos de até 9 m, era levado a uma tesoura de reesquadramento, onde era cortado nas dimensões exatas exigidas pelo cliente. Hoje em dia, a maioria dos laminadores de tiras a quente consegue bobinar até 10 mm e planeja-se bobinar até 12,7 mm.

Aproximadamente 75% do material laminado a quente passa pela linha de decapagem; o restante, pelo Acabamento de Chapas a Quente, onde é cortado na forma de chapas e se necessário, por um Laminador de Acabamento. Mais e mais, tem-se disseminado a prática de dividir a bobina em várias outras mais estreitas, numa linha divisora longitudinal (*slitting line*) (Figura 10.21).

As tiras que atravessam as linhas de decapagem de uma usina de produtos planos podem ser destinadas ao laminador de tiras a frio, ao laminador de folhas-de-flandres ou, em menor quantidade, para o acabamento dos produtos laminados a quente, decapados e oleados, onde são processadas da mesma forma que as bobinas vindas do laminador de tiras a quente. Uma pequena quantidade de material laminado a quente e decapado passa por uma linha de galvanização. Trata-se de material mais espesso, que não necessita de redução a frio.

Laminação de Produtos Planos e Não-planos

FIGURA 10.21 - Operações de corte após laminação a quente de chapas (SELECTION..., 1980).²



As bobinas que vão aos laminadores de tiras a frio são reduzidas num laminador reversível de uma só cadeira ou num laminador contínuo de três ou quatro cadeiras. Quantidades cada vez maiores de material laminado a frio vão diretamente a uma linha contínua de galvanização, na qual está incluído um forno de tratamento térmico. Outras bobinas, destinadas à esmaltação vítrea passam por uma linha contínua de recozimento e de decapagem.

A maior parte das chapas finas laminadas a frio é recozida em fornos de campânula e laminada na cadeira de encruamento, depois do que, ou é enviada diretamente ao cliente sob a forma de bobinas, o que vem aumentando nos últimos anos, ou cortada numa linha de tesouras e embarcada sob a forma de chapas (Figura 10.22). Pequenas tonelagens são cortadas logo depois da laminação a frio, recozidas em fornos de campânula e encruadas, já na forma de chapas.

O outro grande fluxo de material deixando a decapagem é laminado para folha-de-flandres em instalações de quatro, cinco e seis cadeiras, ou num laminador reversível. Depois da redução a frio, todo o material para folha de flandres é limpo e recozido. Até bem pouco tempo, o material passava primeiro por uma linha de limpeza eletrolítica e depois era recozido, sob a forma de bobinas, em fornos de campânula. Mais recentemente, grande

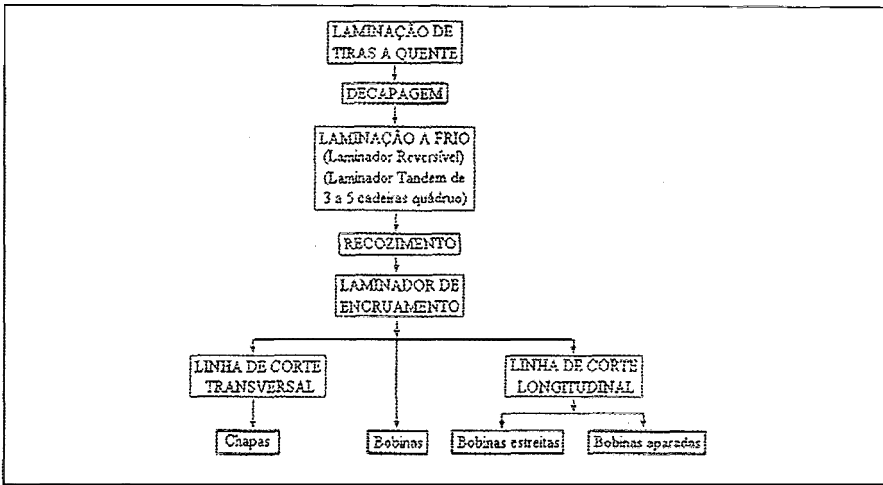


FIGURA 10.22 - Esquema de operações de produção numa linha de tiras a frio (SELECTION..., 1980).²

número de instalações de limpeza e recozimento contínuos, juntos numa só unidade, têm sido construídas, com grande economia de mão-de-obra. A seguir, vem o laminador de encruamento, em geral de duas cadeiras, e a linha de estanhamento eletrolítico. Hoje em dia, nos Estados Unidos, mais de 92% das folhas-de-flandres são produzidas pelo processo eletrolítico, e para o restante usa-se o processo de imersão: neste, a tira depois do laminador de encruamento, é cortada em folhas numa linha de tesouras, passa pela decapagem branca e pelo tanque de imersão com estanho líquido, o qual é coberto do lado de saída por uma camada de óleo de palma.

Uma característica comum a todas as linhas contínuas de processamento (sejam elas de recozimento, galvanização ou de estanhamento), é a capacidade de acumular certa quantidade de material entre a secção de entrada e a de elaboração. A união da ponta de uma nova bobina com a extremidade da que está em processamento, obriga a paralisação da secção de entrada durante um intervalo de tempo, variável de 10 s a 120 s, dependendo do tipo do material e do equipamento usado. Enquanto a junção das duas bobinas está sendo feita, a secção de processamento continua trabalhando normalmente, consumindo o material que foi estocado na área de acumulação, para a qual existem quatro modalidades principais:

- uma única laçada vertical, normalmente usada para material muito fino, tal como a folha-de-flandres (Figura 10.23);

Laminação de Produtos Planos e Não-planos

- laçadas verticais múltiplas passando em ziguezague entre rolos fixos e conjuntos de rolos móveis; usadas para material de pequena espessura (Figura 10.23);
- carros para a laçada de acumulação horizontal; usados para material mais pesado e com superfície altamente polida, tal como chapa para galvanização (Figura 10.24); e
- poços de acumulação onde o material é empilhado sobre si mesmo, como nas linhas de decapagem contínua, quando os pequenos arranhões causados pelo arrastar das laçadas de chapa, umas contra as outras, não são prejudiciais ao material que vai ser reduzido a frio subsequentemente.

No lado de saída das linhas contínuas existe, também, um sistema de acumulação, de menor capacidade, de tipo igual a um dos três primeiros citados.

FIGURA 10.23 - Corte transversal de bobinas laminadas a frio (ARAÚJO, 1997).³

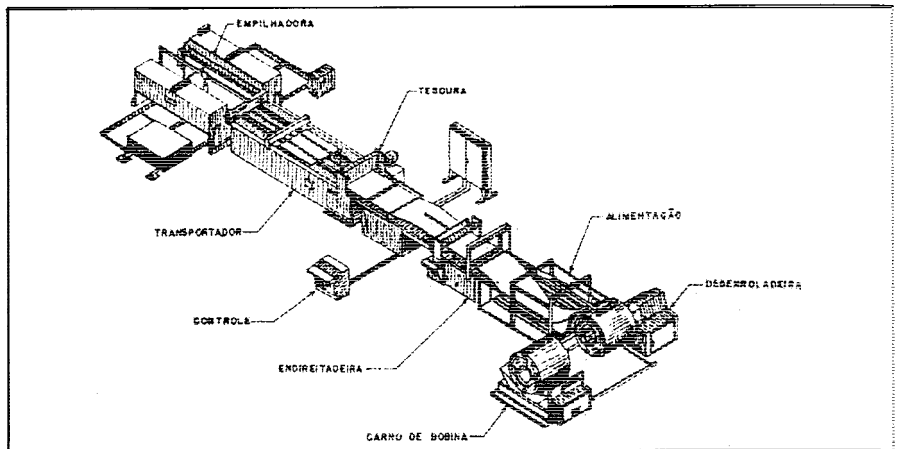
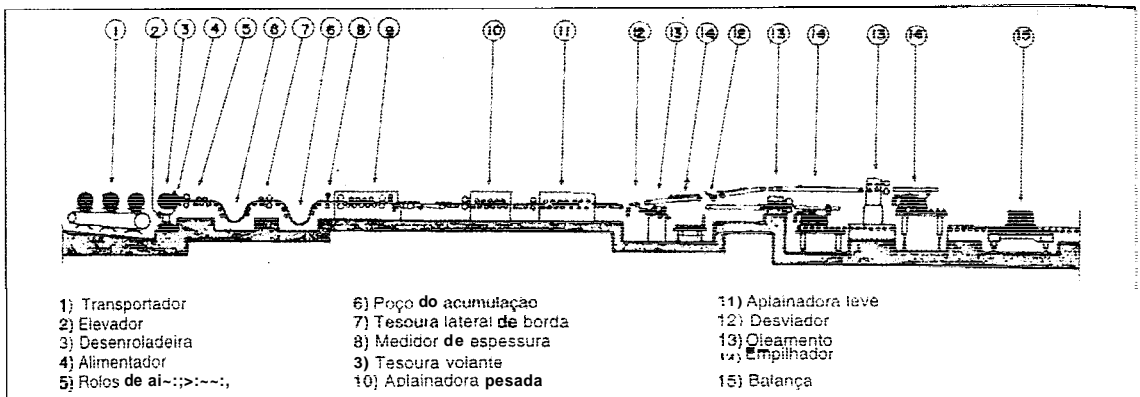


FIGURA 10.24 - Linha de corte transversal de chapas laminadas a frio (ARAÚJO, 1997).³



10.6.3 Linhas de tesouras

Dois tipos de operações de corte longitudinal podem ser necessários numa linha de acabamento de um laminador de arcos: apartamento dos bordos, para obter-se uma bobina de largura rigorosamente exata, ou divisão de bobinas largas em fitas mais estreitas. Para este tipo de operação, a tesoura rotativa ou de discos é a solução ideal. Para o apartamento lateral da tira na largura exata, sem subdividi-la em tiras estreitas, usam-se tesouras montadas sobre carcaças móveis, que podem ser aproximadas e afastadas sem modificar a ajustagem das facas circulares. As linhas para divisão longitudinal de bobinas (*slitting lines*) cortam material entre 0,127 mm até 7,62 mm, na largura máxima de 2.000 mm e que foi enrolado em bobinas pesando até 30 t.

As linhas de corte de alta produção e serviço pesado têm acionamento com velocidade variável, por meio de corrente contínua, enquanto as linhas mais leves podem ser tracionadas por um só motor, de corrente alternada.

As desenroladeiras podem ser de dois tipos: de cones e de mandril expansível. As desenroladeiras de cones têm a vantagem de poder ser empregadas para um grande número de diâmetros internos de bobinas, sem haver necessidade de adaptadores. Os cones são montados em suportes, deslocáveis por meio de pistões hidráulicos, igual e uniformemente em relação à linha de centro da máquina. Uma mesa elevatória coloca as bobinas na posição adequada para a inscrição nos cones.

As desenroladeiras de mandril expansível possuem quatro segmentos, cuja expansão ou contração é feita por um cilindro hidráulico. Os segmentos são movimentados radialmente, por meio de anéis excêntricos, para os mandris até 10 t de capacidade e por meio de cunhas piramidais, nos tamanhos maiores. O ajuste lateral permite a guagem exata da tira, mesmo no caso de bobinas danificadas ou cujas espiras ficam mal-enroladas, deslocando-se a parte superior da bobinadeira por meio de um pistão hidráulico.

Os tipos mais leves têm a fita puxada através de tesoura pelo esforço desenvolvido pela bobinadeira para reenrolar a bobina. Nas linhas mais pesadas, tanto a rebobinadeira como os eixos das cortadeiras, são acionados; para produzir a tensão mecânica necessária, a desenroladeira está ligada a um gerador elétrico.

A tesoura de divisão em tiras estreitas é construída com suportes excêntrica para os mancais, de modo que, ao fazer-se a ajustagem vertical das tesouras, o eixo superior desce, ao mesmo tempo que o inferior é deslocado para cima, mantendo-se a mesma altura da linha de passe.

Os eixos são de aço especial, tratado termicamente, montados em mancais de rolamentos e ligados aos motores de acionamento por meio de acoplamentos flexíveis. Os discos de aço ligado, que constituem as facas rotativas, são montados nos eixos, entre separadores usinados com precisão, que têm a largura exata da fita a ser obtida. O número de facas é em geral limitado a 20 cortes por operação. Do lado de entrada estão as guias, ajustáveis por meio de manivelas, na largura exata da tira e que podem ser placas de aço especial ou roletes com mancais de bronze, os quais são mais recomendados para as linhas de corte de material mais grosso. Quando se deseja aumentar mais ainda a tensão do lado de entrada, a tira deve passar entre tábuas de madeira pressionadas por meio de ar comprimido. No caso de aços com elevado polimento ou de metais não-ferrosos, as tábuas são revestidas de flanela para evitar riscar a superfície.

A sucata das bordas é retalhada numa cortadeira que consiste numa lâmina rotativa e uma outra estacionária. As lâminas das facas têm quatro gumes, sendo suficiente mudar a posição da peça, para ter-se um novo gume, de modo a permitir maiores períodos entre os afinamentos. O tambor rotativo é projetado de modo a ter duas facas colocadas a 180°, permitindo uma melhor distribuição dos esforços, e possui um volante pesado para neutralizar o choque no momento do corte; a ligação entre o motor e o volante é feito por meio de correias em V.

As rebobinadeiras têm mandris do tipo retrátil, cuja expansão é operada hidráulicamente; os separadores são discos de grande diâmetro, com furo central do mesmo tamanho que o mandril e que enrolam as tiras corretamente e sem interferência. Mais recentemente ainda, apareceram os separadores em balanço que eliminam a necessidade dos discos em aço de serrote, usados como separadores, até então.

1) estripamento é feito por uma placa empurradora, que pode ser operada a ar comprimido ou hidráulicamente.

A grande utilização das tiras cortadas é para a fabricação de tubos soldados e, também para a laminação posterior a frio de fitas entre 50 mm e 500 mm, o que é mais econômico que laminar diretamente a quente nestas larguras.

10.6.4 Linhas de tesouras para corte transversal

Basicamente distinguimos: as linhas de corte de bobinas laminadas a quente, capazes de cortar o material até 12 mm de espessura, em comprimentos até 12 m, e uma velocidade máxima de 120 m/min; e as linhas de corte para chapas laminadas a frio, que cortam material desde 0,254 m— até 3 mm, e bobinas pesando até 12 t e nas larguras até 2.000 mm, e chapas de 70 mm a 6 m de comprimento.

Muitas novas linhas de corte transversal para bobinas laminadas a quente possuem uma instalação de encruamento, com a finalidade de melhorar o aplainamento. A colocação desse laminador na própria linha de tesouras, economiza uma operação em separado e dois manuseios da bobina, além de permitir maior precisão no corte das chapas; pois o material aplainado pode ser melhor cortado que aquele com bordos ondulados.

- *Linhas de corte para material laminado a quente - Uma* linha moderna de corte para bobinas laminadas a quente consta das seguintes partes (Figura 10.23):
 - *Rampa de entrada:* com batentes acionados por meio de cilindros pneumáticos, para armazenar três a quatro bobinas a serem processadas;
 - *Abridor:* onde a bobina é posta em posição por meio dos roletes suportes, que a giram de modo a colocar a sua ponta na posição correta para que o cutelo, ao descer verticalmente, afaste a ponta da bobina suficientemente do corpo, permitindo depois que esta ponta entre nos roletes alimentadores;
 - *Desenrolador:* que além do desenrolamento da bobina, efetua o seu aplainamento;
 - *Mesa de acumulação;*
 - *Guias com roletes laterais:* para guiar a tira;
 - *Rolos alimentadores:* sendo o rolete inferior acionado por um motor de corrente contínua e o superior livre, pressionado contra a chapa por meio de cilindros de ar comprimido;

- *Tesoura de aparelhamento lateral*: de discos rotativos com o picador de sucata constituído de duas lâminas fixas e duas montadas num eixo rotativo a 180° C uma da outra;
- *Mesa de acumulação*: antes da tesoura vertical, com a sua mesa de medição e esbarro (deslocável por meio de um sistema de cremalheira);
- *Aplainadoras a frio*: uma com roletes de apoio, para material mais fino (1,27 mm - 4,76 mm) e uma segunda aplainadeira para material de meia espessura (4,76 mm - 9,52 mm), sendo empregada uma ou outra, dependendo da bitoia do material a ser cortado;
- *Correia transportadora inclinável*: por meio de cilindros de ar comprimido, que funciona com alçapão, rejeitando as chapas defeituosas para um transportador localizado sob a máquina ou encaminhando, quando na posição elevada, as chapas de primeira qualidade para o transporte que as leva ao empilhador deste material; e
- *Balança*: para determinação do peso dos amarrados de chapas antes da embalagem final.

As desenroladeiras do tipo cones são usadas quando devam ser processadas bobinas de vários diâmetros internos (e que podem variar desde 400 mm até 762 mm). Os cones são montados em suportes móveis e deslocáveis por igual em relação à linha de centro, através de cilindros hidráulicos.

As desenroladeiras de mandril expansível são usadas especialmente em linhas de corte a frio, ou quando se usam bobinas sempre com o mesmo diâmetro interno. Os quatro elementos expansíveis são montados sobre um eixo de aço forjado e a sua dilatação ou contração é feita por um pistão hidráulico.

A aplainadeira tem três a quatro rolos superiores, ajustáveis individualmente e dois a três roletes fixos, embaixo.

Nas linhas de corte de chapas laminadas a quente, uma mesa de rolos (que no caso de bitolas mais pesadas é coberta com uma correia transportadora motorizada) forma uma corcova na tira como uma reserva de material, enquanto a linha é paralisada momentaneamente durante a efetivação do corte na tesoura, que nas linhas a quente para material acima de 6 mm é do tipo de corte vertical, de baixo para cima, com acionamento por motor elétrico e acoplamento de disco.

Na mesa de medição, a ponta da chapa ao atingir o esbarro montado no cursor móvel faz que um contato elétrico coloque em funcionamento a tesoura, cortando a chapa nas medidas exatas. Para mudar o comprimento a ser cortado, é suficiente destravar o esbarro e movimentá-lo para a nova posição ao longo da escala de medição. Ao deixar a mesa, a chapa, em caso de bitolas mais finas, passa por uma segunda aplainadeira, antes de ser levada às empilhadeiras.

- *Linhas de corte para chapas laminadas a frio* - As linhas para o corte de chapas laminadas a frio empregam tesouras volantes, sejam do tipo rotativo (para folha-de-flandres) operando até 350 m/min., ou do tipo guilhotina oscilante (para chapas de carroceria), cuja velocidade é limitada a 100m/min. Quando as encomendas são variadas nas dimensões e tipos de chapas a serem cortadas, é igualmente eficiente usar-se uma tesoura guilhotina oscilante, (devido às paradas frequentes para mudança de dimensões, na tesoura e nas empilhadeiras). Na laminação a frio, as linhas de tesoura são projetadas para aparar as bordas longitudinais e cortar em comprimentos determinados, as tiras que podem atingir 3 mm de espessura. Estas linhas operam a 45 m/min - 130 m/min., cortando as chapas em comprimentos entre 750 mm e 4.500 mm normalmente.

Na entrada da linha, um elevador hidráulico permite a centragem da bobina entre os cones da desenroladeira e os rolos alimentadores introduzem a tira na tesoura rotativa para o corte lateral, a qual possui um picador de sucata, constituído por uma lâmina estacionaria e duas facas rotativas. A seguir, a tira passa pela aplainadeira que alimenta a tesoura volante, do tipo rotativo ou do tipo Hallden (isto é, guilhotina montada sobre um dispositivo que permite ao corpo da tesoura deslocar-se à mesma velocidade que a tira, enquanto se efetua o corte) (Figura 10.24). Da tesoura, as chapas podem atravessar uma oleadeira antes de seguir para o empilhamento.

- *Linhas para corte de folha-de-flandres* - Inicialmente, usavam-se tesouras guilhotinas convencionais, com o inconveniente de se ter que parar a linha para realizar o corte, o que resultava em perda de tempo e, conseqüentemente, de produção. Surgiram então as tesouras volantes, nas quais as facas estão fixadas num batente e seguindo um arco de círculo. Durante o corte, o movimento relativo entre a chapa e o montante móvel é nulo e o corte pode assim ser feito em “vôo”.

Posteriormente, desenvolveram-se vários tipos de tesouras volantes, capazes de cortar chapa fina à velocidade de 300 m/min, com uma precisão de 1 mm no comprimento, e as tesouras rotativas ou de tambor. Nestas, o corte de uma chapa é feito ao encontrar as lâminas fixadas nos tambores inferior e superior. O comprimento máximo é determinado pela circunferência dos cilindros. Podem ser colocadas duas facas em cada tambor, aumentando assim a frequência de sortes. A mudança da velocidade de rotação permite, com tambores de diâmetros diferentes, variar os comprimentos cortados, entre 450 mm e 1.200 mm, o que é satisfatório no caso de folhas-de-flandres. Corno durante o corte não é possível a uma lâmina da tesoura ultrapassar o bordo da outra, a chapa é um pouco amassada e a precisão do corte depende do ajuste perfeito das lâminas. A razão porque estas tesouras não são usadas para chapas mais grossas, como as destinadas à carroceria dos automóveis, são os esforços tangenciais excessivos nas facas. Este tipo de tesouras permite cortar chapas entre 0,2 mm e 0,5 mm de espessura, (MSG 32 a MSG 25) a uma velocidade de 300m/min (Figura 10.23).

Uma linha de corte de folha-de-flandres compõe-se de uma desenroladeira; aparamento lateral; rolos medidores de bitola; aplainadeiras; tesoura volante; classificadora; transportadores de correia; e empilhadora. Nesta linha é também instalado o detetor de furos (*pin-holes*), baseado na ação da fotocélula: os furos da tira permitem à luz de uma bateria de lâmpadas atingir as fotocélulas do outro lado, que atuam automaticamente sobre o alçapão classificador, para recusar a chapa defeituosa.

Nas linhas para folha-de-flandres existem algumas diferenças em relação às linhas de corte a frio convencionais, como, por exemplo, a sucata lateral não é picotada e sim, enrolada numa bola, devido à sua pequena espessura.

Os rolos controladores de bitola, colocados à frente da tesoura, operam um alçapão colocado depois desta, no caso de haver material fora da espessura certa, o qual é desviado para um outro transportador, na parte inferior da linha.

Uma vez que a tesoura rotativa, em razão de não ter suficiente força de corte, não pode ser usada para o material laminado a frio de maiores espessuras, emprega-se uma tesoura oscilante (tesoura Hallden) de facas móveis tipo guilhotina, cujo montante desloca-se, enquanto se efetua o corte,

à mesma velocidade que a tira; terminado o corte, a tesoura retorna à posição inicial, enquanto um novo comprimento a cortar está sendo transportado, repetindo-se o processo para cada corte sucessivo. A construção de uma tesoura deste tipo torna-se, ainda, mais complexa quando se deseja cortar comprimentos diferentes, o que é obtido, mediante alteração no arco de oscilação da tesoura e correspondente modificação da velocidade, por meio de um redutor de velocidade infinitamente variável.

10.6.5 Aplainamento

As chapas finas são vendidas normalmente em dois tipos: aplainamento comercial, quando as chapas vão ser estampadas e repuxadas e, portanto, o aplainamento não tem muita influência na forma da peça estampada; aplainamento pelo estiramento, quando forem utilizadas em painéis, em que pouco trabalho de estampagem é feito nas chapas e o produto acabado deve ser perfeitamente plano e isento de ondulações. O aplainamento comercial pode ser obtido no laminador a frio ou na aplainadeira de rolos; quando é necessário um aplainamento mais perfeito, usa-se o estiramento.

Na aplainadeira de rolos, os rolos superiores são dispostos alternadamente com os inferiores, de modo que a chapa, ao atravessar a máquina é flexionada alternadamente para cima e para baixo, além do limite de deformação permanente das fibras externas. O conjunto de rolos superiores pode ser afastado ou aproximado dos rolos inferiores, atuando-se sobre os parafusos ajustadores e controlando-se, assim, a pressão exercida sobre a chapa. O maior trabalho é efetuado pelos pares de rolos colocados do lado da entrada, enquanto os restantes são entrosados cada vez menos, de modo que, no lado de saída, a sua ação é apenas de acabamento (Figura 10.25).

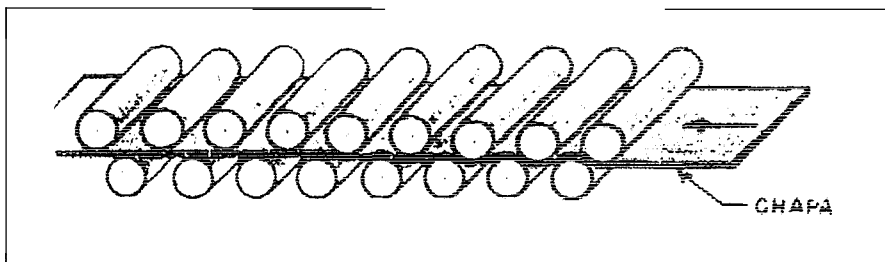


FIGURA 10.25 -
Aplainamento de chapa
por roletes (ARAÚJO,
1997).³

As chapas que forem enviadas para indústrias fazendo repuxo profundo, tais como carrocerias de automóveis e que ficaram estocadas durante muito tempo, devem ser submetidas a um apainamento superficial logo antes da operação de repuxo, para evitar a formação de linhas do Luders (*stretcher strains*). Neste caso, a aplainadeira cumpre outra finalidade, além da de tornar o material inteiramente plano: evita as linhas de Luders durante o repuxo.

As chapas que forem recozidas a uma dureza Rockwell B-55 no máximo, isto é, material completamente dútil, devem receber um passe num laminador de encruamento, para reduzir o alongamento enquanto não se atinge o ponto de deformação permanente e, assim, evitar "dobras de aplainamento" ou "ondulados", quando a chapa passar entre os rolos da aplainadora. A redução de encruamento é variável entre 0,5% a 2%.

Enquanto as aplainadeiras a quente para chapas grossas são do tipo duo (com rolos de 250 mm - 350 mm de diâmetro), as aplainadeiras a frio são do tipo quádruplo, isto é, com roletes de apoio, para impedir a deflexão dos cilindros de trabalho, muito mais delgados (de 50 mm a 100 mm de diâmetro). A aplainadeira Ungerer é usada especialmente em operações de acabamento, para obterem-se chapas quase perfeitamente planas. Sua característica principal é o emprego de rolos de trabalho de diâmetro reduzido; os rolos de suporte são dispostos de tal modo, que os cilindros de trabalho recebem apoio de dois lados. A rigidez resultante desta disposição permite o uso de rolos aplainadores de diâmetro muito menor que os outros tipos de máquina.

O aplainamento pelo estiramento foi desenvolvido por J. W. Britton em 1885 na cidade de Cleveland. As chapas são raramente aplainadas isoladamente, usando-se pacotes de 2 até 8 chapas ao mesmo tempo, dependendo da sua espessura. Nesta operação, as chapas são presas pelas extremidades por meio de garras serrilhadas. Uma das garras é móvel ao longo da mesa (para ajustar-se ao comprimento da chapa a esticar) e é mantida firmemente travada, durante a operação. A outra garra é fixa, excetuando-se o deslocamento produzido por um pistão hidráulico, que fornece o esforço necessário para esticar a chapa no alongamento necessário para produzir o apainamento (Figura 10.26).

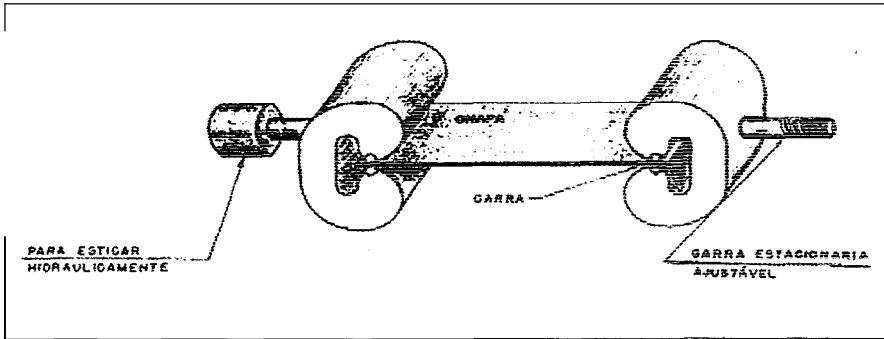


FIGURA 10.26 -
Aplainamento de chapas
por estiramento
(ARAÚJO, 1997).³

As modernas máquinas de esticar são construídas desde 100 t até 4.000 t de capacidade, com garras pressionadas por sistema óleo hidráulico, cabeçote móvel com transição motorizada e sistema de travamento hidráulico. O estiramento é controlado, parando-se a máquina automaticamente, ao ser atingido um alongamento predeterminado, obtendo-se, para um determinado programa, a mesma elevação de resistência mecânica. O efeito produzido pelo estiramento é de eliminar as ondulações e dobras da chapa e continuar acima do limite elástico do aço, fazendo-se um alongamento de 1% a 2%, de modo que as chapas não retornem à forma inicial e permaneçam planas.

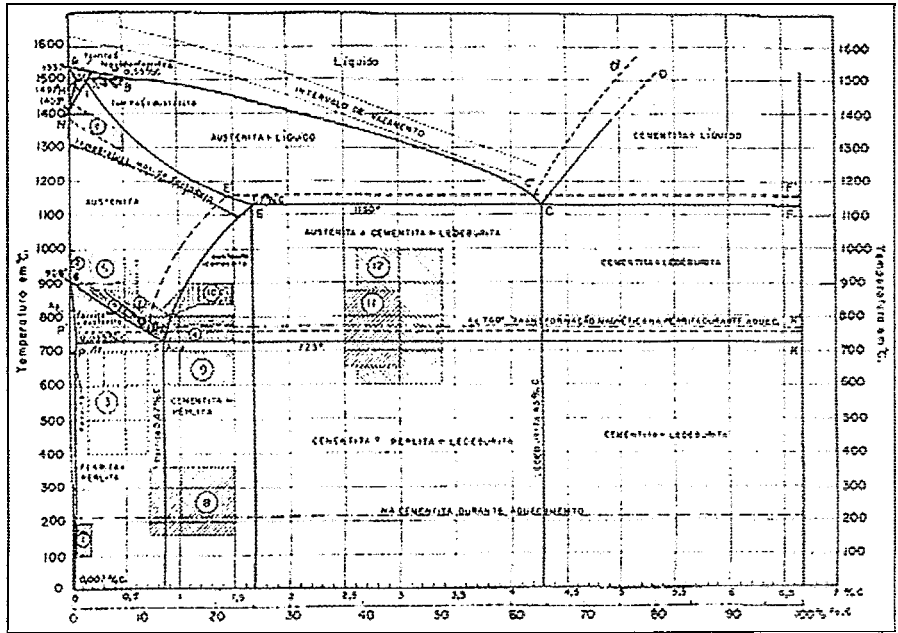
10.7 Tratamentos Térmicos dos Produtos Planos

10.7.1 Normalização

Em geral, a normalização tem dois objetivos: refinar a estrutura do aço e obter uma melhor distribuição e tamanho das partículas de carboneto.

A prática normal é aquecer o aço de 50° C a 80° C acima da temperatura crítica A_{c3} , a qual, dependendo do teor de carbono, varia de 900° C, para o aço de baixo teor de carbono, a 730° C, para o aço com 0,80% deste elemento. Depois, a chapa grossa é resfriada rapidamente para evitar cristais grandes de ferrita. Com este tratamento, as tensões são eliminadas e forma-se uma nova estrutura de perlita lamelar numa matriz de ferrita (Figura 10.27).

FIGURA 10.27 -
Diagrama Fe-C (ARAÚJO,
1997).³



A normalização é feita num forno contínuo, onde as chapas são alimentadas uma a uma, para haver maior rapidez no aquecimento. Depois de atingir a temperatura adequada, sendo aquecida à velocidade de 1 cm/h, é bem uniforme a distribuição do calor. A chapa então passa à zona de resfriamento rápido onde uma placa de pressão a mantém aplainada e sem distorção, durante a aplicação dos jatos de água à pressão de 40 m de coluna de líquido. A seguir, ela é levada ao forno de alívio de tensões onde é aquecida a cerca de 675° C, podendo ficar entre 45 min. até várias horas, dependendo da espessura e da análise do aço; depois é resfriada e cortada nas dimensões da encomenda.

10.7.2 Reozimento: generalidades

Durante a laminação a frio, a resistência mecânica do aço aumenta consideravelmente, devido à deformação da estrutura de cristalização. A matéria-prima para a produção da folha-de-flandres (chapa preta) é geralmente laminada a frio com reduções de 80% a 90%, até uma espessura final de 0,20 mm a 0,35 mm e larguras até 915 mm. A maioria das chapas laminadas a frio, porém, sofrem reduções de 45% a 65%, até uma espessura

final de 0,63 mm a 1,65 mm, em larguras que variam entre 750 mm e 1.850 mm. A ductilidade, por outro lado, decresce rapidamente; em consequência, as chapas ao saírem do laminador a frio têm pequena capacidade de deformação, a qual deve ser bastante elevada, para as operações de estampagem.

O recozimento tem por fim restaurar a ductilidade, remover tensões internas oriundas da laminação a frio e obter uma estrutura adequada à utilização da chapa.

Como operação final, a laminação de encruamento, ou de acabamento (leve redução a frio), é feita depois do recozimento, para evitar marcas de alongamento (*stretcher strains*) na estampagem e para obter aplainamento e superfície lisa da chapa.

O tamanho do grão do material acabado depende do tamanho dos cristais antes da laminação a frio, tanto quanto da redução feita, da temperatura de recozimento e do tempo de permanência a esta temperatura. Assim, a temperatura do final de laminação a quente é um dos principais fatores que determinam o tamanho do grão da tira. Uma estrutura uniforme pode ser obtida se toda a laminação a quente for realizada na fase austenítica. Uma estrutura grosseira resulta quando a temperatura de bobinagem é superior a 700° C e a deformação dos grãos é observada quando a bobinagem se faz abaixo de 600° C.

A granulação grosseira dos cristais pode resultar em rugosidade durante a estampagem, com aspecto de "casca de laranja", enquanto granulação muito fina poderá resultar em material muito resistente e em linhas de Luders. Por outro lado, as temperaturas muito altas de bobinagem tendem a produzir partículas de cementita, grandes e de forma irregular, enquanto temperaturas mais baixas, resultam em partículas de cementita mais finas e mais uniformemente distribuídas.

10.7.3 Recozimento em caixa ou batelada

O recozimento de chapas laminadas a frio é feito em lotes, em fornos descontínuos (para chapas cortadas ou bobinas enroladas), ou em fita, nos fornos contínuos (para tiras).

Inicialmente, o recozimento era feito em fornos de soleira de carro, queimando carvão ou óleo. Os pacotes de chapas, totalizando 15 t a 25 t eram

Laminação de Produtos Planos e Não-planos

aquecidos durante 20 a 35 horas. Posteriormente, desenvolveu-se o forno de campânula móvel, aquecida pela combustão de gás no interior de tubos de aço refratário, localizados nas paredes da coifa. Para cada campânula existem três ou quatro bases, onde são colocadas as pilhas de bobinas ou de chapas.

Uma coifa intermediária de chapa de aço é colocada sobre o material a recozer e, por sua vez, é coberta pela campânula de aquecimento.

Os tubos de aquecimento são feitos em aço especial, com 25% a 28% de cromo e 12% de níquel; têm de 75 mm a 120 mm de diâmetro com uma espessura de parede da ordem de 6 mm a 9 mm. O gás combustível queima no interior desses tubos e os produtos de combustão escapam para o ar livre. O calor é irradiado, pelas paredes, para a coifa intermediária e desta para a carga. Um ventilador localizado na base do forno faz a recirculação dos gases quentes, através do material que está sendo recozido.

O formato destes fornos pode ser retangular ou circular, conforme sejam recozidas pilhas de chapas ou bobinas. Hoje, ainda, a grande maioria das chapas laminadas a frio é recozida em lotes, sob a forma de bobinas, em fornos de campânula, sob uma atmosfera protetora, aquecendo-se o material a uma temperatura superior à de recristalização e mantendo-o a esta temperatura por um certo tempo, antes de resfriá-lo lentamente.

A temperatura de recozimento e o tempo de encharque variam com a utilização final do produto; por exemplo, a chapa de estampagem profunda é recozida a uma temperatura mais elevada e durante mais tempo que a chapa de qualidade comercial. Esta última é recozida entre 650° C e 690° C, num período de encharque de 3 a 8 horas. O material para estampagem profunda é recozido a temperaturas entre 670° C e 727° C, com um encharque de 8 a 15 horas.

Um dos defeitos encontrados no recozimento em lotes era o da colagem das chapas umas às outras, principalmente quando se tratava de material já cortado. A temperatura, o tempo de encharque, a altura da pilha e a superfície da chapa são os fatores de maior importância no aparecimento destes defeitos.

Embora no passado fossem usados fornos de recozimento para várias pilhas de bobinas colocadas sobre uma mesma base (4 ou 8 pilhas por base), sendo as coifas internas aquecidas de dois lados apenas, mais modernamente é quase universal o uso de fornos com uma única pilha de bobinas, o que

permite colocar os tubos radiantes uniformemente espaçados em torno da periferia e, assim, obter uma irradiação uniforme e rápida. &?;a condição ditada pela prática operacional é que, sendo as larguras e tamanhos das bobinas muito variáveis, a utilização efetiva de um forno de 6 ou 8 pilhas de bobinas será menor que o forno de uma só pilha.

Uma instalação de recozimento moderna consiste de uma câmpnula de aquecimento e três bases, podendo produzir cerca de 1,2 t/h a 1,8 t/h, ao recozer aço de baixo carbono até a temperatura de 730" C.

O forno de recozimento, propriamente dito, consiste de uma coifa cilíndrica, revestida interiormente de isolante térmico e depois de refratário, sendo o aquecimento feito por uma série de 8 a 12 tubos radiantes, dobrados em forma de letra O, bastante alongada, no interior dos quais se faz a combustão de gás rico (gás de coqueria) ou de óleo diesel (Figura 10.28).

O aquecimento é feito, principalmente, na metade inferior do forno, pois a irradiação dos tubos de aço especial, dentro dos quais queima o gás, transmite rapidamente o calor à coifa intermediária e o topo desta passa também a irradiar calor e aquece a bobina mais alta da pilha, não só pelos lados, como também por cima. Para compensar esta tendência, os fabricantes de fornos procuram aplicar maior irradiação na parte inferior, aumentando a área dos tubos nesta região.

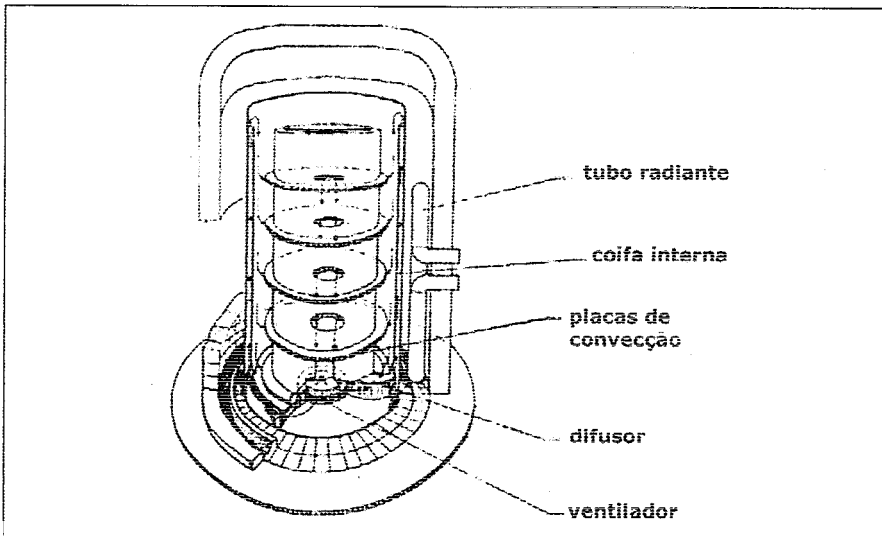


FIGURA 10.28 - Forno de recozimento de bobinas (ARAÚJO, 1997).³

aquecidos durante 20 a 35 horas. Posteriormente, desenvolveu-se o forno de campânula móvel, aquecida pela combustão de gás no interior de tubos de aço refratário, localizados nas paredes da coifa. Para cada campânula existem três ou quatro bases, onde são colocadas as pilhas de bobinas ou de chapas.

Uma coifa intermediária de chapa de aço é colocada sobre o material a recozer e, por sua vez, é coberta pela campânula de aquecimento.

Os tubos de aquecimento são feitos em aço especial, com 25% a 28% de cromo e 12% de níquel; têm de 75 mm a 120 mm de diâmetro com uma espessura de parede da ordem de 6 mm a 9 mm. O gás combustível queima no interior desses tubos e os produtos de combustão escapam para o ar livre. O calor é irradiado, pelas paredes, para a coifa intermediária e desta para a carga. Um ventilador localizado na base do forno faz a recirculação dos gases quentes, através do material que está sendo recozido.

O formato destes fornos pode ser retangular ou circular, conforme sejam recozidas pilhas de chapas ou bobinas. Hoje, ainda, a grande maioria das chapas laminadas a frio é recozida em lotes, sob a forma de bobinas, em fornos de campânula, sob uma atmosfera protetora, aquecendo-se o material a uma temperatura superior à de recristalização e mantendo-o a esta temperatura por um certo tempo, antes de resfriá-lo lentamente.

A temperatura de recozimento e o tempo de encharque variam com a utilização final do produto; por exemplo, a chapa de estampagem profunda é recozida a uma temperatura mais elevada e durante mais tempo que a chapa de qualidade comercial. Esta última é recozida entre 650° C e 690° C, num período de encharque de 3 a 8 horas. O material para estampagem profunda é recozido a temperaturas entre 670° C e 727° C, com um encharque de 8 a 15 horas.

Um dos defeitos encontrados no recozimento em lotes era o da colagem das chapas umas às outras, principalmente quando se tratava de material já cortado. A temperatura, o tempo de encharque, a altura da pilha e a superfície da chapa são os fatores de maior importância no aparecimento destes defeitos.

Embora no passado fossem usados fornos de recozimento para várias pilhas de bobinas colocadas sobre uma mesma base (4 ou 8 pilhas por base), sendo as coifas internas aquecidas de dois lados apenas, mais modernamente é quase universal o uso de fornos com uma única pilha de bobinas, o que

permite colocar os tubos radiantes uniformemente espaçados em torno da periferia e, assim, obter uma irradiação uniforme e rápida. Outra condição ditada pela prática operacional é que, sendo as larguras e tamanhos das bobinas muito variáveis, a utilização efetiva de um forno de 6 ou 8 pilhas de bobinas será menor que o forno de uma só pilha.

Uma instalação de recozimento moderna consiste de uma campânula de aquecimento e três bases, podendo produzir cerca de 1,2 t/h a 1,8 t/h, a recozer aço de baixo carbono até a temperatura de 730° C.

O forno de recozimento, propriamente dito, consiste de uma coifa cilíndrica, revestida interiormente de isolante térmico e depois de refratário, sendo o aquecimento feito por uma série de 8 a 12 tubos radiantes, dobrados em forma de letra O, bastante alongada, no interior dos quais se faz a combustão de gás rico (gás de coqueria) ou de óleo diesel (Figura 10.28).

O aquecimento é feito, principalmente, na metade inferior do forno, pois a irradiação dos tubos de aço especial, dentro dos quais queima o gás, transmite rapidamente o calor à coifa intermediária e o topo desta passa também a irradiar calor e aquece a bobina mais alta da pilha, não só pelos lados, como também por cima. Para compensar esta tendência, os fabricantes de fornos procuram aplicar maior irradiação na parte inferior, aumentando a área dos tubos nesta região.

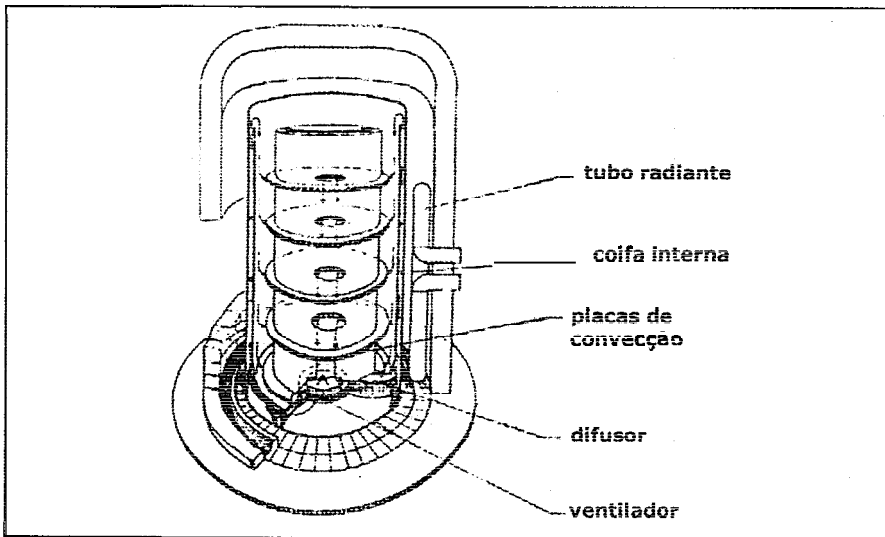


FIGURA 10.28 - Forno de recozimento de bobinas (ARAÚJO, 1997).³

Também tem sido usada a queima direta no interior da campânula, isto é, sem o uso dos tubos radiantes, a chama do queimador atingindo diretamente a coifa intermediária. A rapidez do aquecimento é maior, porém, para se obter melhor durabilidade, as coifas intermediárias devem ser de aço especial e, ainda assim, a sua vida não é muito longa.

As bases onde são colocadas as pilhas de bobinas consistem de uma estrutura metálica rígida, revestida de refratário; um ventilador centrífugo, localizado no seu centro, assegura a recirculação dos gases quentes da atmosfera protetora em torno da carga. A coifa intermediária de chapa de aço recobre a pilha de bobinas a recozer. Dentro desta coifa é que circula a atmosfera protetora, sendo a vedação assegurada por um selo de areia ou de vitva.

As vantagens de se usar tubos radiantes são as seguintes: evita-se o aquecimento localizado, como no caso de queimadores retos; há menor manutenção da coifa intermediária, a qual pode ser feita de aço comum; há melhor distribuição da temperatura, evitando-se o superaquecimento do topo da carga e o crescimento excessivo de grão, da bobina superior.

A duração de um tubo radiante de aço especial é de dois a três anos. Com o aquecimento direto, as campânulas intermediárias devem ser, ou de aço especial ou revestidas externamente com uma camada metalizada de alumínio ou de cromo. Um tubo radiante pode fornecer entre 100.000 a 125.000 kcal/h e, normalmente, cada campânula de aquecimento possui 10 dessas unidades, com um total de 1 milhão a 1,25 milhões de kcal/h.

Entre as bobinas são colocadas, como separadores, as placas de convecção, sujas aletas soldadas à placa suporte orientam o fluxo térmico para os bordos da bobina que sobre ela se apóiam e, assim, conduzem o calor mais rapidamente para as espiras internas e para o centro da bobina.

10.7.4 Recozimento contínuo

Ao recozer em forno de campânula, o calor é transmitido do exterior, lentamente, ao interior da bobina, até esta atingir a temperatura de recozimento e depois é, também, lentamente retirado durante o resfriamento. Portanto, a parte externa da bobina permanece mais tempo a temperaturas mais elevadas que a parte interna. Daí poderão resultar diferenças na estrutura cristalina e nas propriedades mecânicas da tira, ai

quais, apesar das melhorias nos sistemas de aquecimento e da circulação dos gases da atmosfera protetora, não se podem evitar completamente. Ao se recozer uma instalação contínua, cada porção da tira é submetida a um tratamento térmico uniforme, que garante constância e reprodutibilidade nas propriedades das chapas.

O recozimento contínuo, também, feito sob atmosfera protetora, porém, o ciclo de tratamento é bastante curto, não demorando mais que 2 min a 3 min. A tira atravessa o forno de aquecimento a velocidades entre 100 m/min. e 600 m/min. Os primeiros materiais recozidos em fornos contínuos, devido ao fato de que o tempo de exposição à temperatura elevada era muito curto, tinham uma certa rigidez intrínseca e não eram tão adequados à estampagem profunda; por outro lado, este material era de interesse para a produção de lataria.

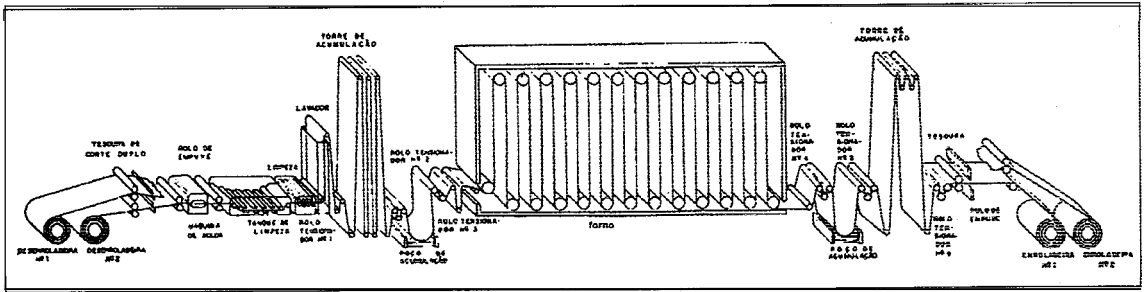
A vantagem de recozimento contínuo é a possibilidade de regular muito mais rapidamente a temperatura de recozimento, o tempo de encharque e a velocidade de resfriamento, facilitando a programação das encomendas. Como grande parte das instalações contínuas são destinadas ao recozimento de chapas para folhas-de-líndres, elas necessitam de uma instalação de limpeza em banho alcalino, antes do aquecimento. As modernas instalações de recozimento contínuo de produtos para estanhamento incluem normalmente a limpeza da superfície da chapa na mesma linha de processamento.

A alimentação da linha, portanto, é feita com as bobinas que saem do laminador a frio, e a tira passa pelas desenroladeiras, tesoura de pontas, máquina de solda com costura, roletes tensionadores e uma torre de acumulação (que permite a continuidade de funcionamento das demais seções, enquanto é feita a alimentação e solda de uma nova bobina à extremidade da tira anterior), a fim de se manter constante a velocidade de operação através do forno, enquanto a seção de entrada está parada. Outras instalações usam um poço de acumulação. A torre de acumulação tem a vantagem de centrar melhor a tira e evitar o movimento pendular, que ocorre no caso de haver uma única iaçada por gravidade. A instalação deve ter a possibilidade de acumular material suficiente para um minuto de operação da linha à plena velocidade.

Laminação de Produtos Planos e Não-planos

No caso de folha-de-flandres, a tira é submetida a uma operação prévia de limpeza que consiste numa imersão de 4 a 5 segundos numa solução aquecida, combinada, às vezes, com unia ação eletrolítica, para libertar os óleos da superfície da tira, seguindo-se uma passagem entre escovas rotativas, lavagem em água quente, chuveiros, rolos enxugadores e um secador de ar quente. Depois da secagem, a tira passa por um rolo tensionador e um rolo oscilante, por meio do qual a tensão é mantida entre os limites desejados e passa à zona de preaquecimento, onde trafega em contracorrente com os produtos da combustão, sendo aquecida até 200° C (Figura 10.29).

FIGURA 10.29 - Esquema de uma linha de recozimento contínuo de bobinas (ARAÚJO, 1997).³



A zona de aquecimento, propriamente dita, consiste numa série de placas radiantes nas quais se queima gás de coqueria, operando a 900° C e dispostas de ambos os lados da tira a uma distância de 200 mm. A temperatura desta é elevada a 700° C em menos de 5 segundos. Em algumas instalações a zona de encharque é aquecida eletricamente.

A atmosfera no interior do forno é de nitrogénio que contém de 3% a 6% de hidrogénio, obtida pela queima de hidrocarbonetos com o ar.

Ao deixar a zona de aquecimento, a tira passa à zona de resfriamento lento que é revestida de refratário e possui elementos de aquecimento, assim como resfriadores, com circulação de ar frio no seu interior. Nela, a temperatura da chapa desce a 480° C.

A zona de resfriamento rápido consiste de dutos (ou placas) com camisas de água, entre as quais a tira passo por várias vezes, até atingir a temperatura final, pouco acima da ambiente.

Como a superfície da tira é brilhante¹ seu coeficiente de irradiação é mínimo e a tira resfria-se lentamente. Alguns fabricantes resfriam a tira até

290° C e, então, mergulham-na em água para resfriamento completo abaixo de 50° C. No lado de saída existem: rolos tensionadores; torre de acumulação de saída; tesoura; rolos de empuxe; duas bobinadeiras com mandril expansível, para continuar processando o material, enrolando-o em uma bobinadeira simultaneamente à retirada da bobina da segunda, para evitar paralisação da linha.

Uma das vantagens do recozimento contínuo é evitar-se a colagem das espiras, o que ocorre no recozimento de bobinas em fornos campânula. Outra vantagem do recozimento contínuo é a eliminação das manchas de areia (causadas pelos grãos de sílica da vedação dos fornos campânula). Em compensação, aparecem outros defeitos causados pela formação de casca de óxidos na superfície dos rolos de guia, nas zonas de temperatura elevada.

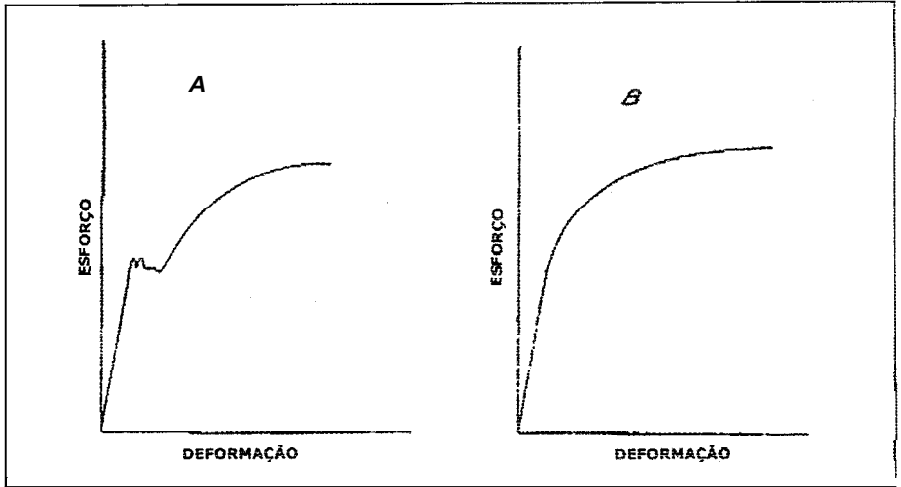
As velocidades dos fornos contínuos são da ordem de 900 m/min, o que corresponde a 90 t/h dependendo da espessura e largura da tira. As características de apiainamento são excelentes pela manutenção de uma tensão uniforme e controlada, enquanto a tira está em temperatura elevada.

10.8 Laminação de Encruamento (*Skin Pass*)

10.8.1 Generalidades

Depois do recozimento, as chapas de aço estão completamente amolecidas, mas nesse estado não são apropriadas para seu emprego. O diagrama da Figura 10.30 mostra em A qual é, para o metal recozido, a forma da "curva de tração", isto é, a curva que dá a evolução da tensão de deformação em função da deformação, durante um ensaio de tração. Observa-se o patamar que existe no limite elástico. Suponha-se que se submeta à deformação, por flexão, um corpo de prova dessa chapa recozida. Até o limite elástico a deformação permanecerá regular, mas desde que um ponto da superfície tenha atingido o limite elástico, esse ponto vai se deformar, e por causa da anomalia da curva de tração, é esse mesmo ponto que vai continuar a se deformar. Isso acontece até o momento em que a tensão, aumentando nessa zona, uma nova deformação local se produzirá em um ponto vizinho.

FIGURA 10.30 - Curvas tensão-deformação: (A) antes do *skin pass*; (B) depois do *skin pass* (BLAIN, 1964).⁴



Vê-se, então, que, por causa da presença da anomalia na curva de tração, a deformação não será uniforme, mas se localizará em certas regiões. Se, por exemplo, procura-se conseguir uma superfície cilíndrica com uma chapa recozida obtém-se, em lugar de um cilindro, um prisma tendo um grande número de lados. As arestas desse prisma são constituídas por linhas chamadas linhas de Lüders. Essas linhas prejudicam o aspecto das peças, porque marcam, de modo acentuado, a superfície polida do metal; assim, não é possível utilizá-las, para estampagem de peças de carrocerias de automóvel, pois as chapas provenientes do recozimento dão lugar à formação de linhas de Lüders.

Se se der ao metal proveniente do recozimento, um **passo** muito leve de laminação, 1% por exemplo, a “curva tensão-deformação” modifica-se (Figura 10.30 B) e a anomalia no limite elástico desaparece. Essa chapa se deixará conformar, sem dar lugar à formação de linhas de Lüders. Infelizmente, segundo o tipo de aço, essa anomalia na curva de tração reaparecerá depois de um tempo mais ou menos longo, sob efeito de fenômenos de envelhecimento. Ela reaparece, de início muito levemente, tornando-se cada vez mais acentuada com o tempo. É necessário utilizar as chapas para estampagem o mais rapidamente possível, após o passe de encruamento posterior ao recozimento. Uma boa precaução, freqüentemente observada nas oficinas de peças de carroceria de automóveis, é passar as chapas

em uma desempenadeira, onde rim rolete produz uma forte deformação por flexão na mesma chapa. Esse tratamento encrua ligeiramente toda a superfície e faz desaparecer a tendência que o envelhecimento havia produzido, a da formação de vermiculares.

10.8.2 Laminadores de encruamento de chapas finas

Para as chapas finas, de carroceria ou outras, utiliza-se uma cadeira única, quádruo, com cilindros de 500 mm a 1350 mm. Às vezes, os cilindros de trabalho são um pouco menores, com 450 mm de diâmetro. Na maioria dos casos, os cilindros têm acabamento fosco, porque se exige que as chapas tenham superfície fosca para melhor retenção do lubrificante durante a estampagem e melhor retenção da pintura no acabamento das peças.

Existem dois tipos de laminadores de encruamento para chapas finas: os que laminam bobinas e os que laminam chapas recozidas depois de cortadas. Os primeiros são equipados com desenroladeira com mandril extensível, no lado da entrada e uma enroladeira, no lado da saída. A tira passa na entrada e saída por rolos tensionadores.

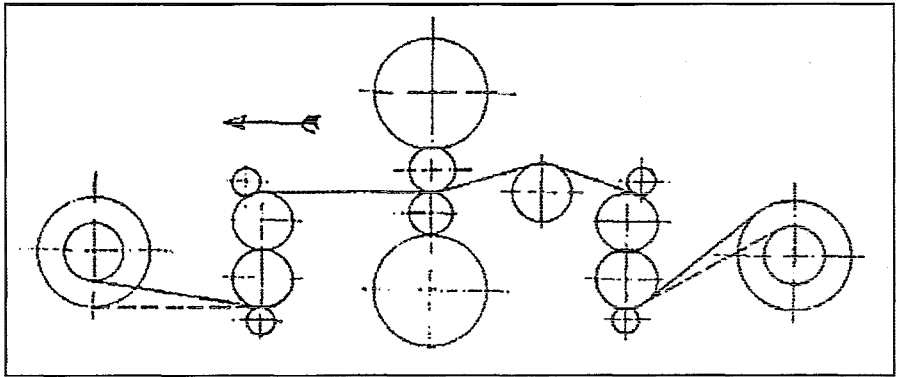
Esses laminadores são equipados ou com mesas de roletes acionados, ou por esteiras transportadoras, na entrada e na saída. Como se trabalha sem tensão avante e a ré, é muito difícil obter uma chapa plana depois de um passe de encruamento. Assim, não somente é necessário dar aos cilindros um perfil adequado, mas é ainda preciso regular este perfil durante a laminação, de acordo com o lote de chapas laminadas. A planicidade das chapas não sendo perfeita, após este passe de encruamento, faz que elas passem, em seguida, por uma seqüência de pequenos roletes múltiplos instalada na mesma linha.

Para folha-de-flandres o problema é muito mais difícil, pois têm-se tiras muito finas (0,25 mm de espessura), completamente secas, não sendo possível aplicar o passe de encruamento num laminador com cilindros de trabalho de 500 mm de diâmetro, sem que uma forte tração não seja aplicada à tira. Por outro lado, pelo fato de as condições de utilização destas folhas exigirem certa rigidez, faz-se necessário um encruamento maior nestas tiras. Por isso, não é possível conseguir um resultado satisfatório de encruamento de folha-de-flandres em cadeira única, empregando-se freqüentemente laminadores

Laminação de Produtos Planos e Não-planos

de encruamento, também, de duas cadeiras (Figura 10.31). Na maioria dos casos os cilindros de trabalho da primeira cadeira são fossos e os da segunda são lisos, porque isto facilita o encruamento. A velocidade de trabalho é alta, da ordem de 1000 m/min. O controle do processo deve ser rigoroso, para que todas as tensões ao longo da linha desse laminador sejam corretas. É necessário, também, uma regulagem para adaptação das velocidades de início e fim de processo, em relação à velocidade normal de laminação.

FIGURA 10.31 - Esquema de um laminador de encruamento (BLAIN, 1964).⁴



REFERÊNCIAS

- 1 BRESCIANI FILHO, E.; ZAVAGLIA, C.A.C.; BUTTON, S.T.; GOMES, E.; NERY, F.A.C. *Conformação plástica dos metais*. 4.ed. Campinas: Editora da UNICAMP, 1991. p. 23-50.
- 2 SELECTION of materials for metalworking rolls. In: METALS handbook: Properties and selection: stainless steels, tool materials and special purpose metals. 9.ed. Metals Park, OH: American Society for Metals, 1980. v. 3, p. 502-507.
- 3 ARAÚJO, L.A. *Siderurgia*. 2.ed. São Paulo: Editorial Lema, 1997. v. 3, p. 358-367, 368-371, 376-379.
- 4 BLAIN, P. *Laminação e forjamento dos aços*. São Paulo: ABM, 1964. p. 305-308.

O desenvolvimento humano sempre esteve ligado à capacidade de o Homem adaptar-se às mais diversas condições impostas pelo ambiente. Esta capacidade de adaptação tornou a espécie humana capaz de modificar o meio em que vive, extraindo e modificando os recursos da natureza, indispensáveis para a manutenção e crescimento da sociedade formada.

Após a revolução industrial, o papel da indústria do aço no desenvolvimento mundial tem sido cada vez mais importante, acompanhando as inovações tecnológicas das operações de produção de gusa líquido, pré-tratamento do gusa, refino secundário do aço e operações de conformação mecânica.

Uma das conseqüências deste aumento de produção de aço bruto em escala mundial é o crescente consumo de recursos naturais renováveis e não-renováveis (minérios, carvão, calcários, dolomitas, água, gases industriais, óleos e lubrificantes etc.), energia, sucatas e a geração de resíduos industriais, principalmente: escórias, lamas, carepas, emissão de materiais particulados e gás carbônico. A Tabela 11.1 apresenta o consumo de matérias-primas pela siderurgia brasileira (INSTITUTO BRASILEIRO DE SIDERURGIA, 2000).¹

Como retorno econômico-social, o complexo siderúrgico instalado garante empregos, receitas externas e arrecadação de impostos. Retornos que devem ser ponderados em uma análise mais holística deste setor metalúrgico. A Tabela 11.2 apresenta um resumo destes retornos sociais tendo por base o ano de 2003 (INSTITUTO BRASILEIRO DE SIDERURGIA, 2004).²

Siderurgia e Meio Ambiente

TABELA 11.1 - Consumo do setor siderúrgico brasileiro de algumas matérias-primas e insumos, utilizados na produção do aço; base: 1999

MATÉRIAS-PRIMAS / INSUMOS	VALOR	UNIDADE
Fontes de ferro e carbono		
Carvão mineral coqueificável	10.484	10 ³ t
Coque	8.038	10 ³ t
Carvão vegetal	4.273	10 ⁶ m ³
Minério de ferro	3.942	10 ³ t
Minério de manganês	143	10 ³ t
Pelotas	1.557	10 ³ t
Sínter	22.205,5	10 ³ t
Escorificantes		
Dolomita	1.506	10 ³ t
Calcário	4.784	10 ³ t
Cal	1.956	10 ³ t
Fontes de ferro e ferro-ligas		
Ferro-gusa	20.674	10 ³ t
Sucata de ferro e aço	7.296	10 ³ t
Ferro-ligas: (FeMn, FeSiMn, FeCr, FeSi, FeW, FeMo, ...)	335,9	10 ³ t
Ferro-esponja	397	10 ³ t
Energéticos e gases		
GLP	63,99	10 ³ t
Gás natural	409,8	10 ³ Nm ³
Oxigênio	2.182,8	10 ³ m ³
Energia elétrica	13.022	MWh
Óleo combustível	132,1	10 ³ t
Consumo específico – Fuel rate	396 (coke rate) + 120 (oil rate) = 516	Kg/t - Gusa
Produção (1999)		
Aço	25,00	10 ⁶ t

TABELA 11.2 - indicadores econômico-sociais - base: 2003

INDICADOR	UNIDADE – 10 ⁶	ESPECIFICAÇÃO
Número de empregados (diretos)	unidades	70.957
Número de empregados terceirizados	unidades	12.506
Número de empregos (indiretos)	unidades	284.000
Faturamento (receita bruta)	Bilhões (R\$)	40,1
Faturamento (exportações)	Bilhões (US\$)	3,86
- Segunda maior contribuição do segmento industrial	Bilhões (R\$)	3,002
Folha de pagamento	Bilhões (R\$)	5,524
Impostos pagos	Bilhões (R\$)	

11.1 Meio Ambiente: Conceitos Básicos, Biodiversidade e Qualidade de Vida

11.1.1 Meio ambiente

É o universo natural que, efetiva ou potencialmente, exerce influência sobre os seres vivos. A Lei 6.938/81 dispõe, em seu artigo 3º (Política Nacional de Meio Ambiente), ser o meio ambiente o conjunto de condições, leis, influências e interações de ordem física, química e biológica, que permite, abriga e rege a vida em todas as suas formas de vida (BRASIL, 2006).³

11.1.2 Biodiversidade

É a variedade de organismos vivos de todas as origens, compreendendo a totalidade de genes, espécies, ecossistemas e complexos ecológicos dentro de um enfoque sistêmico, incluem-se também as populações humanas e sua diversidade cultural.

A biodiversidade é a expressão que se refere à variedade de vida no Planeta, ou à propriedade dos sistemas vivos de serem distintos. A biodiversidade é uma das propriedades fundamentais da natureza e base das atividades agrícolas, pecuárias, pesqueiras e florestais e, também, a base para a indústria de biotecnologia.

ESPÉCIES	PAÍSES E QUANTIDADE NA DIVERSIDADE				
Mamíferos	Indonésia - 515	Brasil - 450	México - 449	Zaire - 409	China - 394
Aves	Colômbia - 1721	Peru - 1701	Brasil - 1622	Indonésia - 1519	Equador - 1447
Papelonídeos	Indonésia - 121	China - 101	Índia - 77	Brasil - 74	Burma - 66
Anfíbios	Brasil - 517	Colômbia - 410	Equador - 360	México - 283	Indonésia - 270
Répteis	México - 717	Austrália - 688	Indonésia - 600	Brasil - 467	Índia - 453

TABELA 11.3 - Países com maior diversidade de espécies (BRASIL, 2005).⁴

O Brasil conta com a flora mais diversa do mundo, com 55.000 espécies descritas (22% do total). Os produtos da biodiversidade brasileira respondem por 31% das exportações (BRASIL, 2005).⁴ Um excelente *site* sobre meio ambiente, biodiversidade e conservação pode ser consultado em Bryant (2005).⁵

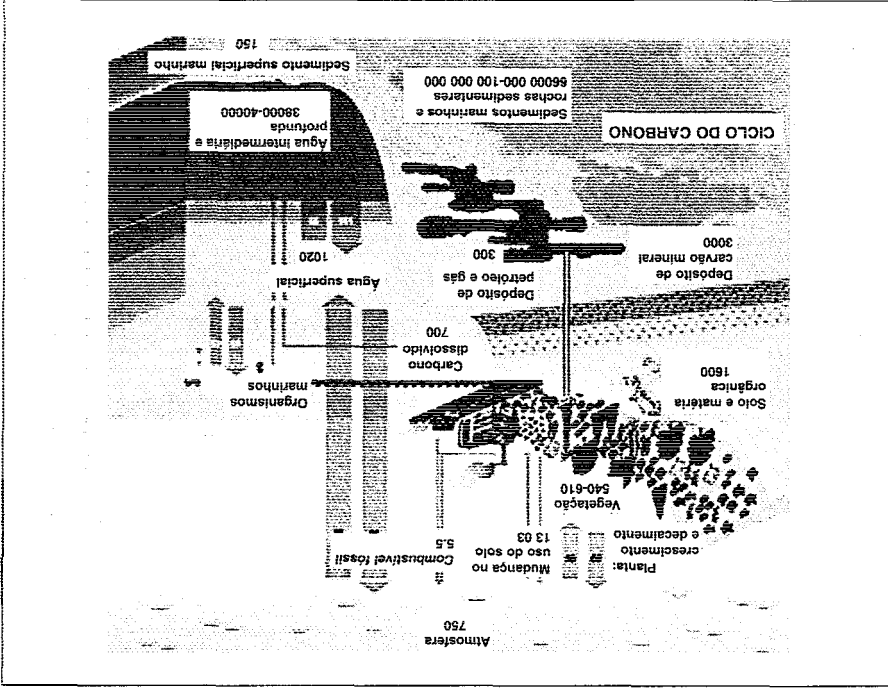
11.1.3 Ciclo biogeoquímico

É o intercâmbio de elementos químicos acompanhado de ganhos e perdas de energia, gerando um ciclo entre o meio biológico e o meio geofísico. A existência destes ciclos confere à biosfera um poder considerável de autorregulação.

11.1.4 Conceito de qualidade de vida

O termo qualidade de vida adquire significados distintos quando se refere ao homem como indivíduo, a uma comunidade urbana, a uma periferia urbana marginal ou a uma comunidade rural. Pode-se dizer, como uma primeira aproximação, que qualidade de vida se entende como sendo as condições ecológicas, ambientais a sociais que caracterizam o espaço ocupado pelo Homem. E, ao mesmo tempo, é um parâmetro do nível de satisfação e de atendimento às necessidades básicas individuais e/ou coletivas.

FIGURA 11.1 - Ciclo biogeoquímico do carbono - volumes de expansão em bilhões de toneladas de carbono (UNITED NATIONS ENVIRONMENTAL PROGRAMME, 2005), 6



Alguns enfoques estão baseados em fatores objetivos (indicadores) que estabeleçam a qualidade de vida em uma determinada área de estudo. Outros enfoques estão orientados para indicadores subjetivos ou pontuais de satisfação pessoal.

11.1.5 O trabalho da natureza para a sustentabilidade da vida na Terra

A economia global pode entrar em colapso sem o suporte de um solo fértil, sem água limpa, ar puro e um clima moderado. Os economistas ambientais acreditam que o número concreto, absolutamente necessário para a garantia dos recursos naturais e manutenção dos serviços vitais do ecossistema (Planeta Terra), é estimado em US\$ 33 trilhões /ano.

Alguns analistas acreditam que a valoração de tais serviços vitais de ecossistema são fundamentalmente inválidas, uma vez que estes serviços nunca poderão ser negociados em mercados abertos, onde os preços são determinados. Porém, quando se compara com o produto nacional bruto global, tem-se uma estimativa da importância dos serviços prestados pela natureza à vida no Planeta, uma vez que o PNB global é de aproximadamente US\$ 18 trilhões/ano.

11.2 Questões Globais

Os problemas ambientais que possuem interações de forma globalizada, afetando vastas regiões de nosso Planeta, são rotulados como "Questões Globais"; dentre os mais importantes podemos citar:

- Efeito estufa – Aquecimento global;
- Escassez de água potável;
- Precipitação de chuvas ácidas;
- Destruição da camada de ozônio; e
- Inverno nuclear.

Do ponto de vista dos processos metalúrgicos, os três primeiros são os mais importantes, e devem receber maior atenção.

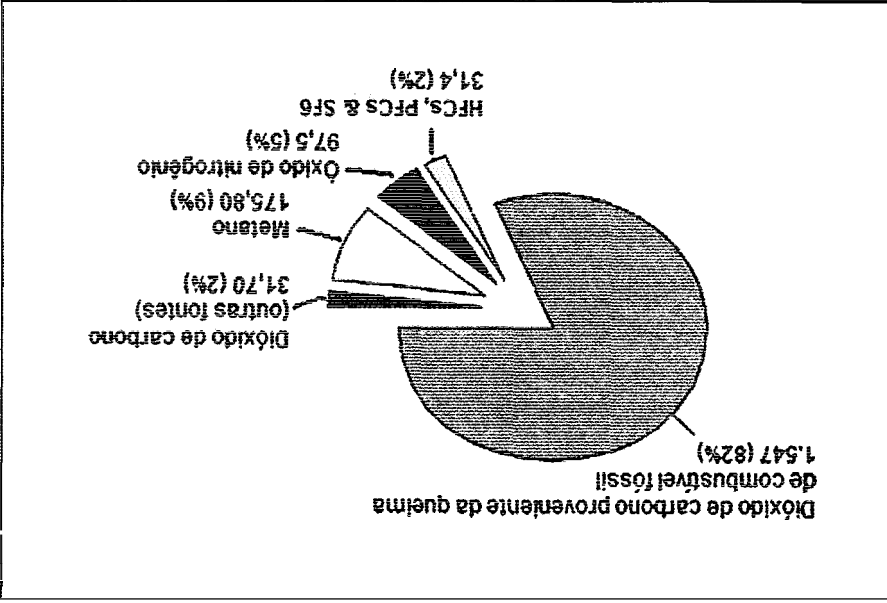
11.2.1 O efeito estufa

O efeito estufa está relacionado com a retenção de calor entre a superfície de Terra a troposfera. A consequência deste fenômeno é o aumento da temperatura média da superfície da Terra e a mudança nos padrões climáticos mundiais (alterações dos padrões de chuva e vento a elevação do nível do mar). E os principais gases que a alimentam são mostrados na Tabela 11.4, apresentada a seguir (HANSEN et al., 1998).⁷ A Figura 11.2 apresenta a distribuição da geração de gases de efeito estufa proveniente da geração de energia nos EUA.

TABELA 11.4 - Principais gases do efeito estufa

GAS	Concentração, antes do período da revolução industrial	Concentração em 1994	Taxa de elevação na atmosfera	Tempo de vida na atmosfera (anos)	Varia com o tipo de CFC's
CO ₂	280 ppm	358 ppm	1,5 ppm/ano	50 a 200	-
CH ₄	700 ppb	1.720 ppb	10 ppb/ano	12	-
NO _x	275 ppb	312 ppb	0,8 ppb/ano	120	Varia com o tipo de CFC's

FIGURA 11.2 - Distribuição de emissão de gases de efeito estufa decorrente de fontes antropogênicas nos EUA - em milhões de toneladas equivalente de carbono (UNITED STATES GOVERNMENT, 2005).⁸



Deve-se notar que outra contribuição importante na geração de gases de efeito estufa (25%) é proveniente do uso e manejo do solo, especialmente decorrente do desmatamento / queimadas praticadas na agricultura de países subdesenvolvidos ou em desenvolvimento. A Figura 11.3 apresenta a evolução comparativa entre as duas principais fontes de gases de efeito estufa: a queima de combustíveis fósseis (transporte, comércio, utilidades, indústria e residencial) e o manejo do solo.

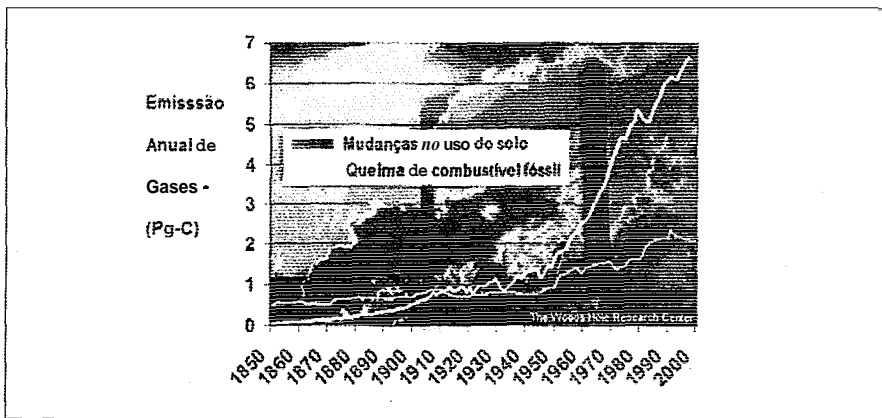
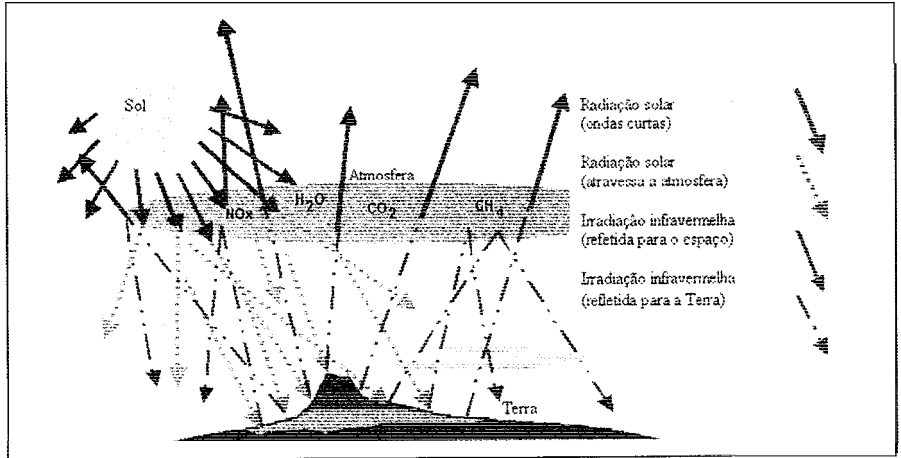


FIGURA 11.3 - Distribuição da geração de gases de efeito estufa - Unidade: (PgC = 10¹⁵) - Petagrama de carbono equivalente (WOODS HOLE RESEARCH CENTER, 2005).⁹

• **Dinâmica do processo:**

- A energia solar chega a Terra na forma de radiações de ondas curtas;
- Parte dela é refletida pela superfície da Terra e pela atmosfera;
- A maior parte dela passa diretamente pela atmosfera, para aquecer a superfície terrestre. Essa radiação é devolvida para o espaço na forma de irradiação infravermelha de ondas longas; e
- Parte dela é novamente refletida na troposfera e retorna para sobre-aquecer a superfície da Terra, como em uma estufa de vidro.

FIGURA 11.4 -
Representação
esquemática do efeito
estufa. (NATIONAL
AERONAUTICS AND
SPACE ADMINISTRATION,
2005; KIEHL E
TRENBERTH, 1997.)^{10,11}



- *Siderurgia e o efeito estufa*

Os processos siderúrgicos emitem grande quantidade de gás carbônico, principalmente quando a matriz energética utiliza coque, um recurso natural não renovável, ao invés de carvão vegetal. A utilização do carvão vegetal hoje no Brasil está mais restrita aos pequenos fabricantes de gusa (produção de 60 a 300 t./dia). Porém, a empresa V&M (Vallourec & Mannesmann) localizada em Minas Gerais é um exemplo na utilização de carvão vegetal, 100% renovável e auto-suficiente, proveniente de suas florestas de eucalipto (270 mil toneladas/ano). Estudo tem sido conduzido visando à flexibilização do uso conjugado de carvão vegetal e de coque no alto-forno número #2 da Acesita, uma vez que o alto-forno número #1 implantado em 1949 sempre operou com carvão vegetal (FURO do gusa..., 2005).¹²

No balanço global, a utilização de carvão vegetal, proveniente de biomassa, retira o CO₂ da atmosfera através do processo de fotossíntese. Em vista do planejamento de corte, as árvores são colhidas antes de sua fase de crescimento estar plenamente completada. Tais florestas estão constantemente em estado de crescimento, absorvendo maior quantidade de CO₂ comparativamente com o que é liberado durante seu processo de respiração.

Deve-se ressaltar que este ciclo somente é favorável ao processo de redução do efeito estufa quando o carvão vegetal é proveniente de áreas de reflorestamento; caso contrário, além de não contribuir para a captação do CO₂ da atmosfera, a utilização de carvão vegetal proveniente de áreas nativas

contribui para o desmatamento, degradação ambiental e elevação da quantidade liberada de gases de efeito estufa (GEE).

A utilização do carvão vegetal tem contribuído para acelerar a devastação de florestas nativas, sendo muitas vezes acompanhado da exploração do trabalho infantil. Estados como Minas Gerais, Pará, Maranhão e a região Centro-Oeste do Brasil têm sofrido com a devastação ambiental decorrente da expansão da fronteira agrícola e da instalação de produtores de gusa. Na década de 1970, a região do norte de Minas tinha 75% de sua extensão ocupada por mata nativa. Em 1988, mapeamentos de satélite registraram que só restava uma área de 30% de mata de cerrado (MACEDO, 2005).¹³ A Figura 11.5 apresenta carvoarias situadas nas regiões do norte do estado de Minas Gerais e no sul do Pará.

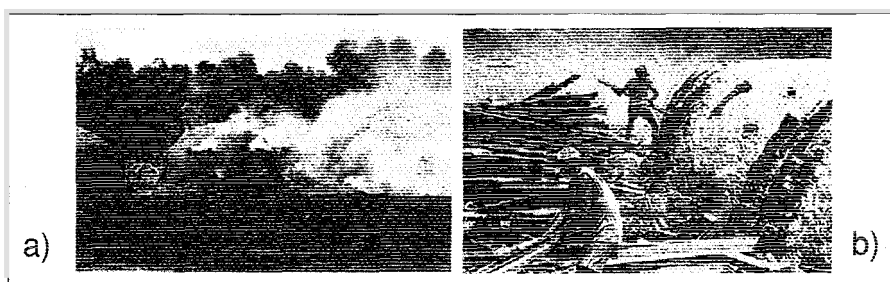


FIGURA 11.5. a) Carvoaria na região do norte de Minas Gerais (MACEDO, 2005);¹³ b) Carvoaria na região do sul do Pará (LICEU ALBERT SABIN, 2005).¹⁴

Do ponto de vista siderúrgico, a rota via coque metalúrgico libera 1,65 toneladas de CO_2 e fixa 1,536 t. de O_2 por tonelada de aço produzido, ao passo que a rota via carvão vegetal sequestra 16,336 toneladas de CO_2 e regenera 1,536 toneladas de O_2 por tonelada de aço produzido no ciclo completo, desde a plantação do eucalipto até a produção do aço. Em adição, a rota que utiliza o coque libera 7 kg de óxido de enxofre (SO_2), emissão esta praticamente ausente na rota a carvão vegetal (FERREIRA, 2005).¹⁵

As grandes usinas siderúrgicas têm trabalhado a fim de utilizar melhor os recursos energéticos, através de uma série de medidas, tais como (SHARMA, BASU e PRASAD, 2005; THE JAPAN IRON AND STEEL FEDERATION, 2005; EUROPA UNION, 2000; UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY, 1995):¹⁶⁻¹⁹

- Aproveitamento de finos de cal-vão (injeção pelas ventanciras dos altos-fornos > 180 kg/t gusa);

- Otimização do *coke rate*, carga metálica, umidade das matérias-primas e produtividade;
- Reaproveitamento do calor do processo de apagamento do coque e granulação de escória;
- Concentração da produção de aço nas instalações mais eficientes;
- Utilização de gás natural;
- Instalação de termoeletricas e turbo geradores acoplados às plantas integradas (gases de coqueria, alto-forno e aciaria);
- Reciclagem de sucatas e gestão das perdas térmicas; e
- Produção de metanol e éter dimetílico a partir dos gases dos altos-fornos.

Atualmente, a emissão de GYY está em torno de 500 kg-carbono/tonelada de gusa líquido. Sendo que, globalmente, a produção de aço emite em torno de 356 milhões de toneladas de dióxido de carbono (SHARMA, BASU e PRASAD, 2005).¹⁶ A maior parte do dióxido de carbono é gerado na área de redução, assim distribuído.

- Alto-forno: 480 kg de carbono/t. gusa líquido;
- Coqueria: 60 kg de carbono/t. gusa líquido;
- Sinterização: 45 kg de carbono/t. gusa líquido;
- Produção de eletricidade: 35 kg de carbono/t. gusa líquido; e
- Pelotização: 5 kg de carbono/t. gusa líquido.

A Tabela 11.5 apresenta dados da emissão de CO₂ de algumas usinas siderúrgicas (SHARMA, BASU e PRASAD, 2005).¹⁶

TABELA 11.5 - Emissão de CO₂ de algumas plantas siderúrgicas

PLANTA SIDERÚRGICA	PAÍS	ANO FISCAL	EMIÇÃO DE CO ₂ (kg/t. DE AÇO)
Hoogovens (atual Tata-Corus Steel)	Holanda	1998	1.200
Dofasco	Canadá	2000	1.300
Nippon Steel (Kimitsu)	Japão	1999-2000	1.845
Raah Steel	Finlândia	1998	1.900
Tata Steel	Índia	1999-2000	2.600
Vizag Steel	Índia	1999-2000	2.980

11.2.2 Chuvas ácidas

A chuva ácida passou a ser encarada como um problema ambiental maior a partir do final da década de 1960 e início da de 1970. Porém, o termo

já havia sido proposto em 1858 para designar a elevação da acidez decorrente da poluição industrial (EUROPEAN ENVIRONMENTAL AGENCY, 2005).²⁰ A chuva ácida é caracterizada pela diminuição do pH (potencial de Hidrogênio, faixa 4,5~2,4), causando o desfolhamento de árvores, intensificando os processos de corrosão, aumento da acidez do solo, das águas, mortalidade de espécies animais e vegetais.

A chuva ácida é primariamente o resultado de descargas excessivas de dióxido de enxofre (SO_2) e óxidos de nitrogênio ($\text{NO}_x = \text{NO} + \text{NO}_2$) na atmosfera. Após a emissão destes óxidos, eles se transformam em ácidos extremamente fortes: ácido sulfúrico e ácido nítrico, retornando para a Terra na forma de chuva, neve, *fog* ou deposição seca.

Um aspecto importante da poluição atmosférica é seu dinamismo: os processos de dispersão e precipitação de óxidos, gases e de materiais particulados podem se estender por longas distâncias das fontes poluidoras, acarretando problemas em localidades e/ou países diferentes daqueles onde a poluição primária foi gerada. A Figura 11.0, apresentada a seguir, mostra o mapa global, indicando as áreas onde o problema da chuva ácida é mais incidente decorrente do ciclo de formação e transporte dos óxidos de nitrogênio e enxofre.

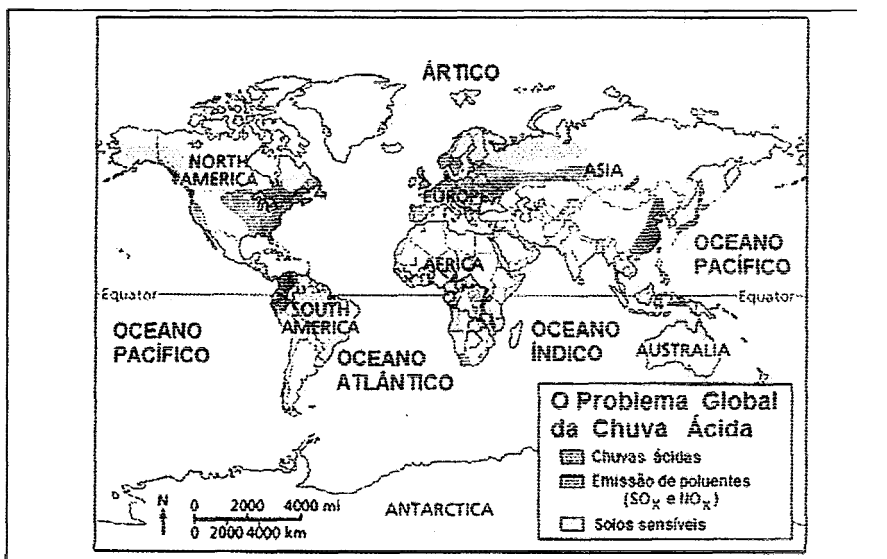


FIGURA 11.6 -
Distribuição da
precipitação de chuvas
ácidas no mundo
(MEHELIC, 1999).²¹

11.2.3 Poluição hídrica e o ciclo da água

A substância mais abundante na biosfera é a água. Os oceanos, as calotas polares, as aglomerações de neve, os lagos, os rios, o solo e a atmosfera contêm 1,4 milhões de quilômetros cúbicos de água, sendo que 97,2% deste total se encontram nos oceanos. Dos 2,8% restantes, 3/4 estão na forma de gelo (REBOUCAS, 2004).²²

Os grandes problemas referentes ao uso da água doum são sua baixa disponibilidade, sua distribuição não uniforme a seu mau uso. Estima-se que, a cada década, 6% da água doce são perdidos. O ciclo biogeoquímico da água, mais conhecido com o ciclo hidrológico (Figura 11.7), representa o percurso da água dasps e atmosfera, passando por várias fases, até retornar de novo à

atmosfera, gssas fases englobam, basicamente:

- Precipitação;
- Escamento superficial;
- Infiltração-percolação;
- Escamento subterrâneo;
- Transpiração; a
- Evaporação.

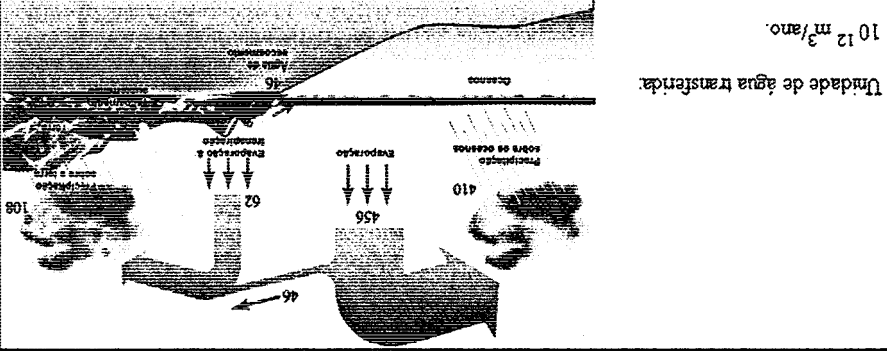


FIGURA 11.7 - Representação esquemática do ciclo hidrológico (MEHELCIC, 1999).²¹

- *A água e o crescimento populacional* - A disponibilidade de água doce é limitada, como consequência da explosão demográfica, do rápido aumento das necessidades de sua utilização na agricultura, na indústria moderna e para abastecimento populacional. É indispensável preservá-la, conservá-la e controlá-la. Estudos indicam que a Terra tem capacidade de suportar entre 12 e 15 bilhões de seres humanos; esta população deverá ser atingida na metade deste século e se estabilizar. Nos últimos 20 anos, o consumo de água foi multiplicado por seis, e para os próximos 20 anos o índice de utilização da água disponível deve alcançar 70% (RIBEIRO, CASTRO e TAVARES, 2005).²³
- *A água e a siderurgia* - A disponibilidade de água sempre foi um fator fundamental para o desenvolvimento da siderurgia, primariamente como fonte de energia hidráulica para movimentação das engrenagens, motores, sopradores de ar e dispositivos mecânicos de forjaria.

Atualmente, a utilização da energia hidráulica foi substituída pela energia elétrica gerada internamente ou adquirida do mercado de energia. Porém, a água ainda possui papel fundamental como fluido de refrigeração e transporte de energia, em sistemas de controle ambiental e tratamento superficial do aço em diversos equipamentos siderúrgicos, como: altos-fornos (*copper cooling staves*, canais refrigerados, granulação de escória e sistema de lavagem de gases), coqueria (sistema de apagamento a úmido soque); pátios de matérias-primas (drenagem superficial e controle ambiental); conversores a oxigênio (lança de oxigênio, sistemas de refrigeração das carcaças metálicas, sistemas de Lavagem de gases); lingotamento contínuo (molde e sistema de resfriamento secundário); laminações a quente e a frio (laminadores e decapagem).

A qualidade da água utilizada na siderurgia pode ser dividida em três tipos básicos: alta qualidade ou potável; água de uso geral (resfriamento); e água de baixa qualidade. A Tabela 11.6 apresenta de forma simplificada o balanço de água para a produção aço em uma usina integrada a coque (Base: 4 M t/ano) (INTERNATIONAL IRON AND STEEL INSTITUTE, 2002).²⁴

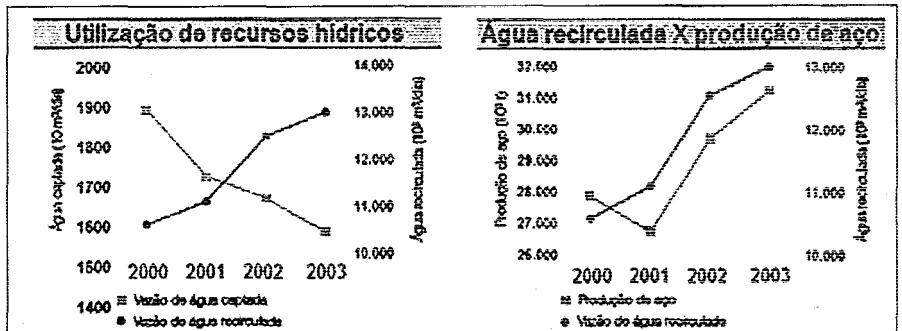
Siderurgia e Meio Ambiente

TABELA 11.6. Captação de água utilizada para a produção de 4 milhões de toneladas de aço bruto em usina integrada a coque

USO DA ÁGUA	Qualidade	CAPTAÇÃO DE ÁGUA PRIMEIRA CAPTAÇÃO		RECIRCULAÇÃO INTENSIVA	
		m ³ /minuto	%	m ³ /minuto	%
Resfriamento (indireto)	Geral	675	70,7	7,4	32
Resfriamento (direto)	Geral	265	27,8	6,2	26,3
Água de processo	Baixa	7,7	0,8	5,1	22,1
Água potável	Alta	1,5	1,5	1,5	6,5
Total		954	100	23,1	100

Um grande esforço do setor siderúrgico tem sido realizado visando elevar a taxa de recirculação da água (reposição + recirculação). Estima-se que 5% da água utilizada nos processos siderúrgicos sejam perdidos por evaporação. Atualmente, a taxa média de recirculação da água na indústria siderúrgica está acima de 89% e o consumo médio situa-se na faixa de 200 m³/ton de água por tonelada de aço produzido. A Figura 11.8 apresenta a situação do uso da água no setor siderúrgico brasileiro entre 2000 e 2003.

FIGURA 11.8 - Redução da vazão de água captada pelo setor siderúrgico brasileiro no período de 2000 a 2003 (INSTITUTO BRASILEIRO DE SIDERURGIA, 2004).²



11.2.4 Poluição do solo e resíduos industriais

O solo é a formação natural que se desenvolve na porção superficial da crosta terrestre. Ele é resultado essencialmente das interações entre os processos físicos, químicos e biológicos sobre as rochas superficiais da crosta terrestre. O solo apresenta a característica de permitir o desenvolvimento vegetal na superfície da Terra, assim, seu estudo é fundamental para a agricultura e fixação da vida.

Os principais danos decorrente de sua utilização são a erosão e a deposição indiscriminada de resíduos industriais. A infiltração de líquidos gerados na decomposição destes resíduos e/ou a subsequente lixiviação destes, cãrreando substâncias nocivas parã as camadas mais profundas e para os aquíferos subterrâneos, podem causar a contaminação de importantes mananciais de água.

A presença de metais nos resíduos, quer na forma de despejos líquidos industriais, quer na forma de lodos, também pode inibir a reposição da vegetação. Esta situação se torna mais grave, quando tais contaminações são efetuadas em áreas agrícolas, já que alguns metais se mostram fitotóxicos e, dependendo do volume aplicado e do nível de metais resultante no solo, pode ocorrer redução da produtividade.

Certos metais acumulam-se em partes comestíveis de plantas tornando estes alimentos impróprios para o consumo humano. Além disso, a percolação do resíduo até c meio, torna o ecossistema vulnerável aos efeitos de bioconcentração (absorção direta de um componente químico no organismo) e bioacumulação (acumulação de espécie química, por exposição à água ou ao alimento contaminado), potencializando ainda mais os efeitos nocivos dos resíduos à saúde humana.

11.2.5 Energia e desenvolvimento

A utilização das fonte energéticas em escala global varia de país para país de acordo com a disponibilidade e distribuição dos recursos naturais. Atualmente, a distribuição aproximada dá matriz energética mundial está dividida em (UNITED NATIONS ENVIRONMENTAL PROGRAMME, 2005):²⁵

- Petróleo: 35%;
- Carvão mineral: **23%**;
- Gás natural: 21%;
- Biomassa: 10%;
- Energia nuclear: 5%;
- Energia hidráulica: 2%;e
- Outras formas (solar, eóica, geotérmica, oceanns etc.): ■ 3%.

A conversão dos recursos energéticos em energia útil gera várias externalidades, que devem ser analisadas e minimizadas, otimizando-se os recursos e aumentando o rendimento desta conversão, agredindo o mínimo possível o meio ambiente. As principais externalidades geradas na produção e consumo de energia foram resumidas na Tabela 11.7 (BRYANT, 2005; UNITED STATES GOVERNMENT, 2005).^{5,26}

TABELA 11.7 -
Externalidades da
produção e do consumo
de energia no mundo

TIPO DE FONTE ENERGÉTICA	AMBIENTAIS	TECNOLÓGICOS	CUSTO kWh/US\$
Energia hidráulica	Remoção do biota Inutilização de áreas para formação do reservatório • Deposição de lodo (grandes reservatórios)	- Perda de rendimento por transmissão	5-10
Carvão	Efeito estufa Chuvas ácidas • Fonte não-renovável		5-6
Petróleo	Efeito estufa Chuvas ácidas • Fonte não-renovável		Variável
Gás natural	- Efeito estufa • Fonte não-renovável		4-5
Nuclear	Mineração Deposição dos resíduos de fissão nuclear • Fonte não-renovável	Reuso dos resíduos de fissão - Custo	10-21
Biomassa	Devastação vegetal • Efeito estufa	- Baixo rendimento	
Eólica	• Paisagístico	Distância; - Baixa potência	5-7
Solar	Paisagístico	Distância; - Custo	8-10

O setor siderúrgico é um grande consumidor de energia, seja em sua forma mais bruta, pela utilização direta do carvão vegetal e do coque, seja pela utilização da eletricidade, para a fusão e aquecimento do aço nos fornos elétricos, fornos-panels, fornos de aquecimento de placas ou produção de gases industriais (oxigênio e argônio) etc. As Figuras 11.9 e 11.10 apresentam, respectivamente, a distribuição do tipo de fonte energética e o balanço de energia no processo siderúrgico.

Dados do Instituto Brasileiro de Siderurgia indicam que dos quase 15,0 milhões de MWh consumidos anualmente pelo parque siderúrgico brasileiro em 2003, 28% deste total foram gerados internamente através do reaproveitamento energético proveniente dos gases gerados durante o ciclo produtivo.

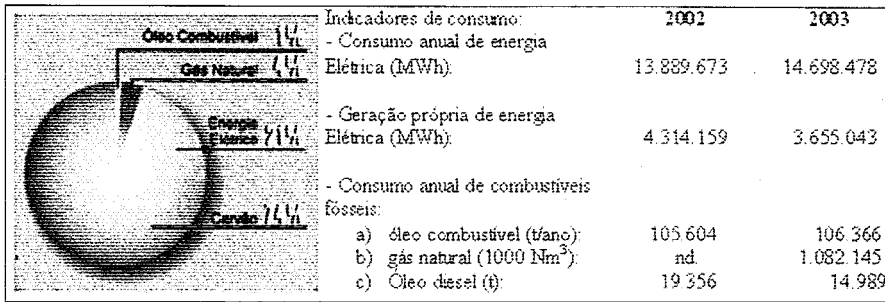


FIGURA 11.9 – Distribuição das fontes energéticas utilizadas no processo siderúrgico (INSTITUTO BRASILEIRO DE SIDERURGIA, 2004).²

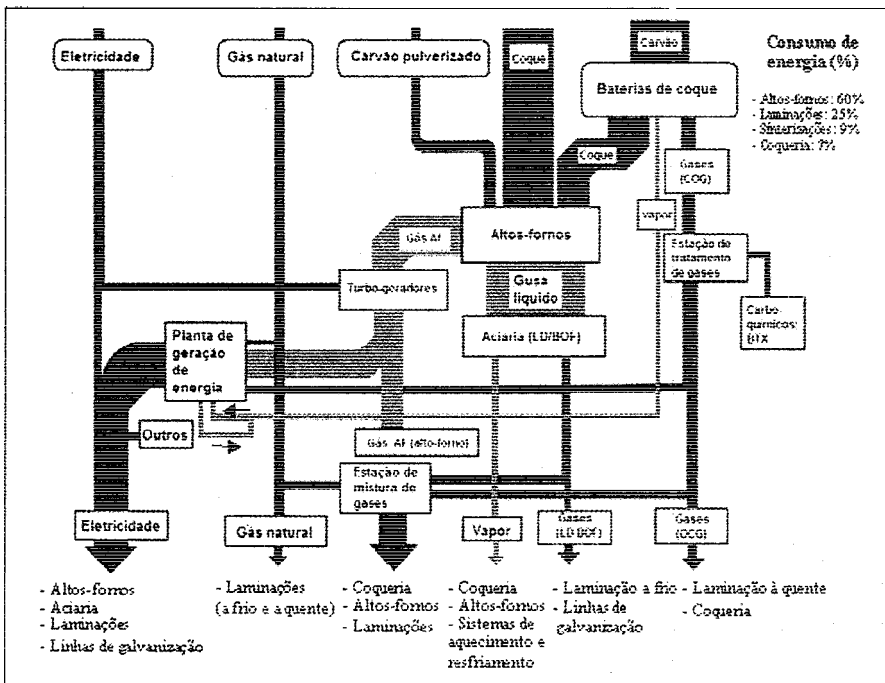


FIGURA 11.10 – Exemplos de entradas e saídas de fluxos de energia em uma moderna usina integrada a coque com sistemas de utilização de energia (EUROPA UNION, 2000).¹⁸

11.3 Gestão Ambiental e Desenvolvimento Sustentável

Ao longo da história, o Homem sempre utilizou os recursos naturais do Planeta e gerou resíduos com baixíssimo nível de preocupação: os recursos eram abundantes e a natureza absorvia os despejos realizados, já que o enfoque era “diluir e dispersar”. Com o passar do tempo, um novo posicionamento em relação às questões ambientais foi gradualmente se estabelecendo, passando a

sociedade a pensar e atuar de forma a, cada vez mais, buscar uma melhor compatibilidade entre desenvolvimento, utilização dos recursos naturais e meio ambiente.

11.3.1 Cronologia da conscientização ambiental

- Década de 60:
 - Divulgação pelo Clube de Roma: Os limites para o crescimento;
 - Raquel Carson publica: *Silent Spring*;
 - Início da descontaminação do rio Tamisa na Inglaterra;
 - Regulamentação mínima, foco limitado à água e ao reconhecimento mínimo dos resíduos perigosos, ausência total de responsabilidade corporativa e interferências no meio ambiente livres ou quase livres
- Década de 70:
 - Contaminação da baía de Minamata/Japão – Empresa Chisso (mercúrio);
 - 1972, Conferência da ONU para o Meio Ambiente em Estocolmo;
 - Crise do petróleo / OPEP;
 - Surgimento do conceito de "Desenvolvimento Sustentável";
 - Surgimento na Alemanha do selo *Blauer Engel* (1978) e Holanda (1972);
 - Acidente em Seveso / Itália – Indústria ICMESA (SCDD);
 - Incidente em Love Canal/EUA – Niagara Falls;
 - Evidenciado o problema da destruição da camada de Ozônio; e
 - Atitude reativa, cumprimento das normas e controle end *pipe*.
- Década de 80:
 - Disseminação do conceito de Desenvolvimento Sustentável, Relatório Brundtland, sob o título: *Nosso futuro comum*;
 - Convenção da Basileia (1987);
 - Acidente em Bhopal / Índia – Coligada da Union Carbide;
 - Acidente em Tchernobyl / Antiga URSS (hoje Ucrânia); e
 - Início da internalização de custos ambientais, regulamentação de multas por danos ambientais, formalismo da realização de EU-RIMA e audiências públicas.
- Década de 90:
 - Conferência da ONU – Rio 92;

- BS 7750 (British Standard) e ISO 14000;
- Atitude pró-ativa, foco na prevenção, adoção do Ciclo de Vida – LCA e inventário ambiental, integração do meio ambiente em todas as atividades e contabilidade dos custos ambientais internos/externos.
- Tendências *Atuais*:
 - Desempenho corporativa além das normas;
 - Maior conscientização do consumidor;
 - Ciclo de vida & Mecanismos de Desenvolvimento Limpo (MEL);
 - Função: meio ambiente, saúde e segurança.

11.3.2 Desenvolvimento sustentável

C vago conceito de “desenvolvimento sustentável”, aliado à sua crescente importância em políticas nacionais, internacionais e corporativas, levou a uma grande batalha política para influenciar nosso futuro, atrelando interpretações ao conceito. Isto resultou numa ampla variedade de definições e interpretações que são levadas em direção a prerrogativas institucionais e de grupos, ao invés de compor a essência do conceito, inerente às tradicionais crenças e práticas.

Em 1987, a *World Commission on Environment and Development*, patrocinada pela ONU, publicou o documento: *Nosso Futuro Comum*, cuja definição de desenvolvimento sustentável, embora considerada vaga e ambígua, foi altamente instrumental para se desenvolver uma visão global com respeito ao futuro do planeta. Neste mesmo ano, a Comissão Mundial de Meio Ambiente e Desenvolvimento emitiu um relatório com os princípios de desenvolvimento sustentável, definido como: "O Desenvolvimento que busca suprir as necessidades do presente, sem comprometer a futura habilidade das futuras gerações de atender às suas próprias demandas". Porém, deve-se lembrar que não existe crescimento sustentável, pois o termo crescimento vai contra a própria definição de sustentabilidade.

11.3.3 Gestão ambiental

A gestão ambiental pode ser definida como um conjunto de ações encaminhadas à obtenção da máxima racionalidade no processo de decisão,

relativa à conservação, defesa, proteção e melhoria do meio ambiente, baseando-se em uma ação multidisciplinar coordenada e na participação dos cidadãos.

Os princípios básicos da gestão ambiental são:

- Otimização do uso dos recursos naturais renováveis ou não, ambientais, econômicos, financeiros e humanos;
- Previsão e prevenção dos impactos ambientais;
- Controle da capacidade de absorção dos impactos ambientais, ou seja, controle da resiliência do meio; e
- Ordenamento territorial.

A decisão de se implantar ou não um sistema de gerenciamento ambiental deve ser feita analisando-se se este sistema vai atender às "necessidades dos clientes" e se este sistema irá colaborar para o atendimento da legislação. Se a resposta a um destes questionamentos for positiva, a implantação deverá ser feita, cumprindo-se, basicamente, três grandes conjuntos de atividades:

- Análise da situação atual da empresa;
- Estabelecimento de objetivos e metas; e
- Estabelecimento de métodos.

11.3.4 Série ISO 14.000

A primeira das normas da série ISO 14.000, que fixa as especificações para a certificação e avaliação de um sistema de gestão ambiental de uma organização é a norma ISO 14.001. Esta norma foi fortemente inspirada na norma inglesa BS 7.750, e foi editada em caráter experimental em **1992** por dois anos, e teve sua edição definitiva publicada em **1994**.

NÚMERO ISO	TÍTULO
14000	Sistema de Gestão Ambiental – Diretrizes Gerais
14001	Sistema de Gestão Ambiental – Especificação e diretrizes para uso
14004	Sistemas de Gestão Ambiental – Diretrizes gerais sobre princípios, sistemas e técnicas de apoio
14010	Diretrizes para Auditoria Ambiental – Princípios Gerais
14011	Diretrizes para Auditoria Ambiental – Procedimentos de Auditoria – Auditoria de Sistemas de Gestão Ambiental
14012	Diretrizes para Auditoria Ambiental – Critérios de Qualificação para Auditores Ambientais
14020	Rotulagem Ambiental – Princípios básicos
14021	Rotulagem Ambiental – Definições para Aplicação Específica e Auto-declarações
14022	Rotulagem Ambiental – Simbologia para os Rótulos
14024	Rotulagem Ambiental – Procedimentos e Critérios para Certificação
14031	Avaliação do Desempenho Ambiental
14032	Avaliação do Desempenho Ambiental de Sistemas Operacionais
14040	Análise do Ciclo de Vida – Princípios Gerais
14041	Análise do Ciclo de Vida - Inventário
14042	Análise do Ciclo de Vida – Análise dos Impactos
14043	Análise do Ciclo de Vida – Usos e Aplicações
14050	Gestão Ambiental – Termos e Definições / Vocabulário
ISO Guide 64	Guia de Inclusão dos Aspectos Ambientais nas Normas para Produto

TABELA 11.8 - Normas Prevista para a Série ISO 14.000 (MDURA, 1998).²⁷

11.3.5 Análise de Ciclo de Vida – LCA

É uma ferramenta de gestão ambiental e auxílio à tomada de decisão, que visa avaliar os encargos ambientais associados com um produto, processo ou atividade, através da identificação e quantificação da energia, materiais utilizados e resíduos lançados ao ambiente, além da identificação de oportunidades de melhoria ambiental.

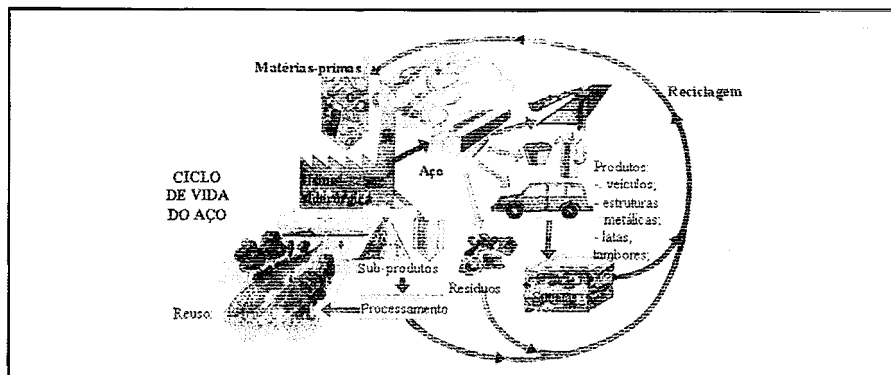


FIGURA 11.11 - Ciclo de vida do aço (SVENSKA MINERAL, 2006).²⁸

- **Vantagens do LCA:**
 - Guiar o desenvolvimento de projetos;
 - Ferramenta de auxílio em compras;
 - Informação ambiental aos consumidores;
 - Desenvolvimento de critérios de rotulagem ambiental;
 - Base de critério e comparação do peso global que o produto terá sobre o meio ambiente;
 - Para defender o produto diante da concorrência;
 - Avaliar as demandas de recursos naturais e impactos ambientais associados com um produto, função ou serviço (do berço ao túmulo);
 - Possibilita a comparação relativa entre opções de melhoramento de projetos e produtos;
 - Redução de custos e Eco-eficiência; e
 - Metodologia padronizada – ISO 14.040.

O LCA, pode ser dividido em quatro etapas:

- Inventário (medida dos aspectos ambientais em uma análise do ciclo de vida);
- A avaliação do impacto ambiental (avaliação, classificação etc.);
- A valoração dos impactos; e
- Reprojeto de melhorias (por unidade funcional e não simplesmente por produto).

Um completo estudo sobre a análise do ciclo de vida do aço pode ser obtido através do International Iron and Steel Institute (<http://www.worldsteel.org>).

11.3.6 Tecnologias limpas

A aplicação de tecnologias limpas visa prevenir os problemas da poluição, ao invés de oferecer uma solução do tipo *end of pipe*, através do:

- Reuso, recuperação ou reciclagem em processos;
- Mudanças em processos;
- Substituição de insumos; e
- Alteração do produto final.

- Os problemas (*argumentações*) para a não utilização de tecnologias limpas:
 - Os tratamentos do tipo “fim de linha” são mais óbvios do se instalar;
 - A ênfase atual ainda está em padrões de emissão;
 - O meio ambiente não é prioridade para as empresas sob pressão financeira e os benefícios nem sempre aparecem no balanço; e
 - Falta de conhecimento de novas tecnologias.

- *As vantagens de utilizar tecnologias limpas:*
 - Uma vez criado, o resíduo não pode ser destruído, somente alterada sua forma físico-química ou concentração;
 - Bom senso empresarial: "Reduzir resíduos poupa tratamento, disposição e insumos";
 - Reduzir resíduos diminui o passivo ambiental sobre o empreendimento;
 - Cada vez mais, existem menos locais para a deposição dos resíduos;
 - Restrições de envio trans-fronteiriço de resíduos;
 - Severas restrições 2 incinerações;
 - Cumprimento da legislação; e
 - Poluir custa caro.

11.4 A Siderurgia em Foco

A produção do aço em usinas siderúrgicas, integradas ou não, é acompanhada de uma série de operações inter-relacionadas, partindo de matérias-primas naturais ou sucatas de aço e indo até a produção de produtos semi-acabados, como: placas, chapas, perfis, tarugos ou bobinas de aço acabadas a quente ou a frio, revestidas ou não.

Em uma usina integrada a coque, as principais operações são:

- Produção de coque (coqueria);
- Produção do sinter (sinterizações);
- Produção do gusa (altos-fornos);
- Pré-tratamento do gusa (dessulfuração, dessiliciação e/ou desfosforação);
- Produção do aço (aciaria) – refino primário, secundário e lingotamento;
- Conformação de produtos semi-acabados (laminações) – a quente e a frio; e
- Serviços auxiliares (fábrica de oxigênio, manutenção industrial, fornos de

calcinação, manuseio de matérias-primas, produção de energia, tratamento de água e de resíduos industriais).

Todas estas operações unitárias estão atreladas a processos físico-químicos, que basicamente visam a transformação do minério de ferro em aço. Do ponto de vista ambiental, cada operação dentro de uma usina siderúrgica esta associada ao consumo de matérias-primas, insumos e energia, gerando por sua vez, resíduos sólidos, líquidos e gasosos. A Tabela 11.9 apresenta os aspectos ambientais e seus processos metalúrgicos (UNITED STATES, 1995; LENZ E SILVA, 2004).^{19,29,30}

TABELA 11 9 - Resíduos sólidos e impactos ambientais – produção do aço

UNIDADE - PLANTA	PRODUTOS	RESÍDUOS (SÓLIDOS/LÍQUIDO E/OU GASOSOS)
Coqueria	Coque.	Gases(NO_x / VOC's*), dioxinas**, metano, benzeno, fenóis, compostos alifáticos, amônia, naftalenos.
Sinterizações	Sínter.	Material particulado, dioxinas, gases (CO / CO_2 / SO_2 / NO_x / VOC's).
Altos-fornos	Gusa líquido.	Fenóis, cianetos, amônia, sulfetos, gases (CO / CO_2 / NO_x), refratários, escórias.
Dessulfurações	Gusa dessulfurado.	Material particulado, escórias.
Calcinações	Cales, dolomitas calcinadas.	Material particulado, CO_2
Aciaria LD	Aço líquido.	Material particulado, Metais (Zn), gases (CO / CO_2 / VOC's), metais solúveis, Material sedimentável, escórias, refratários.
Refino primário		
Refino secundário	Aço líquido (tratado).	Gases (CO / CO_2), material particulado, sucata, escórias, refratários.
Lingotamento contínuo	Placas/tarugos ou lingotes de aço.	Sucata, material particulado, sólidos suspensos, óleos.
Laminações	Chapas, bobinas, tiras.	Óleos, soluções ácidas, sucatas, gases (CO / CO_2 / SO_2 / NO_x / VOC's) material sedimentável, metais solúveis.

CO – monóxido de carbono; CO_2 – gás carbônico; SO_2 – óxidos de enxofre (SO_2 e SO_3); NO_x – óxidos de nitrogênio (NO_2 e NO_3); VOC's – compostos orgânicos voláteis; Dioxinas: família extensa de compostos organo-ciclo-benzo-clorados como o 2,3,7,8-p-TCDD (ou 2,3,7,8,tetraclorodibenzo-para-dioxina).

11.4.2 Aço, um produto ecológico?

Esta é uma questão que em princípio pode parecer até absurda, pois a produção do aço, além de consumir recursos naturais não renováveis (bens minerais), necessita de uma grande quantidade de energia (carvão / eletricidade), consome recursos renováveis (ar, oxigênio, água etc.), gera uma quantidade apreciável de resíduos industriais (escórias, lamas, gases, pós, carepas e sucatas). Mas, quando se analisa o ciclo de vida do produto aço como um todo, passa-se a se ter uma nova situação, pois: o aço, além de ser 100 % reciclável, de baixo custo e elevada versatilidade, tem incorporado em sua produção novas tecnologias possibilitando a mitigação dos impactos negativos decorrentes de seu processo de produção.

Os produtos feitos em aço, a cada dia, tem se tornado mais resistentes (maior durabilidade), com menor peso específico (menor demanda de material para uma dada aplicação) e mais recicláveis. Causando impactos ambientais positivos, pela diminuição do consumo de energia, diminuição da geração de gases de efeito estufa, melhoria da segurança e aumento da eficiência elétrica dos motores etc.

11.5 Resíduos Siderúrgicos – Geração e Tratamento: A Busca de Alternativas

11.5.1 Resíduos siderúrgicos e reciclagem

Durante o processo de produção e transformação do aço tem-se a geração de diversos tipos e em grande quantidade de resíduos sólidos. Estes resíduos podem ser classificados em três grupos; os ditos recicláveis contendo ferro, os resíduos carboquímicos e as escórias. Entre os recicláveis contendo ferro estão: as poeiras e lamas de alto-forno, de aciaria e da sinterização, as lamas das unidades de tratamento e recirculação das águas das laminações e as carepas. As escórias são basicamente provenientes do alto-forno e da aciaria (refino primário e secundário do aço), já os resíduos carboquímicos são gerados pelas etapas de produção e manuseio do coque.

Relatório do IBS mostrou que no ano de 2003 foram gerados pela indústria siderúrgica brasileira aproximadamente 13.500.000 toneladas de lamas, pós e agregados siderúrgicos; onde:

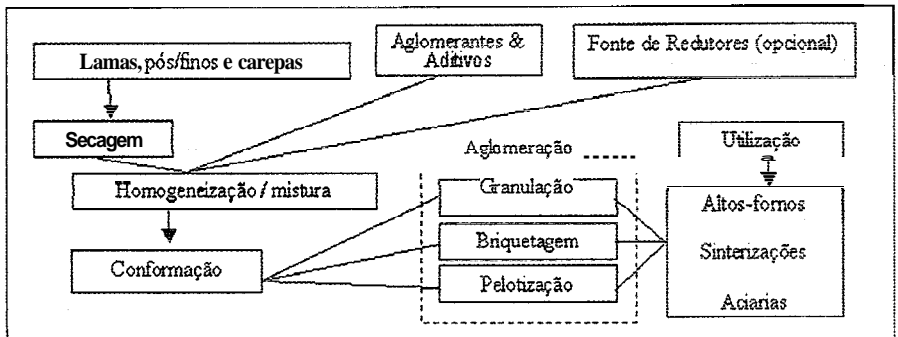
- Pós: 9,65% (1.309.684 t/ano);
- Lamas: 10,98% (1.488.345 t/ano); e
- Agregados siderúrgicos: 79,37% (10.761.254t/ano).

Tais resíduos receberam as seguintes destinações:

- Aproximadamente 35% das lamas e dos pós foram comercializados;
- Até 25% foram destinados às áreas de acumulação; e
- Pós, finos e carepas contendo ferro retornaram à sinterização como substitutos de minérios, calcários e fundentes.

Embora a reciclagem da maior parte (80%) dos resíduos sólidos ricos em ferro diretamente nas unidades de sinterização seja uma prática siderúrgica comum, todavia, devido principalmente às características granulométricas destes materiais (alta porcentagem de particulados com granulometria inferior a 0,150 mm), dificuldades de manuseio, heterogeneidades como variações de composição química e de umidade, podem diminuir a permeabilidade da carga e conseqüente produtividade das sinterizações. Outro ponto importante é o controle dos teores de álcalis e de zinco contidos, especialmente quando a rota de reciclagem é direcionada para a área de redução.

FIGURA 11.12 - Rotas mais usuais para a reciclagem dos resíduos siderúrgicos contendo ferro (lamas, pós e carepas) (LENZ E SILVA, 2004).³⁰



A reciclagem por meio de granulação/pelotização/briquetagem destes resíduos é uma alternativa atraente, pois:

- Flexibiliza a reciclagem conjunta de quase totalidade de resíduos sólidos gerados durante a produção e transformação do aço;

- Pode-se utilizar como redutor coque ou seus subprodutos;
- O produto pode ser um ferro esponja, ou metal líquido;
- Diminui a demanda de matérias-primas e insumos externos;
- Promove um ganho econômico e ambiental (internalização dos impactos ambientais);
- Por simples desintegração ou eventual moagem e/ou classificação se obtém uma matéria-prima apta a pelletização / granulação / briquetagem; e
- Promove a busca de um desenvolvimento mais sustentável do negócio.

41.5.2 Escórias siderúrgicas: alto-fornos e aciarias

O balanço da geração de resíduos na produção de aço pode ser visualizado a seguir (Figura 11.13).

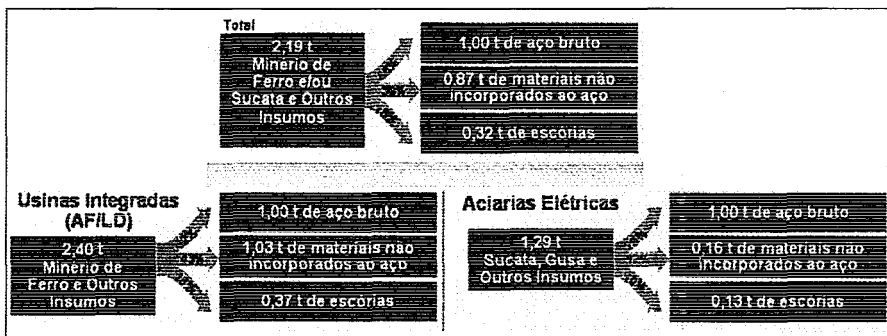


FIGURA 11.13 - Balanço de massa para a produção de aço em usinas integradas e não-integradas (LITTLE, 1999).³¹

As escórias, de alto-forno e de aciaria, são uma das maiores classes de resíduos gerados em usinas siderúrgicas, porém já possuem uma larga utilização em outros processos industriais, ou emprego *in natura*. Seu emprego não é maior devido à competição com produtos naturais (calcário), alto custo do frete, necessidade de regulamentação, normalização. Do ponto de vista tecnológico, os aspectos envolvidos na sua aplicação são a granulação (escórias de altos-fornos) e o controle da expansão (escórias de aciaria).

Para cada tonelada de gusa produzido, em torno de 600 a 708 kg de escória de alto-forno são gerados, e para cada tonelada de aço líquido processado, 100 a 150 kg de escória de aciaria são formados. A seguir, são apresentadas algumas dos principais usos das escórias siderúrgicas (SOBREMÉTAL, 2000).³²

TABELA 11.10 -
Principais empregos,
destinações e aplicações
das escórias
siderúrgicas.

TIPO DE ESCÓRIA / APLICAÇÃO	ESCÓRIAS DE ACIARIA A OXIGÊNIO PRINCIPAL LIMITAÇÃO TECNOLÓGICA DE USO: EXPANSÃO VOLUMÉTRICA	ESCÓRIAS DE ALTO-FORNO PRINCIPAL LIMITAÇÃO TECNOLÓGICA DE USO: NECESSIDADE DE GRANULAÇÃO
Aplicações	Pavimentação, lastro ferroviário, artefatos de concreto (blocos, tubos, guias, blocos intertravados etc.), contenção de encostas (<i>Rip-rap</i>), gabiões, drenagens, fertilizantes, corretivos de solo.	Matéria-prima para a produção industrial (cimento, lá mineral, indústria de vidro), corretivo de solo, asfalto, aterros, lastro ferroviário, bases de estradas.

11.5.3 Refratários

Os refratários são materiais utilizados como revestimentos de equipamentos siderúrgicos, e possuem como função básica a contenção de metal líquido e o isolamento térmico. O mercado brasileiro de materiais refratários é da ordem de 181.000 toneladas, ano/base: 1998 (INTERNATIONAL IRON AND STEEL INSTITUTE, 1995),³³ gerando uma média percentual estimada de 32% de sucata refratária (58.000 toneladas).

Os refratários após uso apresentam problemas específicos para serem reciclados, podendo ser dividido em duas classes (DUATE, 1998).³⁴

- *Reciclagem de Descartes no Produtor*

- Os descartes gerados no produtor são de origem conhecida;
- Em geral, não possuem contaminações;
- Os custos de processamento são menores, pois, em geral, envolvem apenas estocagem, moagem e classificação;
- Podem ser dosados em pequenas quantidades, na proporção que são gerados;
- Menor envolvimento de terceiros; c
- Menor incidência de regulamentações e legislação específica.

- *Reciclagem de Descartes no Consumidor*

- Descartes gerados no consumidor são muitas vezes de origem desconhecida;
- Em geral, possuem contaminações (outros refratários, alterações químicas, escória, aço);
- Os custos de processamento são maiores, pois, em geral, envolvem a demolição, seleção, limpeza, moagem, classificação, estocagem e transporte;
- Podem ser taxados de impostos; e
- Possuem legislação ambiental específica, quando classificados como resíduos.

11.5.4 Sucatas

A reciclagem de sucacias ferrosas, além de ser um negócio que movimenta bilhões de dólares por ano (EUA – US\$ 5 bilhões em 1998) é uma prática ambientalmente muito desejável, pois minimiza o gasto energético e aumenta a disponibilidade de recursos naturais.

A facilidade de transformação (ganho energético), atrelada à dinâmica da disponibilidade de sucatas, menor investimento de instalações e aumento da qualidade dos produtos provenientes da transformação do aço em usinas (Mini-Mills e aciarias elétricas), tem dado um grande impulso à indústria de reciclagem. Outro fator importante para o aumento da reciclagem é a diminuição de áreas disponíveis para a deposição de sucatas e o alto custo desta prática (UK: US\$ 5 a 23/t. – RFA: US\$ 250 a 375/t. – Japão : US\$ 93/t.).

Um ponto negativo na reciclagem das sucatas ferrosas é a geração de resíduos perigosos (Zn), decorrente do aumento da utilização de sucatas galvanizadas e a contaminação radioativa de sucatas provenientes de dispositivos nucleares (armamentos, medidores, reatores etc.), e os fatores mais importantes a serem levados em consideração.

A cada ano, a siderurgia mundial utiliza cerca de 200 milhões de toneladas de sucata, sendo em sua maioria, fundida em fornos elétricos. Estas sucatas, na maior parte das vezes, são entregues via rodoviária ou ferroviária nas siderúrgicas, tendo apenas uma inspeção visual em seu recebimento, antes de sua aceitação. Por isso, é indispensável o controle e a inspeção das sucatas quanto à emissão de radiação.

Em 1983, a usina de Auburn, NY/EUA – fundiu uma fonte radioativa, contaminando a planta e neste episódio, gastou 4,4 milhões de dólares na descontaminação. Outro acidente bizarro ocorreu em 1984, quando os detectores do Centro de Pesquisa Los Alamos, no Novo México/EUA, dispararam – uma mobília de aço foi construída com aço contaminado por cobalto 60, produzido na usina siderúrgica do Novo México/EUA. Quando acidentalmente carregado nos fornos elétricos, o material radioativo não é destruído, ele é distribuído entre os produtos da produção do aço. O cobalto 60 é absorvido pelo aço, o céscio 137 é volátil e coletado nos equipamentos de controle ambiental (filtros), o Amerício 241 é absorvido pela escória.

No Brasil, inspeções rigorosas da qualidade das sucatas adquiridas pelas aciarias têm-se mostrado efetivas no controle de contaminações radioativas. Porém, nos EUA, a maior parte dos acidentes contendo resíduos radioativos, fundidos em usinas siderúrgicas, ocorreu com material radioativo natural, que não é potencialmente tão perigoso quanto fontes radioativas artificiais:

- 600 acidentes – material radioativo natural; e
- 30 acidentes – fontes radioativas artificiais.

Os acidentes com fontes artificiais, geraram grande dispêndio de gastos com descontaminação.

11.6 Introdução ao Direito e Legislação Ambiental

Atualmente, a questão ambiental tem se tornado cada vez mais complexa, envolvendo e absorvendo o conhecimento de um vasto campo de ciências, como a biologia, as engenharias, as ciências da terra, bem como ciências sociais e jurídicas, uma vez que o estudo das questões ambientais é acima de tudo multidisciplinar.

Nesse contexto, a evolução constante do estudo jurídico tem um ponto de destaque na regulamentação das atividades humanas e na solução de conflitos que envolvem o desenvolvimento de nossa sociedade e o meio ambiente. O direito ambiental é uma especialização do direito administrativo que estuda normas que tratam das relações do homem com o espaço que o envolve.

11.6.1 Legislação ambiental e a constituição brasileira

Os atos e resoluções jurídicas em relação à preservação ambiental, no Brasil, não são novos, tendo sido originados de questões econômicas (garantir ao rei de Portugal a soberania sobre a exploração de riquezas vegetais, através de sua restrição do corte de espécies arbóreas) e não de questões conservacionistas (FREIRE, 1998; MAGALHÃES, 2002).^{35 36}

Contudo, no âmbito do Brasil República, o assunto ambiental ficou restrito a poucas leis, sendo que as Constituições de 1891, 1934, 1937, 1946 e 1967 nada tratavam sobre questões ambientais. Somente com a promulgação da Constituição Federal em 05/10/1988 (BRASIL, 2006)³⁷ é que

o meio ambiente foi elevado à condição de bem público, e o que era timidamente tratado, foi esclarecido ao se dispor que:

- (...) todos têm direito ao meio ambiente ecologicamente equilibrado, bem de uso comum do povo e essencial a sadia qualidade de vida, impondo-se ao Poder Público a coltividade o dever de defendê-lo e preservá-lo para as presentes e futuras gerações.

Pode-se afirmar que a legislação brasileira contém uma das mais avançadas orientações sobre o meio ambiente.

O artigo 225 da Constituição (Capítulo VI) cuida especificamente do Meio Ambiente; embora trazendo inovações deve ser observado que este artigo retrata, em alguns aspectos, dispositivos da Lei número 6938/81 que estabeleceu a Política Nacional de Meio Ambiente. Conferindo assim, *status* constitucional e, portanto, maior segurança em sua manutenção e eficácia.

Aos dispositivos do Capítulo VI, do Título VII, se soma ainda o Artigo 5, LXXIII, legitimando que qualquer cidadão pode propor ação popular destinada a anular ata lesivo ao meio ambiente, ao patrimônio histórico e cultural. Reproduzidas, a seguir, as obrigações do Poder Público para assegurar a efetividade desse direito:

- Preservar e restaurar os processos ecológicos essenciais e prover o manejo ecológico das espécies e ecossistemas.
- Preservar a diversidade e a integridade do patrimônio genético do país e fiscalizar as entidades dedicadas a pesquisa e manipulação de material genético.
- Definir, em todas as unidades da Federação, espaços territoriais e seus componentes a serem especialmente protegidos, sendo a alteração e a supressão permitidas somente através de Lei, vedada qualquer utilização que comprometa a integridade dos atributos que justifiquem sua proteção.
- Exigir, na forma de Lei, para a instalação de obra ou atividade potencialmente causadora de significativa degradação do meio ambiente, estudo prévio de impacto ambiental, a que se dará publicidade.
- Controlar a poluição, a comercialização e o emprego de técnicas, métodos e substâncias que comportem risco para a vida, a qualidade de vida e o meio ambiente.
- Promover a educação ambiental em todos os níveis de ensino e a conscientização pública para a preservação do meio ambiente.
- Proteger a fauna e a flora, vedadas na forma de Lei, as práticas que coloquem em risco sua função ecológica, provoquem a extinção de espécies ou submetam os animais à crueldade.

11.6.3 A política nacional de meio ambiente

A Política Nacional de Meio Ambiente é disciplinada pela Lei Federal 6938 de 31/08/1981 (BRASIL, 2006)³ (alterada pelas Leis 7804 de 18/07/1989 e 2008 de 12/04/1990), que veio dispor sobre seus fins e mecanismos de formulação e aplicação. Esta Lei foi regulamentada inicialmente pelo Decreto 88351 de 01/06/1983, posteriormente, revogado pelo Decreto 99274, de 06/06/1993, que o substituiu.

A Lei 6938/81 (BRASIL, 1981)³ pode ser considerada um dos marcos mais importantes, senão o mais importante da Legislação Ambiental Brasileira, não apenas por se tratar da primeira norma a cuidar do meio ambiente de uma forma global (pois até então este assunto era tratado setorialmente), como pelos inúmeros avanços e inovações que trouxe para a disciplina da questão ambiental.

Deve-se ressaltar que, quando de sua promulgação, o Brasil encontrava-se em pleno regime autoritário e estava em vigor a Constituição de 1967. O tratamento jurídico da questão ambiental era inadequado e insuficiente, baseado numa visão setorial dos recursos naturais. Estes, eram objetos de códigos específicos:

- Código Florestal;
- Código de Águas;
- Código de Mineração;
- Código de Pesca; e
- Código de Caça (ou Lei de Proteção à Fauna).

Embora com alguns poucos dispositivos que cuidavam da proteção ou adequada gestão dos recursos naturais, estes códigos eram voltados principalmente para o disciplinamento da exploração econômica.

Por sua vez, toda a legislação de controle da poluição fundamentava-se num único artigo da Constituição que sequer tratava do meio ambiente, mas sim da defesa e proteção da saúde (Art. 8, XVII, Alínea c da Constituição de 1967/69).

11.6.4 Recursos hídricos

A Lei Federal número 9433 de 08/01/1997 (BRASIL, 2006)³⁸ instituiu a Política Nacional de Recursos Hídricos, e criou o Sistema Nacional

de Gerenciamento de Recursos Hídricos, em cumprimento ao dispositivo no inciso XI do artigo 21 da Constituição Federal.

Pode-se destacar da Lei 9433/97 (BRASIL, 2006)³⁸ as seguintes disposições:

* A Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH) baseia-se nos seguintes fundamentos:

I – A água é bem de domínio público.

V – A bacia hidrográfica é a unidade territorial para a implantação da PNRH e atuação do Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos.

VI – A gestão dos recursos hídricos deve ser descentralizada e contar com a participação do Poder Público, dos usuários e das comunidades.

Art. 20 – Serão cobrados os usos de recursos hídricos sujeitos a outorga, nos termos do art.12 desta Lei.

Esta Lei prevê também a constituição de Comitês de Bacias Hidrográficas com competência, dentre outras ações, para promover o debate das questões relacionadas a recursos hídricos e articular a atuação das entidades intervenientes.

11.6.4 Águas subterrâneas

No que diz respeito às Águas Subterrâneas, a Legislação Federal é omissa. Deve-se consultar a Legislação Estadual.

11.6.5 Poluição do ar

Enquanto o controle da poluição das águas é feito através de fiscalização que considera tanto os padrões de qualidade quanto os padrões de emissão, o controle da poluição do ar utiliza outros mecanismos.

Como os corpos de água ocupam um espaço definido e suas águas correm sempre na mesma direção, o controle da alteração de sua qualidade é feito através da captação das águas a montante e a jusante do lançamento de efluentes por atividades poluidoras, o que vai atestar se após este lançamento foram mantidos os padrões de qualidade do corpo d'água correspondentes à classe em que este está enquadrado ou se foram alterados, desenquadrando o rio ou corpo receptor.

Já a fiscalização da poluição do ar não tem como utilizar os padrões de qualidade para o controle pontual de cada fonte de poluição, na medida em que este é difuso e o vento sequer sopra na mesma direção. Dessa forma, os

padrões de qualidade do ar estabelecidos são utilizados, principalmente, para orientar a formulação de planos gerais de controle, de uma dada região, que pode implicar o estabelecimento de providências a serem tomadas por cada fonte de poluição (agente poluidor) para reduzir suas emissões.

Logo, os padrões de poluição do ar são feitos principalmente através dos poucos padrões de emissão estabelecidos e, principalmente, pela verificação dos efeitos deletérios que esses lançamentos estão causando ao meio ambiente.

Dentre os instrumentos legais editados com relação ao recurso ar, destacam-se três dispositivos. O primeiro, a Portaria Minter nº 235 de 27/04/1976, que estabeleceu os padrões de qualidade do ar, a resolução CONAMA nº 18 de 60/05/1986, que instituiu o PROCONVE (Programa de Controle da Poluição por Veículos Automotores) e a resolução CONAMA nº 3, de 28/06/1990, que ampliou os poluentes atmosféricos indicadores de qualidade do ar, passíveis de monitoramento e de controle.

11.6.6 Resíduos sólidos

No que se refere à legislação sobre a disposição dos resíduos sólidos, muito pouco pode ser dito no momento. Isto porque seu manuseio, transporte e destinação final ainda não foram objetos de uma regulamentação específica, porém, inúmeras iniciativas estão tramitando na esfera legislativa (PL203/91).

No que tange à normalização técnica, o Instituto Nacional de Metrologia - INMETRO e Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT já possuem homologado normas e textos normativos relativos ao assunto:

- NBR 10004 – Resíduos Sólidos: Classificação (atualizada em 2004);
- NBR 10005 – Lixiviação de Resíduos: Procedimentos;
- NBR 10006 – Solubilização de Resíduos: Procedimentos;
- NBR 10007 – Amostragem de Resíduos: Procedimentos;
- NB 1183 – Armazenamento de Resíduos Sólidos Perigosos;
- NB 1264 – Armazenamento de Resíduos Sólidos Classes II e III;
- NB 98 – Armazenamento e Manuseio de Líquidos Inflamáveis e Combustíveis;
- Instrução Normativa SEMA/STC/CRS número i, de 10/06/1983 – PCB's; e

- PN 1:603.04-003 – Transporte de Resíduos, com base no Decreto Lei Federal nº 96044 de 18/05/1988.

As principais resoluções sobre o assunto são: as resoluções CONAMA 2, 5, 6, 23 e a Portaria MINTER nº 53 de 01/03/1979. Com relação à destinação, descarte, coleta, reutilização, reciclagem tratamento e/ou disposição final de pilhas e baterias, a resolução CONAMA 257 de 30/06/1999, dispõe sobre o assunto.

11.6.7 Poluição das águas

Em relação aos aspectos legais, uma lei aplicada à preservação dos recursos hídricos deve ser simples, clara, viável, de fácil aplicação e dinâmica. O aspecto de ser viável, ou seja, aplicável deverá considerar inevitavelmente a situação do fato existente. Outro fator ou característica que deve ter uma legislação sobre poluição é ser ela dinâmica, ou seja, ser capaz de se adaptar às novas tecnologias e a uma ação gradativa e progressiva a o estabelecimento de padrões de melhoria das qualidade da água.

Na esfera Federal, as principais leis que regulam o assunto são as resoluções CONAMA nº 1, de 23/01/1986 e CONAMA nº 20 de 18/06/1986.

Do ponto de vista de controle da poluição das águas, a legislação brasileira se baseia em dois critérios: o do corpo receptor conjugado com o lançamento de efluentes líquidos. Com relação ao corpo receptor, são estabelecidos padrões de qualidade em função dos usos preponderantes, onde cada classe recebeu limites e condições estabelecidas para o recebimento de efluentes.

Com relação aos efluentes líquidos de qualquer fonte poluidora, somente poderão ser lançados, direta ou indiretamente, nos corpos d'água desde que obedeçam a determinadas condições.

11.6.8 Licenciamento ambiental

O sistema de licenciamento nasceu nos Estados Unidos (OTOLANO, 1996),³⁹ que tinha problemas mais sérios de poluição, principalmente de natureza industrial. A necessidade de um controle prévio da instalação de

atividades efetiva ou potencialmente poluidoras levou à criação de normas legais e à implantação de sistemas de licenciamento ambiental que diferiam, em alguns poucos aspectos, de um Estado para outro. Estes sistemas foram implantados no decorrer da década de 1970.

No Brasil, o sistema de licenciamento ambiental foi disciplinado, pela Lei federal 6938 de 31/08/1981, alterada pela Lei 7804/89, e seu regulamento aprovado pelo Decreto 99274/90 (que substituiu o primeiro regulamento, aprovado pelo Decreto 88351/83).

A licença ambiental não foi definida na legislação citada, o que veio a acontecer com a Resolução CONAMA nº 237/97 (BRASIL, 2006):⁴⁰

- Licença ambiental: Ato administrativo pelo qual o órgão ambiental competente, estabelece as condições, restrições e medidas de controle ambiental que deverão ser obedecidas pelo empreendedor, pessoa física ou jurídica, para localizar, instalar, ampliar e operar empreendimentos ou atividades utilizadoras de recursos ambientais consideradas efetiva ou potencialmente poluidoras ou aquelas que, sob qualquer forma, possam causar degradação ambiental.

A legislação estabeleceu o sistema tríplice de licença:

- *Licença Prévia (LP)* - Na fase preliminar do planejamento da atividade, contendo requisitos básicos a serem atendidos nas fases de localização, instalação e operação, observados os planos municipais, estaduais ou federais de uso do solo. É nesta fase que deve ser solicitado, quando for o caso, o Estudo de Impacto Ambiental (EIA).
- *Licença de Instalação (LI)* - Autorizando o início da implantação, de acordo com as especificações constantes do projeto executivo aprovado:
 - Projeto civil;
 - Processo produtivo;
 - Marcha das matérias-primas;
 - Sistemas de controle da poluição; e
 - Forma e local de disposição dos resíduos sólidos etc.
- *Licença de Operação (LO)* - Também chamada de "Licença de Funcionamento", autorizando, após as verificações necessárias, o início da operação da atividade licenciada e o funcionamento de seus equipamentos, de acordo com o estabelecido nas licenças prévia e de instalação.

REFERÊNCIAS

- 1 INSTITUTO BRASILEIRO DE SIDERURGIA. *Anuário estatístico*. Rio de Janeiro, 2000.
- 2 _____. *Balanco social da siderurgia*. Rio de Janeiro, 2004.
- 3 BRASIL. Leis e decretos. *Lei 6.931, de 31 de agosto de 1981*: Dispõe sobre a Política Nacional de Meio Ambiente, seus fins e mecanismos de formulação e aplicação e dá outras providências. Disponível em: <<http://www.jurisambiente.com.br/ambiente/lei.shtml>>. Acesso em: 13 nov. 2006.
- 4 BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. *Riqueza das espécies*. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/sbf/chm/biodiv/brasil.html>>. Acesso em: 20 jul. 2005.
- 5 BRYANT, J. P. *Biodiversity and conservation: an hypertext book*. Irvine, CA: School of Biological Sciences, University of California. Disponível em: <<http://darwin.bio.uci.edu/~sustain/bio65/Titlepage.htm>>. Acesso em: 20 jul. 2005.
- 6 UNITED NATIONS. Environmental Programme. *The present carbon cycle: volumes and exchanges in billions of tonnes of carbon*. Disponível em: <<http://www.grida.no/climate/vital/13.htm>>. Acesso em: 25 set. 2005.
- 7 HANSEN, J.; SATO, M.; LACIS, A.; RUEPU, R.; TGEN, I.; MATHEWS, E. Climate forcing in industrial era. *Proceedings of National Academy of Science*, v. 95, p. 12573-12578, Oct. 1998.
- 8 UNITED STATES GOVERNMENT. Energy Information Administration. *EIA brochures*. Disponível em: <http://www.eia.doe.gov/bookshelf/eia_brochures.htm>. Acesso em: 28 out. 2005.
- 9 WOODS HOLE RESEARCH CENTER. *Understanding the global carbon cycle*. Disponível em: <<http://www.whrc.org/carbon/index.htm>>. Acesso em: 28 out. 2005.
- 10 NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION. *Easing off the (Greenhouse) gas*. Disponível em: <http://science.nasa.gov/headlines/y2002/15jan_greenhouse.htm>. Acesso em 28 out. 2005.
- 11 KIEHL, J. T.; TRENBERTH, K. E. Earth's annual global mean energy budget. *Bulletin of the American Meteorological Society*, v. 78, n. 2, p. 197-208, Feb. 1997.

- 12 FURO do gusa: ganhos de escala e elevada produtividade mantêm os altos-fornos na vanguarda da produção de gusa líquido. *Revista Metalurgia e Materiais*, v. 61, n. 558, p. 416-421, ago. 2005.
- 13 MACEDO, R. *Nonada sertão: esculturas*. Disponível em: <<http://www.iar.unicamp.br>>. Acesso em: agosto 2005. (Galeria de Arte da Unicamp)
- 14 LICEU ALBERT SABIN. *Desmatamento: a floresta sitiada*, Disponível em: <<http://www.liceuasabin.br/pessoai/rr;aiiana/lrr;acjes/desma:amenlo.htm>>. Acesso em: 28 ago. 2005.
- 15 FERREIRA, O.C. Emissão de gases de efeito estufa na produção e no uso de carvão vegetal na siderurgia. *Economia & Energia*, n. 20, mais-jun. 2000. Disponível em: <<http://ecen.com/eee20/emiscar2.htm#siderurgia>>. Acesso em: 28 ago. 2005.
- 16 SHARMA, P; BASU, G.S.; PRASAD, S.B. Steel industry and climate change. *Tata Tech*, n. 39. Disponível em: <<http://www.tatasteel.com/hindi/webzine/tatatech39/page13.html>>. Acesso em: 26/06/2035.
- 17 THE JAPAN IRON AND STEEL FEDERATION. *Ongoing commitment of the steel industry against global warming*. Disponível em: <<http://www.jisf.or.jp>>. Acesso em: 29 ago. 2005.
- 18 EUROPA UNION. Institute for Prospective Technological Studies. *Infogated pollution prevention and control (IPPC): best available techniques reference document on the production of iron and steel*. Seville, Spain, 2000.
- 19 UNITED STATES. Environmental Protection Agency. EPA Office of Compliance Sector Notebook Project. *Profile of the iron and steelmaking industry*. Washington, 1995.
- 20 EUROPEAN ENVIRONMENT AGENCY. *Air and health: air pollutants and global effects: acid rain*. Disponível em: <<http://reports.eea.eu.int/2599XXX/en/page009.html>>. Acesso em: 29 ago. 2005.
- 21 MEHELICIC, J. R. *Fundamentals of environmental engineering*. New York: Jshn Willey & Sons, 1999.
- 22 REBOUÇAS, A. *Uso inteligente da água*. São Paulo: Editora Escrituras, 2004.
- 23 RIBEIRO, E.D.L.; CASTRO, L.F.A; TAVARES, R.P. Água na siderurgia. *Revista Metalurgia e Materiais*, v, 61, n. 558, p. 453-455, ago. 2005.

- 24 INTERNATIONAL IRON AND STEEL INSTITUTE United Nations Environment Programme. *Industry as a partner for sustainable development*. United Kingdom, 2002.
- 25 UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME. *Energies*. Disponível em: <http://www.uneptie.org/pc/sustain/reports/SCP_Resource_Kit/PDF_FINAL_uk/Energy%20_FINAL.pdf>. Acesso em: 29 ago. 2005.
- 26 UNITED STATES GOVERNMENT. Energy Information Administration. *World energy consumption*. Disponível em: <<http://permanent.access.gpo.gov/lps2973/www.eia.doe.gov/oiaf/ieo97/world.html>>. Acesso em: 29 ago. 2005.
- 27 MOURA, I.A.A. *Qualidade & gestão ambiental*. São Paulo: Oliveira Mendes, 1998.
- 28 SVENSKA MINERAL. *Lime and dolomite for the steel industry*. Disponível em: <http://www.svenska-mineral.com/products/steellind/com_steel.htm>. Acesso em: 10 out. 2006.
- 29 UNITED STATES. Environmental Protection Agency Ferrous metals production. In: *PROFILE of the iron and steel industry*. Washington, 1995. Disponível em: <<http://www.epa.gov/epaoswer/other/mineral/chapter8.pdf>>. Acesso em: 40 out. 2006.
- 30 LENZ E SILVA, G.F. B. *Reciclagem de resíduos siderúrgicos sólidos contendo ferro via tecnologia de aglomeração através a solução de um modelo multicriterial hierárquico e de programação linear*. 2004. Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo
- 31 LITTLE, A.D. (org.) *Estudo sobre aplicação de escórias siderúrgicas no Brasil e em 8 países*. Rio de Janeiro: Setepla Tecnometal Engenharia Ltda., 1999.
- 32 SOBREMÉTAL. *Catálogo técnico*. [S.l.], 2000.
- 33 INTERNATIONAL IRON AND STEEL INSTITUTE. Committee on Environmental Affairs / Committee on Technology. *Aspects of steel recycling*. Brussels, 1993.
- 34 DUATE, A. K. (Org.). *Reciclagem de refratários usados*. Contagem: Magnesita S.A., 1998.

- 35 FREIRE, W. *Direito ambiental brasileiro*. Rio de Janeiro: Editora AIDE, 1998.
- 36 MAGALHÃES, J.I.P. *A evolução do direito ambiental no Brasil*. 2.ed. São Paulo: Jszarez de Oliveira, 2002.
- 37 BRASIL. Senado Federal!. Constituição da República Federativa do Brasil. Disponível em: <<http://www.senado.gov.br/sf/legislação/const/>>. Acesso em: 13 nov. 2006.
- 38 BRASIL. Leis e decretos. *Lei 9433, de 8 de janeiro de 1997*: Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria a Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, regulamenta o inciso XIX do a 21 da Constituição Federal, e altera c art. 1º da Lei nº 8.001, de 13 de março de 1990, que modificou a Lei nº 7.990, de 28 de dezembro de 1989. Disponível em: <<http://www.planalto.gov.br/CCIVIL/LEIS/L9433.htm>>. Acesso em: 14 nov. 2006.
- 39 OTOLANO, L. *Environmental regulations and impact assessment*. New York: John Wiley & Sons, 1996.
- 40 BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente. *Resolução nº 237, de 19 de dezembro de 1997*. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/conama/res/res97/res23797.html>>. Acesso em: 14 nov. 2006.

BIBLIOGRAFIA

- 1 ALMEIDA, F. *O bom negócio da sustentabilidade*. Rio de Janeiro: Nova Fronteira, 2002.
- 2 BSI BRITISH STANDARD. *Environmental management: life cycle assessment: principles and framework*. London, 1997. (BS EN ISO 14040:1997)
- 3 BSI BRITISH STANDARD. *Environmental management: life cycle assessment: life cycle interpretation*. London, 2000. (BS EN ISO 14043:2000).
- 4 COTTREL, A. *An introduction to metallurgy*. London: The Institute of Materials, 1995.

- 5 CRU INTERNATIONAL LIMITED. *Development of the minerals cycle and the need for minerals: a report prepared for the International Institute for Environment and Development*. RSIC Ref No: 00971 November 2001.
- 6 DRISCOLL, C.T.; LAWRENCE, G. B.; BULGER, A. J.; BUTLER, T.J.; CRONAN, C.S.; EAGAR, C.; LAMBERT, K. F.; LIKENS, G. E.; STODDARD, J. L.; WEATHERS, K. C. *Acid rain revisited: advances in scientific understanding since the passage of 1979 and 1990 clean air act amendments*. Hznover: Hubbard Brook Research Foundation 2001. (Science Links Publications, 1).
- 7 HAYMAN, R.; HORTON, W. *Ironbridge: history & guide*. Strud: K. Tempus, 2003.
- 8 INTERNATIONAL IRON AND STEEL INSTITUTE. *World steel in figures: 2005*. Disponível em: <<http://www.worldsteel.org/wsif.php>>. Acesso em: 26 out. 2005.
- 9 JUNGSTEDT, L.O. C. *Direito ambiental: legislação*. Rio de Janeiro: Editora Thex, 1999.
- 10 MALTAWEATHER.INFO. *Air pollution*. Disponível em: <<http://www.maltaweather.info/pollution.html>>. Acesso em: 29 ago. 2005.
- 11 NASCIMENTO, R. C.; LENZ E SILVA, G.F.B.; MOURÃO, M.B., TAKANO, C. Caracterização e viabilização para a reciclagem de resíduos siderúrgicos. In: CONGRESSO ANUAL DA ABM, 55., 2000, Rio de Janeiro. *Anais...* São Paulo: ABM, 2000. 4 CD-ROM.
- 12 PASTERNAK, A. D. *Global energy futures and human development: A framework for analysis*. Local de publicação: Department of Energy. Lawrence Livermore National Laboratory, 2000. (UCRL-ID-140773).
- 13 SHERBY, O.D.; WADSWORTH, J. Ancient blacksmiths, the iron age, Damascus steels, and modern metallurgy. *Journal of Materials Processing Technology*, v. 117, n. 3, p. 347-353, Nov. 2001.
- 14 THE SUSTAINABLE SCALE PROJECT. *Population quickfacts*. Disponível em: <<http://www.sustainablescale.org>>. Acesso em: 30 ago. 2005.
- 15 TYLECOTE, R. F. *A history of metallurgy*. 2ed. rev. London: Maney, 2002.
- 16 VERMONT AGENCY OF NATURAL RESOURCES. Disponível em: <<http://www.anr.state.vt.us>>. Acesso em: 29 ago. 2005.

Os produtos siderúrgicos podem ser divididos em três grandes grupos:

Os *produtos planos*, como o próprio nome indica, apresentam formatos planos, obtidos através de laminação, e são produzidos basicamente na forma de bobinas e chapas. A Figura 12.1 ilustra um produto plano típico, a chapa grossa.

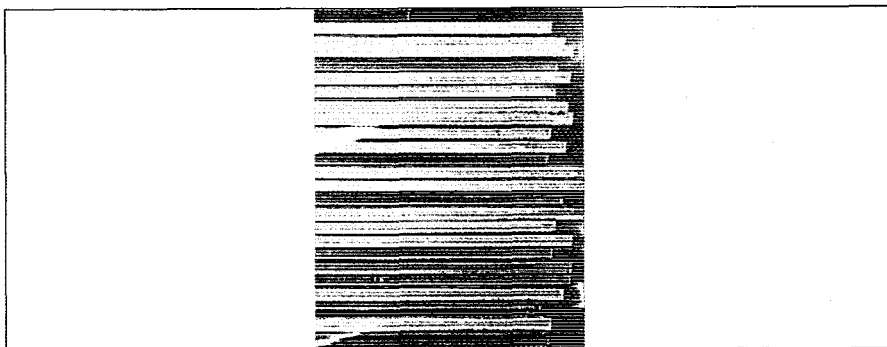


FIGURA 12.1 - Chapa grossa, produto plano típico (USIMINAS, [s.d.]).¹

Os *produtos não-planos* ou *longos* são os produtos obtidos por processos de conformação, como laminação e trefilação, são aqueles na forma de perfis, fios, arames etc. A Figura 12.2 mostra o perfil na forma de trilho e a Figura 12.3 ilustra o arame obtido por trefilação. Uma subdivisão do grupo de não-planos é o de longos, isto é, produtos com formas alongadas, como, por exemplo, os vergalhões para concreto, os tarugos, barras, arames etc.

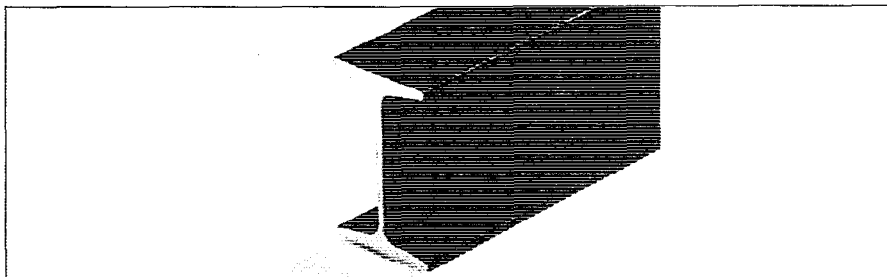
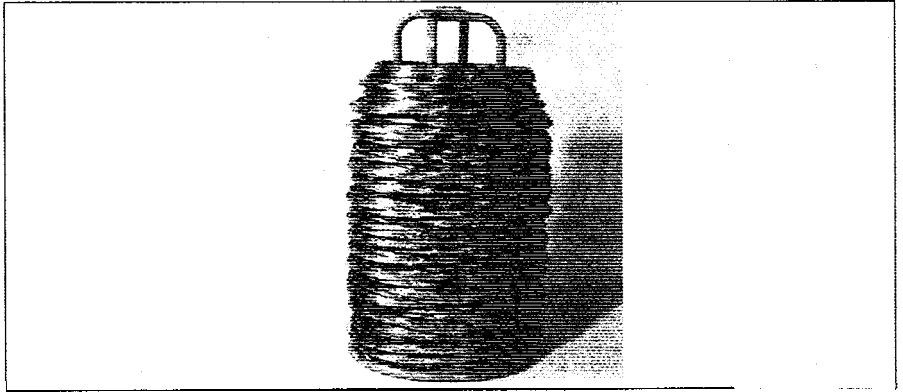


FIGURA 12.2 - Perfil em forma de trilho (BELGO MINEIRA, [200-]).²

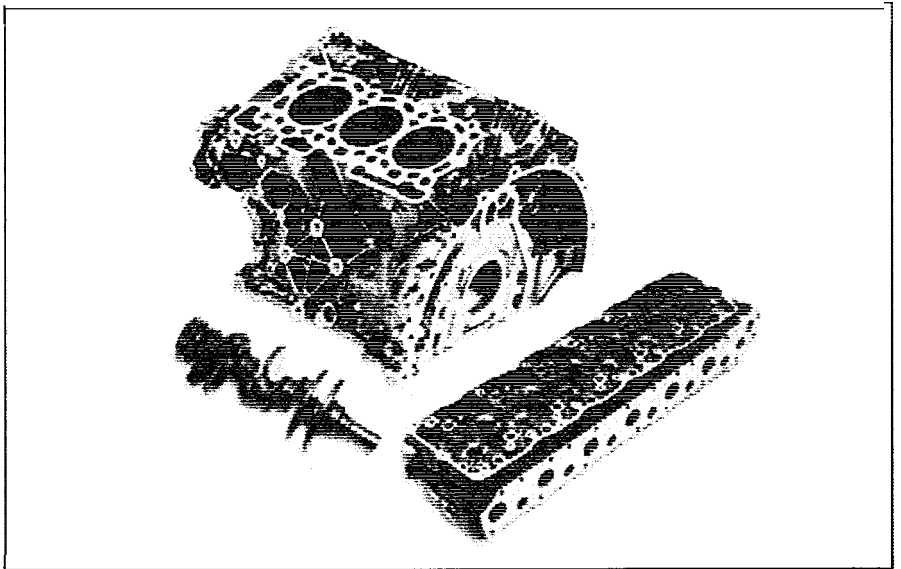
Produtos Siderúrgicos

FIGURA 12.3 - Arame obtido por trefilação (BELGO MINEIRA, [s.d.]).³



Os *produtos fundidos* são aqueles cuja peça é obtida por vazamento do metal líquido em formas ou moldes. O produto praticamente está no formato final, pois não pode sofrer conformação, por não apresentar conformabilidade, ou seja, capacidade de mudar de forma. Blocos de motores, objetos de arte, autopeças, são produtos tipicamente obtidos por fundição. Normalmente, estes produtos recebem acabamento através de processos, como retifica, furação e outros. A Figura 12.4 apresenta exemplos de produtos fundidos.

FIGURA 12.4 - Bloco de motor e peça automotiva obtidos por processo de fundição (FUNDIÇÃO TUPY, 2006).⁴



12.1 Produtos Planos

A seguir descrevem-se as principais características dos produtos planos comercializados.

Placas são produtos semi-acabados, obtidos em sua maior parte na aciaria, através de lingotamento contínuo, podendo também ser obtidas por laminação de desbaste de lingotes. São normalmente classificadas como semi-acabados, pois são materiais que sofrerão conformação posterior através da laminação.

As espessuras variam de 200 mm a 265 mm em condições normais. A Figura 12.5 ilustra estes produtos.

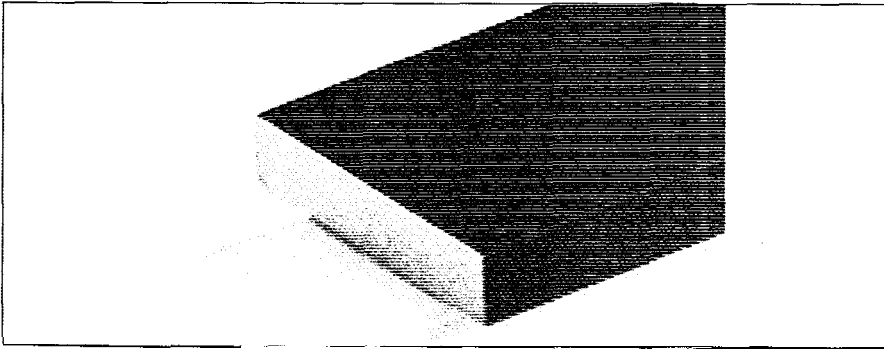


FIGURA 12.5 - Placa de aço obtida por lingotamento contínuo (BELGO MINEIRA, [200-]).²

Chapas grossas são obtidas através do laminador de chapas grossas. As espessuras variam 6 mm a 200 mm, daí o nome chapas grossas; as larguras variam de 1.000 a 3.800 mm e os comprimentos de 5.000 mm a 18.000 mm. A Figura 12.6 ilustra a laminação de chapas grossas,

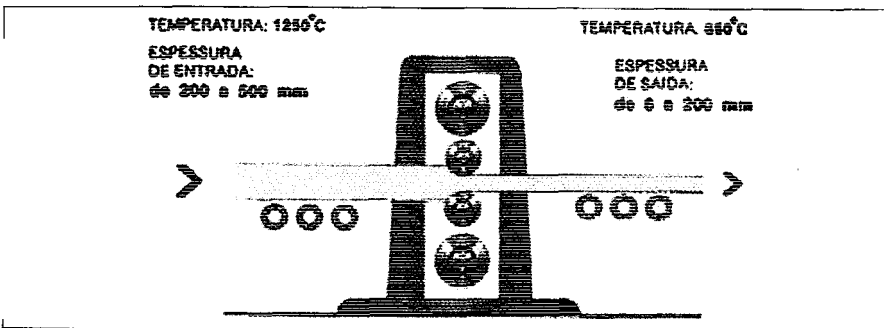
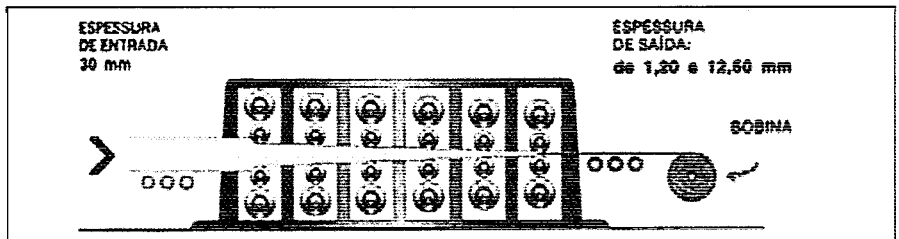


FIGURA 12.6 - Laminação de chapas grossas (DIAS, 2002).⁵

Laminados a quente são produzidos com o equipamento denominado laminador de tiras a quente. São produzidos através de uma série de laminadores, conforme a Figura 12.7. As espessuras variam de 1,20 mm a 16 mm e as larguras de 800 mm a 2.000 mm.

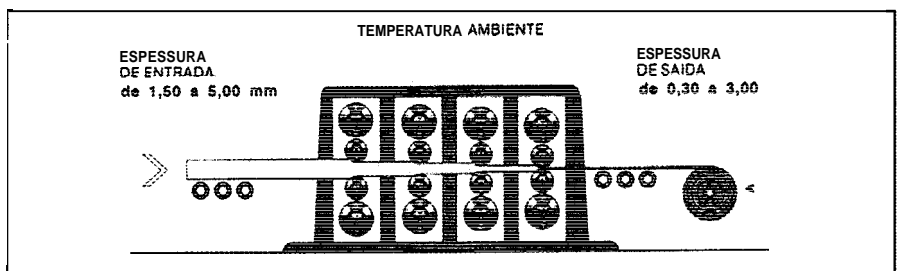
Os laminados a quente são obtidos inicialmente na forma de bobinas, e posteriormente podem ser cortados, decapados ou laminados a frio, dependendo da aplicação do produto.

FIGURA 12.7 -
Laminador de tiras a
quente (DIAS,2002).⁵



Laminados a frio usam como matéria-prima o laminado a quente decapado, devido à necessidade da remoção de óxidos superficiais, pelo processo de decapagem, para o processo de laminação a frio. As espessuras variam de 0,38 mm a 3,00 mm e as larguras de 800 mm a 1.870 mm (Figura 12.8). A laminação se processa a temperatura ambiente. O destino destes materiais é para aplicações mais nobres que dos laminados a quente, que exigem bom acabamento, como eletrodomésticos e carros, e são produtos de espessuras mais finas.

FIGURA 12.8 -
Laminador de tiras a frio
(DIAS,2002).⁵



Revestidos são produtos laminados que recebem um revestimento protetor contra corrosão. O revestimento mais usado é aquele com zinco. Existem, também, os revestidos com produtos orgânicos (tinta) e com estanho (conhecidos como folha-de-flandres). As *folhas-de-flandres* são produtos

laminados a frio revestidos com estanho, de espessuras mais finas, que, após a preparação da superfície, são revestidos com estanho. As espessuras variam de 0,20 mm a 0,30 mm, através de laminadores a frio especiais que atingem estas espessuras (Figura 12.9). São usados principalmente pela indústria de alimentos enlatados.



FIGURA 12.9 - Produtos manufaturados com folhas-de-flandres (COMPANHIA SIDERÚRGICA NACIONAL, [s.d.]).⁶

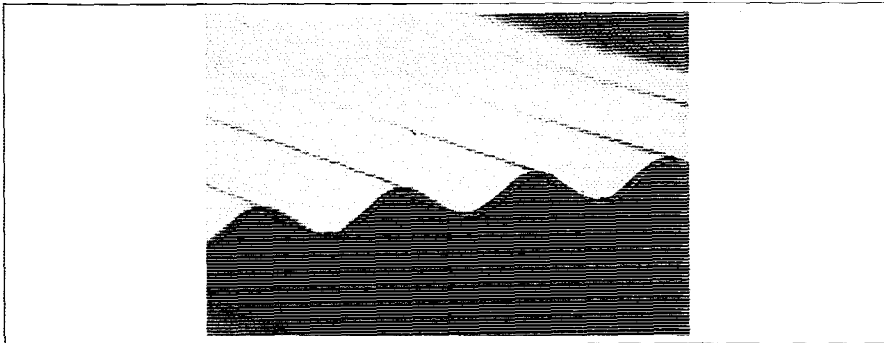


FIGURA 12.10 - Telhas de aço zincado por imersão a quente (COMPANHIA SIDERÚRGICA NACIONAL: [s.d.]).⁶

Os tipos de *revestimento de zinco* podem ser imersão a quente e eletrolítico. Os de imersão a quente são obtidos, como o próprio nome indica, através da passagem por um banho de zinco líquido, e os do tipo eletrolítico, através da deposição eletroquímica, semelhantes aos processos de cromação e deposição de ouro em jóias. A Figura 12.10 mostra material com revestimento de zinco utilizado na confecção de telhas.

Produtos relaminados são aqueles obtidos por relaminação de laminados, tanto a quente como a frio, desde que atendam às propriedades exigidas na relaminação. Os produtos são relaminados num laminador que reduz ainda mais as espessuras, e seguem normas específicas para produtos relaminados.

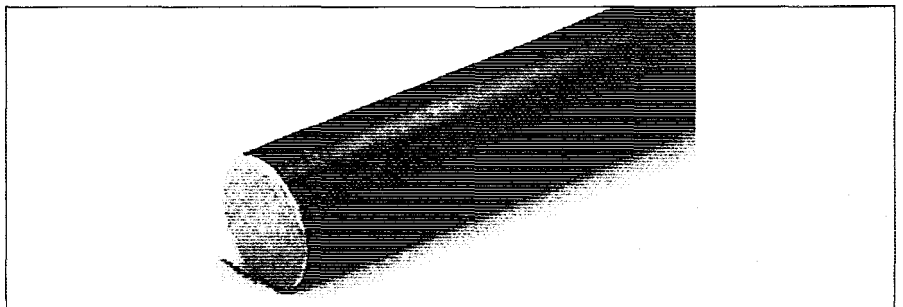
Aços de *uso geral*, com carbono e manganês, sem adição de elementos microligantes, que atendem apenas à composição química, são utilizados largamente na construção civil e mecânica, indústria de móveis, tubos e outros. São destinados a usos menos nobres, não exigindo responsabilidade em termos estruturais.

12.2 Produtos Não-Planos

Os produtos *semi-acabados* para laminação de não-planos, equivalentes às placas de aço para os aços planos, são os lingotes, blocos e tarugos de aço, obtidos por lingotamento contínuo ou convencional. A partir destes semi-acabados, os produtos longos são obtidos por processos de conformação mecânica, principalmente laminação e trefilação. Os principais produtos longos, ou não-planos, são: barras, vergalhões, fio-máquina, perfis, trilhos e tubos sem costura.

Barras podem ser fornecidas com secção redonda (Figura 12.11) ou chata. Barras redondas são utilizadas para a fabricação de eixos, peças para mecânica em geral, moias helicoidais, implementos agrícolas e rodoviários, ferramentas e fixadores. Barras chatas são utilizadas em máquinas e implementos agrícolas e rodoviários e indústrias mecânicas em geral. A Figura 12.12 ilustra utilização de barras chatas laminadas em molas de veículos automotores.

FIGURA 12.11 - Barra redonda, produto longo típico (BELGO MINEIRA, [200-]).²



Barras trefiladas (Figura 12.13) são processadas a frio através de equipamentos denominados trefiladores. A *trefilação* é realizada na temperatura ambiente, onde o fio ou a barra é passada através de orifícios e submetido à tração; com isso a secção do produto é reduzida.

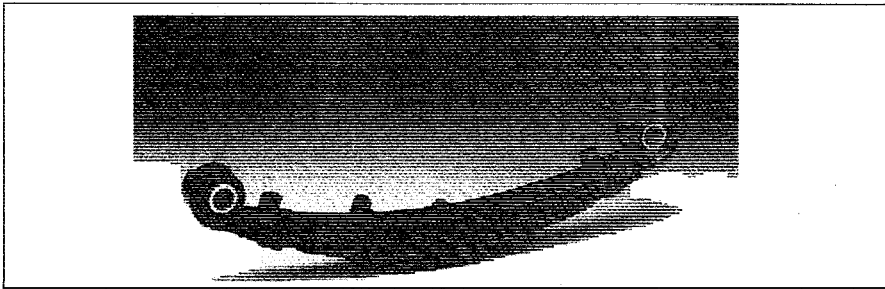


FIGURA 12.12 -
Utilização de barras
chatas laminadas em
mola de veículo
automotor (BELGO
MINEIRA, [200-]).²

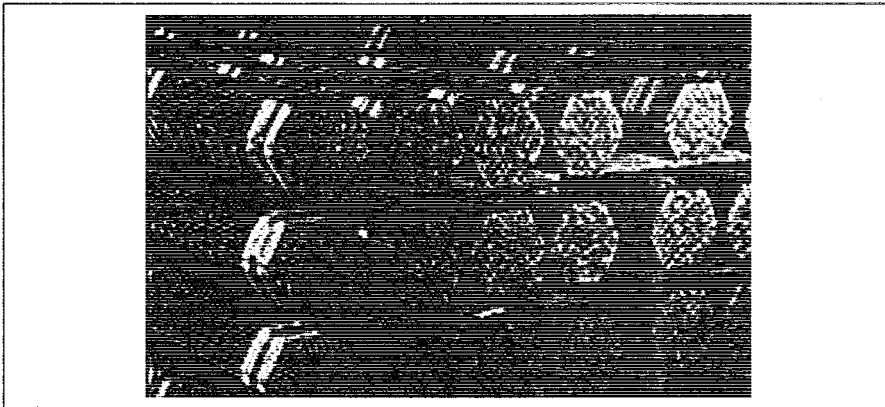


FIGURA 12.13 - Barras
trefiladas (BELGO
MINEIRA, [200-]).²

O *fio máquina*, obtido por laminação a quente com seção transversal circular (Figura 12.10) é um semi-acabado utilizado por diversos setores industriais na fabricação de produtos por trefilação, como arames e cordoaihas, entre outros, tanto para construção mecânica como para construção civil.

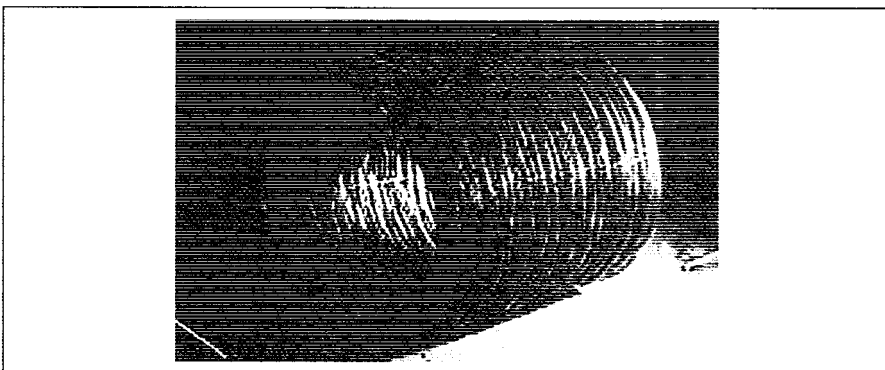
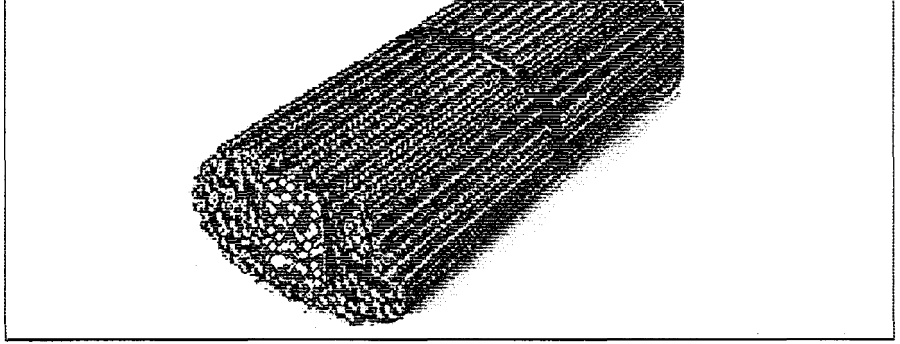


FIGURA 12.14 -
Fio-máquina obtido por
laminação a quente
(BELGO MINEIRA,
[200-]).²

Produtos Siderúrgicos

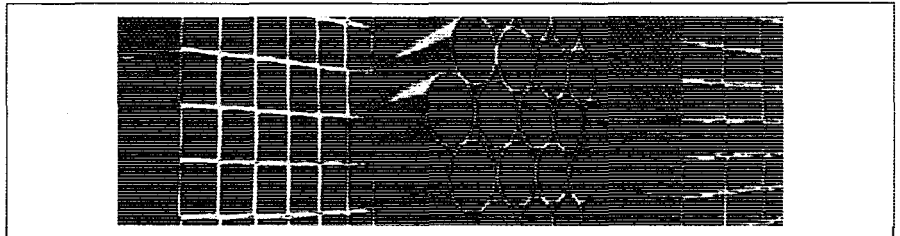
Vergalhões (Figura 12.15) são amplamente utilizados na construção civil, na forma de armações para concreto armado.

FIGURA 12.15 - Vergalhões para construção civil (BELGO MINEIRA, [200-]).²



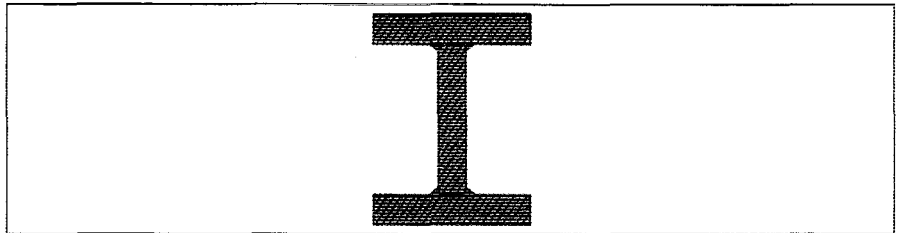
Tubos podem ser fabricados diretamente por laminação, em laminadores especiais, fornecendo os chamados tubos sem costura, por não terem necessidade de ser soldados, ou então fabricados por conformação e soldagem de chapas, o que fornece os tubos com costura.

FIGURA 12.16 - Tubos sem costura e tubos soldados (ICATUMETAIS, [s.d.]).⁷



Perfis laminados, como o mostrado na Figura 12.2, são fabricados diretamente no laminador de perfis. Utilizados na construção civil e pelo setor mecânico, não contêm soldas. Por outro lado, *perfis* soldados são fabricados a partir de chapas que são soldadas, como mostra a Figura 12.17. São muito utilizados na construção civil.

FIGURA 12.17 - Perfil soldado (FEM, [s.d.]).⁸



Os trilhos de aço são, também, obtidos através de laminação de perfis, na qual os cilindros são fabricados com sulcos no foi-mato de trilhos.

12.3 Aço e suas Aplicações

O tipo de aço a ser empregado para cada produto depende de sua aplicação específica, que determina as propriedades que deve ter o material. A seguir serão descritos os principais tipos de aço para diversas aplicações.

12.3.1 Aços planos

Os aços *estruturais*, aqueles utilizados em estruturas onde se necessita de resistência mecânica e soldabilidade, são fornecidos com garantia de composição química e propriedades mecânicas, e podem ou não conter elementos microligantes. Exemplos de aplicação de aço estrutural são pontes, torres de transmissão de energia elétrica, estruturas metálicas em construção civil, estruturas de máquinas e máquinas agrícolas.

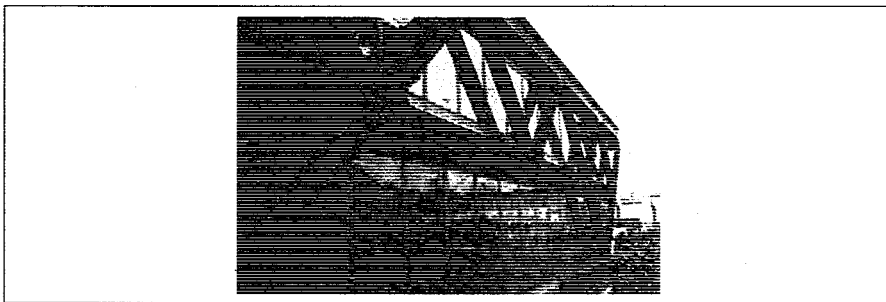
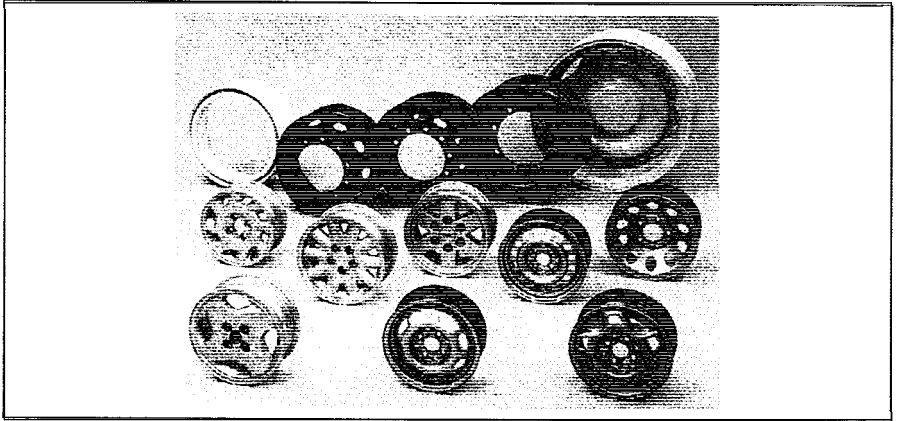


FIGURA 12.18 - Estrutura metálica de aço estrutural.

Aços estruturais de alta *conformabilidade* são muito utilizados em automóveis, pois os veículos necessitam de material que apresente resistência mecânica e baixo peso, levando à economia de combustível. Estes produtos precisam ser passíveis de conformação, e devem ter garantia de composição química e propriedades mecânicas, podendo ser microligados ou não, com alta soldabilidade. Utilizados em componentes estruturais, são aplicados largamente em peças como suspensão de automóveis, travessa de chassis e rodas automotivas, ilustradas na Figura 12.19.

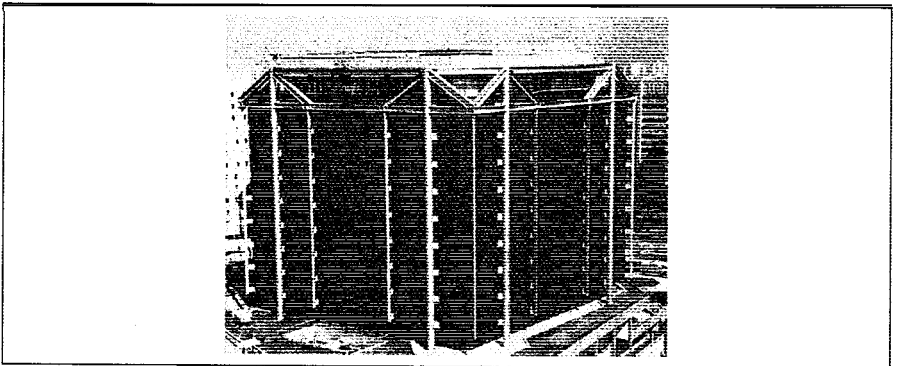
Produtos Siderúrgicos

FIGURA 12.19 - Peças automotivas de aço estrutural de alta conformabilidade (COMPANHIA SIDERÚRGICA NACIONAL, [s.d.]).⁹



Aços estruturais resistentes à corrosão atmosférica são aços com garantia de composição química, boa tenacidade, soldabilidade, resistência à corrosão atmosférica e alta resistência mecânica. Desenvolvem, com o tempo, uma pátina, que é um óxido resistente que protege contra a corrosão, e são indicados para estruturas expostas ao tempo, conforme Figura 12.20.

FIGURA 12.20 - Estrutura externa de aço resistente à corrosão atmosférica (Centro Empresarial do Aço). Fonte: Acervo Cosipa.



Aços para tubos são aços soldáveis, de alta resistência mecânica, empregados em oleodutos e gasodutos (Figura 12.21). Sujeitos a altas pressões internas, largamente utilizados pela indústria petrolífera.

Aços para estampagem têm como principal característica a conformabilidade, e são utilizados na fabricação de peças ou componentes por estampagem. Normalmente utilizados em carroceria de automóveis, na manufatura de portas, paralamas, capôs e capota, como mostra a Figura 12.22.



FIGURA 12.21 - Tubos de aço para gasodutos (USIMINAS, [s.d.]).¹

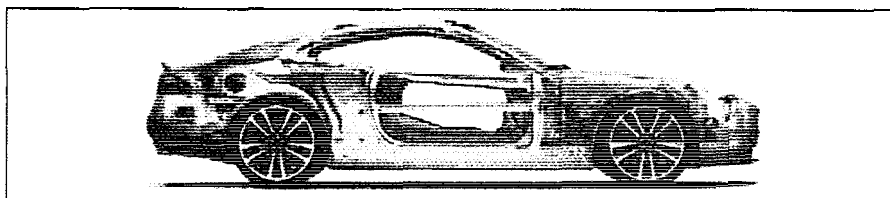


FIGURA 12.22 - Carroceria de automóvel, com uso intensivo de aços para estampagem (JOST, 2006)

Aços para vasos de pressão são utilizados para a fabricação de recipientes para armazenagem de gases, vapores e líquidos; devem ter alta resistência mecânica, soldabilidade e conformabilidade. A Figura 12.23 mostra diversos tipos de vasos que empregam este tipo de aço.

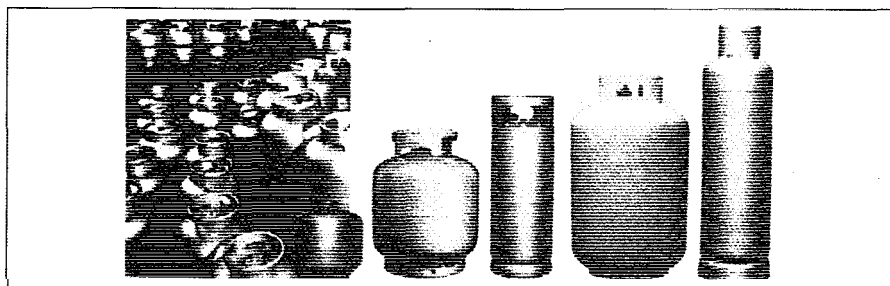
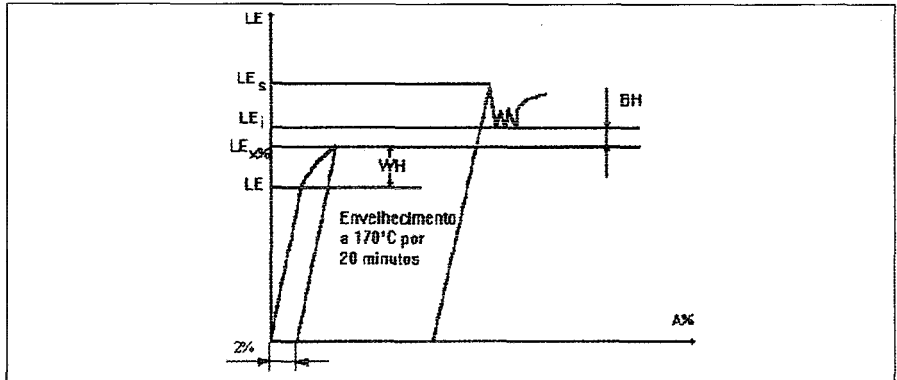


FIGURA 12.23 - Botijões para armazenagem de gases de aços para vasos de pressão (MANGELS, 2006).¹¹

Aços endurecíveis pelo calor são aqueles aços que têm sua dureza aumentada pelo calor, conhecidos como aços *BH* (do inglês *Bake Hardening*, endurecimento por cozimento). São aços que facilitam a estampagem, durante a produção das peças, apresentando alta conformabilidade, limite de escoamento baixo, facilitando a operação e, durante o aquecimento na linha de pintura, apresentam aumento nos valores das propriedades mecânicas, favorecendo as condições para o uso final. Como mostra o gráfico da Figura 12.24, o limite de escoamento aumenta após o aquecimento do aço. O parâmetro *BH* é uma medida do aumento nesta propriedade mecânica.

Produtos Siderúrgicos

FIGURA 12.24 -
Diagrama tensão x
deformação antes e após
o tratamento de *Bake
Hardening*
(MAGNOBOSCO,
1997).¹²



Aços revestidos são aqueles nos quais é depositada uma camada de revestimento de outro material para melhorar a resistência à corrosão. O principal tipo de aço revestido é o *aço zincado*. As chapas são revestidas com zinco, e apresentam alta resistência à corrosão. São aços largamente utilizados na construção civil, em utilidades domésticas e nos automóveis, onde se exige resistência à corrosão. *Folhas metálicas* são aços para embalagem, e podem ser fornecidos com revestimento de estanho (*folha-de-flandres*) ou orgânicos.

12.3.2 Aços para produtos longos

Aços para cementação são aços de baixo teor de carbono (%C < 0,25%), com ou sem adição de elementos de liga, que apresentam uma camada periférica dura, obtida por cementação, isto é, aumento do teor de carbono junto à superfície. Deste modo, possuem um núcleo tenaz e resistente e uma superfície de alta dureza, e são usados em componentes sujeitos a solicitações mecânicas de tração, torção e impacto, como engrenagens, coroas, pinhões, pinos e buchas. São fáceis de forjar, extrudar ou usinar, apresentando pouca distorção **após** tratamento térmico, e a camada cementada deve ter tenacidade suficiente para não quebrar de maneira frágil, como acontece, por exemplo, com os vidros e cerâmicas.

Aços para beneficiamento são aços que sofrem tratamento térmico posterior. Normalmente são submetidos aos tratamentos de têmpera e revenimento. Têm teor de carbono inferior a 0,25%, com ou sem adição de elementos de liga, e são utilizados na fabricação de peças que requerem boa

combinação de resistência à tenacidade com valores relativamente uniformes em toda seção ou até certa profundidade. Usados na indústria automobilística, em virabrequins, bielas, braços, juntas, eixos e engrenagens.

Aços microligados são aços carbono modificados com pequenas adições de vanádio, nióbio e/ou titânio, com limite de resistência à tração superior ou similar a aço de alto carbono, com boas propriedades de ductilidade, tenacidade e soldabilidade. O fato de ter boas características de resistência e tenacidade elimina, muitas vezes, a etapa de beneficiamento. Apresentam como vantagens a eliminação dos tratamentos térmicos de têmpera, revenimento e alívio de tensões; a eliminação da operação de endireitamento da peça, normalmente necessária após o tratamento térmico; a ausência de trincas de tensão, devido ao resfriamento mais lento a partir da temperatura de tratamento; e a melhora na uniformidade do processo de fabricação.

Aços para mola são aços com teor de carbono em torno de 0,60%, com adições de Mn, Cr e, algumas vezes, Si, B e Mo. A função básica destas adições é promover a volta do material à sua forma original, quando uma carga é aplicada e depois retirada.

Aços para rolamento são aços de alto teor de carbono (0,98% a 1,10%) contendo cromo entre 0,40% a 1,60% e que apresentam têmpera profunda. Resistência à fadiga é a principal característica desejada, e é basicamente associada a fatores metalúrgicos como o controle rigoroso de inclusões, microestrutura e segregação.

Aços de usinagem fácil são aços de baixo/médio teor de carbono, com adições de enxofre, fósforo e, em alguns casos, chumbo, cuja principal característica é a facilidade de remoção de material com ferramenta de corte, apresentando alta produtividade nas linhas de usinagem.

12.4 Influência dos Elementos de Liga nas Propriedades dos Aços

A composição química determina muitas das características importantes dos aços. A seguir, será descrita a influência dos principais elementos de liga no estabelecimento das características dos aços, ressaltando-se que o efeito de duas ou mais adições desses elementos pode ser diferente do efeito desses elementos isoladamente.

Carbono (C): O aumento do teor de carbono constitui a maneira mais econômica para obtenção da resistência mecânica dos aços, atuando primordialmente no limite de resistência. Mas, por outro lado, o carbono prejudica sensivelmente a ductilidade (em especial o dobramento) e a tenacidade. Teores elevados de carbono comprometem a soldabilidade e diminuem a resistência à corrosão atmosférica.

Manganês (Mn): É usado praticamente em todo aço comercial. C aumento do teor de manganês é também uma maneira segura de melhorar a resistência mecânica, atuando no aumento do limite de escoamento e da resistência à fadiga.

Silício (Si): É usado como desoxidante do aço. Favorece sensivelmente a resistência mecânica (limite de escoamento e de resistência) e a resistência à corrosão, porém reduzindo a soldabilidade.

Enxofre (S): É extremamente prejudicial aos aços. Desfavorece a ductilidade, em especial o dobramento, e reduz a soldabilidade. Diminui a tenacidade.

Fósforo (P): Aumenta o limite de resistência, favorece a corrosão e a dureza, prejudica a ductilidade e a soldabilidade. Quando ultrapassa certos valores, o fósforo torna o aço quebradiço.

Cobre (Cu): Aumenta de forma sensível a resistência à corrosão atmosférica dos aços, em adições de até 0,35 %. Aumenta, também, a resistência à fadiga, mas reduz, de forma discreta, a ductilidade, a tenacidade e a soldabilidade.

Níquel (Ni): Aumenta a resistência mecânica, a tenacidade e a resistência à corrosão. Reduz a soldabilidade.

Cromo (Cr): Aumenta a resistência à corrosão atmosférica e à abrasão. Reduz, porém a soldabilidade. Melhora o desempenho da aço a temperaturas elevadas.

Nióbio (Nb): Aumenta a resistência mecânica e a soldabilidade; teores baixíssimos deste elemento permitem aumentar o limite de escoamento e a resistência. É um componente quase obrigatório nos aços de alta resistência e baixa liga: além de não prejudicar a soldabilidade, permite diminuir os teores de carbono e de manganês, melhorando, portanto, a soldabilidade e a tenacidade. Pode diminuir a ductilidade.

Titânio (Ti): Aumenta o limite de resistência à abrasão e melhora o desempenho em temperaturas elevadas.

12.5 Composição Química e Propriedades dos Diversos Tipos de Aço

As Tabelas 12.1 e 12.2, a seguir, apresentam, respectivamente, para aços planos e não-planos, as composições químicas e propriedades mecânicas dos tipos de aços mais usados para cada aplicação, bem como a norma correspondente.

APLICAÇÃO	TIPO	NORMA	GRAU	COMPOSIÇÃO QUÍMICA (%)	PROPRIEDADES MECÂNICAS
Construção Civil	Estrutural	ASTM A 36		C: $\leq 0,25$ Mn: 0,80/1,20 Si: 0,40 máx	LE: 250 MPa LR: 400/550 MPa
	Estrutural	ASTM A 572	50	C: $\leq 0,23$ Mn: 0,50/1,35 Si: 0,40 máx	LE: 345 MPa LR: 450 MPa AL: 21% (50 mm)
	Estrutural	ASTM A 570	36	C: 0,25 máx Mn: 0,90 máx Si: 0,40 máx	LE: 250 MPa LR: 385 MPa AL: 17% (50 mm) (50 mm, 2,40 a 5,84mm)
	Estrutural	ASTM A 588 B		C: $\leq 0,20$ Mn: 0,75/1,35 Si: 0,15/0,50 Cr: 0,40/0,70 Cu: 0,20/0,40 Ni: 0,50 máx	LE: 345 MPa ($< 101,6$ mm) LR: 450 (MPa) AL: 19% (50 mm)
	Estrutural resistente à corrosão atmosférica	NBR 5920-CFR	400	C: 0,16 máx Mn: 1,00 máx Si: 0,55 máx Cu: 0,20/0,60 Cr: 0,30/1,25 Nb: 0,080 máx V: 0,070 máx Ni: 0,65 máx	LE: 240 MPa min LR: 370 MPa máx AL: 25% (50mm)
Naval	Estrutural	ABS/DNV/BV/GL	DH36	C: 0,18 máx Mn: 0,90/1,6 Si: 0,10/0,50 Nb: 0,020/0,050 V: 0,050/0,100 Cu: 0,35 máx Ni: 0,40 máx Cr: 0,20 máx Ti: 0,020 máx Mo: 0,080 máx	LE: 355 MPa min LR: 490/620 MPa AL: 22% min impacto a -20° C 34 J (para esp. $< 50,8$ mm) Longitudinal
Automotiva	Estrutural	NBR 8650 LNE	38	C: 0,13 máx Mn: 1,10 máx Al: 0,020 min Nb: 0,12 máx V: 0,12 máx Ti: 0,20 máx Nb+Ti+V: 0,20 máx	LE: 880/930 MPa LR: 460/600 máx AL: 23% min

TABELA 12.1 - Aços planos mais usados e suas aplicações,

Continuação

Produtos Siderúrgicos

Continuação

APLICAÇÃO	TIPO	NORMA	GRAU	COMPOSIÇÃO QUÍMICA (%)	PROPRIEDADES MECÂNICAS
	Estampagem	NBR 5915	EEP	C: 0,08 máx. Mn: 0,45 máx. Al: 0,020mín	Lt: 140/1230 MPa (0,70<e<=3,00) LR: 270/350 MPa AL: 38% (0,70<e<=3,00) mín
	Estampagem (zincado)	NBR7008	ZEE	C: 0,08 máx. Mn: 0,45 máx. Al: 0,020mín	LR: 315/375 MPa Al: 30% (e=0,60) mín
Petróleo	Tubos de condução	API 5 L	X70	C: 0,26 máx. Mn: 1,65 máx. Ti: 0,06 máx. (Nb+V+Ti) máx 0,15	LE: 483 MPa mín LR: 565 MPa mín Al: 19% mín
Vasos de pressão	Tanques	ASTM A 516	60	C: 0,23 máx. (12,70 a 50,8 mm) Mn: 0,60/0,90 Al: 0,020mín	LE: 220 MPa mín LR: 415/550 MPa AL: 25% (50 mm) mín
	Botijão de gás	NBR 7460	GL2	C: 0,22 máx. Mn: 1,20 máx	LE: 230 MPa mín LR: 380 MPa mín AL: 24% (50 mm) mín
Utilidades domésticas	Fogões	NBR6651 NBR6651	EPV	C: 0,08 máx. Mn: 0,45 máx. Al: 0,020mín	LE: 275 MPa máx. LR: 370 MPa máx.
Uso geral		SAE J 403	1008	C: 0,08 máx	
		SAE J 403	1020	C: 0,18/0,23 máx	

Abreviaturas: LE: Limite de escoamento; LR: Limite de resistência; AL: Alongamento; máx: máximo; mín: mínimo; e: espessura.

APLICAÇÃO	TIPO	NORMA	GRAU	COMPOSIÇÃO QUÍMICA (%)	PROPRIEDADES MECÂNICAS
Máquinas/ Veículos	Engrenagens (cementação)	ABNT 4320		C: 0,17 a 0,22 Mn: 0,45 a 0,65 Si: 0,15 a 0,35 Cr: 0,40 a 0,60 Ni: 1,65 a 2,00 Mo: 0,20 a 0,30	No núcleo da engrenagem: 80 a 120 Kgf/mm quadrado
Construção civil	Vigas laminadas (estrutural)	ASTM A 572	50	C: <=0, 23, Mn: 0,50/1,35 Si: 0,40 máx	LE: 345 MPa LR: 450 MPa AL: 21% (50 mm)
	Estrutural (vergalhões)	NBR 7480	CA 50		LE: 500 MPa min AL: 8%
Máquinas/ Veículos	Eixos, bielas, Braço (beneficiamento)	ABNT 4130			
	Tubos sem costura, aços indústria automobilística, Eixos e virabrequins, (microligados)	DIN 38 MnV	S3	C: 0,35 a 0,40 Mn: 1,20 a 1,50 Si: 0,50 a 0,70 Cr: 0,15 a 0,25 V: 0,08 a 0,13	
	Molas	AISI 8660	H	C: 0,55 a 0,65 Mn: 0,70 a 1,05 Si: 0,15 a 0,35 Cr: 0,35 a 0,65 Ni: 0,35 a 0,75 Mo: 0,15 a 0,25	
	Rolamentos	ABNT 52100		C: 0,98 a 1,10 Mn: 0,25 a 0,45 Si: 0,15 a 0,35 Cr: 1,30 a 1,60 Ni: <=0,25 Mo: <=0,10 Cu: <=0,35	

TABELA 12.2 - Aços não-
planos mais usados e
suas aplicações
(MORAES JUNIOR,
2006).¹⁵

REFERÊNCIAS

- 1 USIMINAS. *Chapas grossas*. [S.n.t.]. [Catálogo]
- 2 BELGO MINEIRA. *Fichário técnico*. [S.n.t.]. [Catálogo]
- 3 BELGO MINEIRA. *Arames*. [S.n.t.]. [Catálogo]

- 4 FUNDIÇÃO TUPY. Disponível em: <<http://www.tupy.com.br/portugues/produtos/>>. Acesso em: 08 ago. 2006.
- 5 DIAS, L. A. M. *Estruturas de aço*. São Paulo: Zigurate, 2002.
- 6 COMPANHIA SIDERÚRGICA NACIONAL. *Aços zincados*. [S.n.t.] [Catálogo].
- 7 ICATUMETAIS. *Catálogo de produtos*. [S.n.t.].
- 8 FEM – PROJETOS, CONSTRUÇÕES E MONTAGENS S.A. *Vigas soldadas*. [S.n.t.]. [Catálogo].
- 9 COMPANHIA SIDERÚRGICA NACIONAL. *Catálogo de produtos não revestidos*. [S.n.t.].
- 10 JOST, K. Global vehicles. *Automotive Engineering*, v. 114, n. 7, p. 8-24, jul. 2036.
- 11 MANGELS. Divisão ciiindros. Disponível em: <http://www.mangels.com.br/cilindros/c_home.asp#>. Acesso em: 17 nov. 2006.
- 12 MAGNABOSCO, A. S. *Relatório interno*. Cubatão: Cosipa, 1997.
- 13 VALERINI, R. Adequação da indústria siderúrgica para atender o mercado automobilístico. In: SEMANA DA ENGENHARIA METALÚRGICA, 1996, Belo Horizonte. Belo Horizonte: Centro Acadêmico da UFMG, 1996.
- 14 SMS. *CSP (Compact strip production)*. [S.n.t.] [Catálogo].
- 15 MORAES JUNIOR, L. R. *Particularidades da produção e desenvolvimentos de aços carbono, ligados e microligados, e o contexto na terminologia siderúrgica*. IBS, 2006. [Palestra].

BIBLIOGRAFIA

- 1 AKIRA, Y.; MOREIRA, A. O aço. In: DIAS, I. A. M. *Estruturas de aço*. São Paulo: Zigurate, 2002.
- 2 YOKOJI, A. *Fabricação e aplicação de laminados planos de aço*. São Paulo: ABM, 2004. [Apostila].
- 3 MORAES JUNIOR, L. R. *Particularidades da produção e desenvolvimentos de aços carbono, ligados e microligados, e o contexto na terminologia siderúrgica*. IBS, 2006. [Palestra].

Índice Remissivo

Aciaria elétrica	169
Aço líquido	89,190,191,192,193,194,195,196,197,198,199,200,201,202,204,205
Aços	
Aço carbono	125
Aço lingotado continuamente	129
Aço plano	129,130
Aplicação	129,131,133
Beneficiamento	412
Cemeniação	412
Classificação	125
Composição	415
Endurecíveis pelo calor	411
Estampagem	411
Estruturais	409,410
Microligados	413
Molas	413
Produção brasileira	26,3 0
Propriedades	413,415
Refino	
Físico	150
Químico	151
Secundário	189,190,194,196,133,203
Resistentes a corrosão atmosférica	410
Revestidos	404,4 2
Rolamento	413
Sucata	234
Tubos	409
Usinagem fácil	313,3t4
Vasos de pressão	412
Aglomeración	
Pelotização	46
Sinterização	38
Alto-fornos	14,16,17
Carregamento	
Arriamento	70
Engaiolamento	70
Corpo	
Cadinho	59,60,63,64,65,73,80,81,82,93,94,95,99
Cuba	59,60,80,82,90,94
Goela	57,59,60,63,72,78
Rampa	59,60,65,90,94
Ventre	59,60,63,90

Índice Remissivo

Distribuição de carga	
Equipamentos	72
Drenagem dos produtos	83
Funcionamento	58
Injeção de carvão pulverizado	
Fenômenos que ocorrem na operação com baixo <i>coke rate</i>	97
Vantagens da injeção de carvão pulverizado	96
Limpeza de gases	78
Operação	
<i>Coke rate</i>	68,81,82,91,96,93
Injeção auxiliar	80
Pressão de topo	82
Temperatura de sopro	81
Umidade do ar	82,86,100
Vazão de ar	82,99,100
Vazão de oxigênio	82
Perfil térmico	73
Performance	
Consumo de combustíveis	67
Produtividade	55,66,67,68,95,98,100
Produtividade	67,99
Reações no interior do aito-forno	
Mecanismos de transferência do silício	91
Reação de Boudouard	86,87
Reações de incorporação dos elementos de liga	91
Reações de redução	71,87,88,89,90
Redução direta	90
Transferência de outros elementos para o gusa	93
Zona de elaboração	87,88,89,90
Zona de preparação	87,88
Refrigeração	
Sistemas de refrigeração por placas e por <i>Staves</i>	75
Sistema de sopro quente	62
Ventaneiras	56,59,60,61,64,65,67,68,69,73,76,79,81,82,85,86,94,95,97,99
Zonas internas	64
Zona coesiva	55
Zona de combustão	89,90,97
Zona de gotejamento	81,88,90,92
Zona granular	63,88,90
Alumínio	129,140,357
Aplainadoras	342
Aplainamento	323,341,345,346,347,348,354

Auto-redução	117,118,119
Biodiversidade	361
Briquete	110,117,120
Cal	127,132,133,134,135,136,137,139,148,153,154,155,156,159
Calcário	133,135,136,140
Calcinação	21,27,28,34,36,37
Carvão vegetal	1,2,9,10,11,12
CFC (Cloro-flúor-carbonetos)	364
Chuva ácida	363,368,369,374
Ciclo da água	370
Ciclos biogeoquímicos	362,370
Consteel	185,186
Conversor	
AOD	132
Bessemer	125,126,127,130,132
Carcaça	148
Carregamento	134,135,137,138,139,142,148
Carga sólida	134,137,138,142
Consumo específico de oxigênio	136,139,142,148
Descarbonização	139,151,152,153,155,156,157
Desfosforação	153,154,156,158
Desoxidação	125,144,156
Dessulfuração	146,154,156,158,159
Lança	132,134,136,139,140,146,147,148,149,150,154,156
LD-AC	132
OBM	132,133
Produtividade	128,130,134,138,140,143,144,154,158
Q-BOP	132,133
Refratários	150
Rendimento	34,136,144
Sopro	130,131,133,134,135,136,139,142,144,145,147,149,151,153,154,155,156,157
Amostragem	138,140,142,143
Duro	156
Escorificação	135
Macio	156
Resfriamento	142,143,144
Thomas	126,127,130
Vazamento	141,143
Coque	1,10,11,12,14,16,17
Coqueificação	21,22,50,51,52
Creep	268,269,284
Decapagem	323,325,327,334,335,336,338

Deformação plástica	309,310,320,324,325,333
Desenvolvimento sustentável	375,376,377
Desoxidantes	, 21,25,53
Dessulfurantes	21,25,26,53
Distribuidor	226
Carro distribuidor	228
Escória sintética	227
Isolante térmico	226,236
Dolomita calcinada	, 136,140
Efeito estufa	, 363,364,365,356
Energia química	178,181,185
Escória	127,132,134,135,136,137,140,141,142,143,148,151,152,153,154, 155,156,157,159,189,192,193,194,195,198,199,200,201,202
Escórias siderúrgicas	385
Ferro-esponja	104,106,107,109,110,113,120
Ferro-silício	125,126,128,134,140,151,152,154,158
Ferros-liga	23,30,194,196,197,203,204,205,207,208,211,212
<i>Finger test</i>	271
Fluorita	i 33,135,136
Fluxantes	, 23,24,53
Forjas	
Corsa	8
Catalã	, 8,9
Fornos	
Antigos	3
AOD (<i>Argon oxygen decarburization</i>)	209,210
ASEA-SKF	205,206
EOF	185
Fornos elétricos	
A arco	169,170,173,175,176,177,184
Abóbada	171,172,173,174,175
Braços condutores	203,205,207
Carçaça	169,171,179
Carregamento	170,171,176,177,179,182
Cojet	183
Eletrodo de grafite	194,203,205,206,207
Fator de potência	178,179,180
K-ES	386
Painéis refrigerados	173,175,183
Potência	
Aparente	179
Ativa	179,180
Reativa	179,180

Reatância	179
Tap to tap	178,183
Panela	194,202,203,204,205,208
Reaquecimento	320,321,323,354
Stückoven	8.9.10
Fundente	133,135,139,158
Fusão-redução	104,112,114,115,116
GEE (gases de efeito estufa)	367,368
Gestão ambiental	375,377,378,379
Gusa líquido	126,133,134,137,138,139,142,143,144,151,154,158,159
ISSO 14000	377
Laminação	
A frio	311
A quente	310,318,320,321,323
Bobinadeiras	321,323,355
Bobinas	325,324,325,326,327,334,335,336,337,338,339, 341,342,349,350,351,352,353,354,355,357
Cadeiras	317,335,336,337,357,356
Carepa	321,322
Chapas	309,310,311,312,313,314,316,318,321,322,323,324,325,326, 327,328,329,333,334,335,336,338,341,342,343,344,345,346, 347,348,349,350,352,353,354,355,356,357
Chapas grossas	401,403
Cilindros	309,310,341,312,313,314,315,316,317,321,323,324,325,326, 327,328,329,330,341,342,344,346,357,358
Encruamenio	323,324,327,337,346,349,355,357,358
Gaiola	311,313,314,317,321,322,324,325,326
Passe	310,329
Placas	318,321,331,333,340,352
Tiras	309,313,321,333,334,335,336,337,339,340,341,343,349,356,357
A frio	404
A quente	404
Tesouras	327,336,337,339,340,341,343,344
Trem de laminação	311,313,314,322,323,324,325,326
Laminadores	
Canais	330
Duo	311,312,313,325,357,358
Encruamento	337,346
Quádruo	311,313,315,317,321,324,325,326,346,357
Sendzimir	314
Tubos Mannesmann	315
Lanças supersônicas	170,181,185

Índice Remissivo

LCA (análise do ciclo de vida)	377,379,380
Legislação ambiental	386,388,390
Leito fluidizado	111
LI (licença instalação)	394
Licenciamento ambiental	393,394
Lingotamento	
Contínuo x lingotamento convencional	219
Convencional	218
De aços diferentes	247
Mistura compatível	243
Mistura incompatível	248
Lingotamento contínuo	
Barra falsa	243,244
Controle do nível de aço no molde	234
Descrição do processo	
Lubrificação da pele solidificada	222
Movimento de oscilação	222
Pó fluxante	237
Princípio básico	221
Dispositivos de proteção do aço líquido	
Tubo submerso	229
Válvula longa	229
Máquina de corte	242
Molde	
Inclinação nas placas	233
Mudança de dimensão	234
Oscilação	233
Placas	231,232
Revestimento	232
Tamanho	231
Novas tecnologias	
<i>Strip casting</i>	252
<i>Thin-slab casting</i>	251
Operação	
Extração do veio	247
Introdução da barra falsa	244
Iniciando o lingotamento	246
Selando a cabeça da barra falsa	245
Pontos empeno e desempenho da máquina	242
Qualidade dos produtos gerados	
Qualidade interna	249
Qualidade superficial	250

Resfriamento secundário	240,241
Rompimento de veio	235
Sistema de detecção	235
Suporte do veio	237
Tipos de máquina	
Dimensões produzidas	220
Perfil dos produtos	220
Torre de panela	224
LO (licença de operação)	394
LP (licença prévia)	394
Magnetita	287
Matérias-primas	
Area superficial	29,48
Densidade	27,28,29,42
Granulometria	27,32
Características	
Físicas	27
Mineralógicas	38
Químicas	30
Propriedades	
Crepitação	30,31,32,33
inchamento	30,31,32
Reatividade	31,32,37,41,50
Wedutibilidade	31,32,41,48
Resistência mecânica	30,32,40,41,44,48,49
Matriz energética	366,373
Meio ambiente	359,361,374,376,377,380,388,389,390
Minério	22,27,30,32,38,39,41,48,54
Minério de ferro	127,133,136,139,140,144
Aglomerado	22,23,27,31,32,38
Ganga	22,23,33,41
Granulado	22,38
<i>Pellet feed</i>	22
Pelota	22,27,44,46,47,48
Sínter	22,38,39,40,41
<i>Sínter feed</i>	22
Minério de manganês	133,136
Módulo de elasticidade	265,266,272,282
Normalização	323,324,326,347,348
NQ (óxidos de nitrogênio)	369,382
Panela	72,77,184,190,191,192,193,194,198,200,203,204,205, 207,208,209,210,211,213,253

Índice Remissivo

Perfil	
Laminado	401
Soldado	408
Política nacional de meio ambiente	389,390
Poluição	
Água	391,392,393
Ar	390,391
Solo	372
Processos alternativos	103
Produtos	
Arames	197,203,205,214,402
Barras	309,312,313,316,330,333,406
Chata	407
Trefilada	407
Chapas grossas	401
Fios-máquina	407
Folhas de flandres	404,405,412
Fundidos	402
Longos	406,412
Não-planos	309,310,329,331,333,401,406
Peças automotivas	410
Placas	403
Planos	309,310,313,329,331,333,334,335,347,401,403,409
Relaminados	405
Telhas de aço zincado	405
Tubos sem e com costura	408
Vergalhões	408
Qualidade de vida	361,362,389
Recozimento	311,316,323,324,325,326,327,348,349,350,351,352,353,354,355
Recursos hídricos	390,391,392
Redução direta	
A carvão	103,104,105,106,107,112,113,114,115,117,120,121,123
A redutor gasoso	104,107
Redutor	21,22,23,25,27,49,53
Refino secundário	
Acerto de composição química	190,196,198,202,205,206,207,208,210,211,212,213,214
Borbulhamento de gás inerte	191,192,200,203,204,207,208,211,213,214
CAS (<i>Composition adjustment by sealed argon bubbling</i>)	213
Controle de morfologia de inclusões	202,204,206,207
Controle de temperatura	194,203,206,207,208,210,212,213,214
Descarburação	190,199,201,204,206,208,209

Desfosforação	189,193,199,200
Desgaseificação	190,201,204,206,208,211,212
Desoxidação	190,198,199,201,204,206,207,208,210,211,212
Dessulfuração	190,200,201,204,205,206,207,208,210,211,242
Equilíbrio químico	194,195,198,199,300,201
Exaustão de fumos	203,204,205,207,208,209,211,212
insiaiações	201
IR-UT (<i>Injection refining – up temperature</i>)	212,314
Snorkel	214
Vácuo	
Adição de ferros-liga sob vácuo	204,207,208,211,212
Bombas	204,205,207,208,210,211
Câmara	204,206
DH (Dortmund-Holder-Huetten)	210
injetores	204,205,207,208,210,211
RH (Ruhrstahl – Heraeus)	210,212
Tanque	204,205,206,208,210
VAD (<i>Vacuum arc degassing</i>)	206,207
VOD (<i>Vacuum oxygen decarburization</i>)	207
Reforma	107,108,111,122
Refratários	257,258,261,262,264,265,266,267,268,269,270,272,273,275, 278,280,287,288,296,297,299,300,382,386
Abrasão	265,267,258
Alta-alumina	260,267
Alumina-zircônia-sílica	289
Aluminato de cálcio	279
Aluminosos	260,276,277,298,299,301
Andalusita	250,262,278
Antiioxidantes	260,290,291,292
Basicidade	260,270,283,286,291
Cianita	260,262,278
Cristobalita	275,276,277
Cromita	262,287,289
Cromo-magnesianos	260,286,288,289
Densidade	259,264,265
Dilatação térmica	271,272,282
Doloma	260,284,286,290
Doloma-zircônia	289
Dolomita	260,262,282,284,285
Dolomíticos	285,286,287
Enstatita	287
Erosão	265,267,293,294,298

Redução de Minério de Ferro em Altos-Fornos

A equação (3.11) é chamada reação de redução direta e é altamente endotérmica em contraste com a redução indireta e, além disso, consome e degrada o coque. A vantagem da redução direta é que ocorre com consumo menor de carbono para cada mol de oxigênio removido, porque, o produto da reação é o CO , que pode realizar novas reações de redução.

Para minimizar as necessidades térmicas do alto-forno é vantajoso que a redução indireta ocorra preferencialmente à redução direta, já que a primeira gera calor e a segunda consome calor. A introdução do hidrogênio, como um componente do combustível injetado, move as condições de equilíbrio entre as reações na direção da redução indireta.

Além da redução direta, outras reações que podem ocorrer na zona de elaboração são a redução direta dos óxidos das impurezas, dessulfuração do gusa, reação de formação de gás d'água, combustão do carbono, redução da umidade do sopro etc.

A Tabela 3.5 resume as principais reações que são o comportamento térmico das várias regiões do alto-forno.

TABELA 3.5 -
Comportamento químico
e térmico nas várias
zonas do alto-forno

REGIÃO	COMPORTAMENTO QUÍMICO	COMPORTAMENTO TÉRMICO
Homem Morto (Cadinho e Rampa)	Saturação do gusa com carbono e redução final dos óxidos de impurezas.	O gotejamento de gusa e escória transfere calor para o cadinho.
Zona de Combustão	O carbono do coque é oxidado para CO_2 e então para CO .	Grande geração de calor pela combustão do coque.
Zona de Gotejamento (Rampa e Ventre)	Óxidos de impurezas são reduzidos e o ferro absorve carbono durante a percolação através do leito de coque.	Transferência de calor dos gases ascendentes para o coque e as gotas de ferro e escória descendentes.
Zona Coesiva (Rampa e Ventre e Baixa Cuba)	Formação e fusão da escória, redução final do FeO a Fe e formação das gotas de metal líquido.	Transferência de calor dos gases ascendentes para os sólidos em fusão.
Início da Zona de Elaboração (Baixa Cuba e Ventre)	Redução do FeO e Gaseificação do Coque (Bourdouard).	A temperatura do gás ascendente cai rapidamente devido à endotermicidade da Gaseificação do coque (Bourdouard).
Zona de Reserva Térmica (Média e Baixa Cuba)	Ocorre predominantemente a redução indireta do FeO .	Variação mínima de temperatura ao longo da região, pois a redução indireta da wüstita é fracamente exotérmica.
Região Superior da Zona Granular (Alta e Média Cuba)	Redução do Fe_2O_3 e Fe_3O_4 para FeO .	A temperatura dos gases diminui rapidamente devido à transferência de calor para os sólidos carregados. A evaporação da umidade da carga também rouba calor.