
Prefácio

O alto forno pode ser descrito com base em vários pontos de vista. Um engenheiro mecânico descreveria o forno como uma carcaça de aço resistente com um revestimento refratário e um sistema de refrigeração, que de qualquer forma é facilmente atacado pelos desafios operacionais. Um engenheiro químico enfatizaria a abundância de reações químicas que ocorrem dentro do forno. Um operador salientaria os distúrbios freqüentemente encontrados ao operar o alto forno. O presente livro tenta conciliar os vários pontos de vista. O processo do alto forno, ou seja, o que está acontecendo dentro do forno, é tomado como um ponto de partida. O motivo para se escrever este livro foi que, em nossa visão, a otimização da operação de um alto forno não está apenas baseada em experiências que mostram as melhores práticas, mas também no entendimento conceitual do porque alguma coisa funciona ou não. Em outras palavras, a melhoria operacional não está baseada somente em know-how (saber como), mas também em know-why (saber o porque). Esta é a abordagem por nós usada no presente livro. Os autores têm sido envolvidos em muitos programas de melhoria operacional e situações especiais de altos fornos em todo o mundo. Eles desenvolveram seus próprios entendimentos de processo. O presente livro está baseado na experiência deles de transferir seus conhecimentos para os operadores de altos fornos. Nós temos uma grande obrigação legal e moral com o pessoal com que trabalhamos. O livro não teria sido escrito sem o apoio prolongado da Danieli Corus BV e Corus IJmuiden em promover entendimento operacional de alto forno e Edo Engel de XLmedia pela edição. Não obstante, somos imensamente gratos aos nossos diversos colegas em todo o mundo, especialmente na Acesita, Brasil.

Cidade de IJmuiden, Outubro de 2004
Maarten Geerdes
Cor van der Vliet
Hisko Toxopeus

Conteúdos

Prefácio	i
Lista de Símbolos e Abreviações	vi
Capítulo 1 Introdução ao processo de alto forno	1
1.1 O que impulsiona o forno?	3
1.2 O Equipamento	5
1.3 Visão geral do Livro	9
1.4 Exercícios.....	9
Capítulo 2 O alto forno: conteúdo e fluxo de gás	11
2.1 A geração de gás e permeabilidade da carga	11
2.2 Eficiência do forno	15
2.3 Exercício: fluxo de gás e o conteúdo de um alto forno	15
Capítulo 3 A carga de minério: sínter, pelotas e minério calibrado	17
3.1 Introdução	17
3.2 Exigências de qualidade para a carga do alto forno	18
3.3 Sínter.....	21
3.4 Pelotas	29
3.5 Minério calibrado.....	32
Capítulo 4 Coque	33
4.1 Funções do coque.....	34
4.2 Qualidade do coque	34
4.3 Produção de Coque	36
4.4 Qualidade do coque no alto forno	37

Capítulo 5 Injeção de carvão e outros combustíveis auxiliares	39
5.1 Injeção de carvão: equipamento	40
5.2 Especificação de carvão	41
5.3 Injeção de carvão nas ventaneiras	41
5.4 Controle de processo com Injeção de Carvão Pulverizado	43
5.5 Controle do fluxo de gás	45
5.6 Simetria circunferencial da injeção	45
5.7 Outros combustíveis	46
Capítulo 6 Cálculo da carga e balanços de massa	47
6.1 Introdução	47
6.2 Cálculo da carga: pontos de partida	47
6.3 Um exemplo de cálculo de carga.....	49
6.4 Cálculos de processo: um balanço de massa simplificado.....	49
Capítulo 7 O processo: descida da carga e controle do fluxo de gás.....	55
7.1 Descida da carga: onde é criado o vazio?	55
7.2 Descida da carga: sistema de forças verticais.....	57
7.3 Fluxo do gás no alto forno	58
7.4 Fluidização e canalização (formação de chaminés)	66
7.5 Distribuição da carga	66
7.6 Descida anormal da carga e fluxo de gás.....	71
7.7 Instrumentação do alto forno	74
7.8 Controle operacional diário do alto forno	74
Capítulo 8 Produtividade e eficiência do alto forno.....	77
8.1 A zona de combustão	77
8.2 Óxidos de carbono e de ferro	79
8.3 Perfil da temperatura.....	87
8.4 Simetria circunferencial e redução direta.....	87
Capítulo 9 Metal quente e escória.....	91
9.1 Metal quente e a aciaria.....	91
9.2 Composição do metal quente	92
9.3 Redução do silício	93
9.4 Enxofre no metal quente	94
9.5 Escória	95
9.6 Interações do metal quente e escória: propriedades da escória em situações especiais.....	98
Capítulo 10 Operação da casa de corrida	101
10.1 Objetivos da operação da casa de corrida	101
10.2 Layout da casa de corrida.....	102
10.3 Prática com cadinho seco e operação com um furo de corrida.....	103
10.4 Abertura e tamponamento do furo de corrida	105
10.5 Nível líquido do cadinho e operação da casa de corrida	107

Capítulo 11 Situações especiais	109
11.1 Paradas e partidas	109
11.2 Abaixamento de carga	110
11.3 Acendimento inicial (blow-in) de forno novo	112
Anexos	115
Anexo I Leitura adicional	115
Anexo II Referências	116
Anexo III Respostas aos exercícios.....	117
Anexo IV Regras gerais	120
Índice Remissivo.....	121

Lista de Símbolos e Abreviações

B2, B3, B4	basicidade, relação de dois, três ou quatro componentes
bar	pressão, relacionado à atmosfera
C	carbono
cm	centímetro
CO	monóxido de carbono
CO ₂	dióxido de carbono
CRI	índice de reatividade de coque
CSR	dureza de coque depois da reação
Fe	ferro
GJ	giga joule
H ₂	hidrogênio
H ₂ O	água
HGI	índice de abrasividade de Sulco
HOSIM	hoogovens simulatie (simulação de alto forno)
HV	alta volatilidade
IISI	International Iron & Steel Institute
ISO	International Organisation for Standardization
JIS	Japanese Industrial Standard
K	potássio
kg	quilograma
kmole	quilomole
LV	baixa volatilidade
m ³ STP	metro cúbico em temperatura e pressão normais
mm	milímetro
Mn	manganês
Mt	milhão toneladas
N ₂	nitrogênio
Na	sódio
O ₂	oxigênio
P	fósforo
RAFT	temperatura adiabática da chama na zona de combustão
RR	taxa de reposição
Si	silício
Standard Coke	coque com 87,5% carbono
t	tonelada
tMQ	tonelada de metal quente
Ti	titânio
VDEh	Verein Deutscher Eisenhüttenleute
VM	materiais voláteis

Capítulo 1

Introdução ao processo de alto forno

Duas rotas diferentes de processo estão disponíveis para a produção de produtos de aço: a rota de produção de aços por alto forno–oxigênio e a produção por arco elétrico. Ambas as rotas se diferem com relação aos tipos de produtos que podem ser feitos, da mesma forma que as matérias–primas usadas. A rota de produção de aços por alto forno–oxigênio produz, em sua maioria, produtos planos, ao passo que a produção por arco elétrico está mais voltada para produtos longos. A primeira usa, em especial, coque e carvão como combustíveis e sinter e pelotas como materiais contendo ferro, ao passo que a segunda usa energia elétrica para fundir sucata. Ambas as rotas foram desenvolvidas e a tendência é que os fornos elétricos a arco estão se evoluindo para serem capazes de produzir também os produtos planos. A despeito de tudo isto, a produção de aços acontece em nível mundial, primeiramente via a rota de produção “alto forno–oxigênio” conforme mostrado na Figura 1.

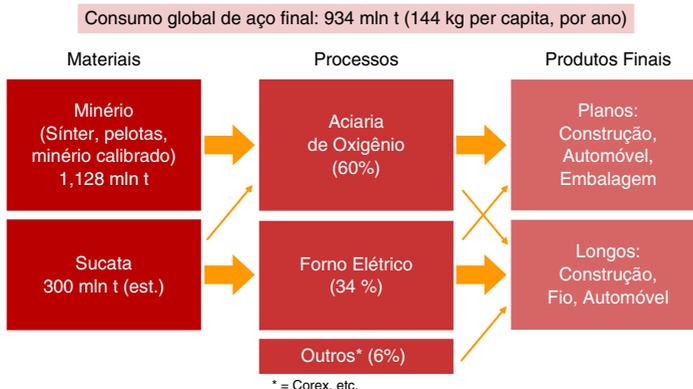


Figura 1: Visão geral das rotas de produção de aços e matérias–primas
(Fonte IISI Steel Statistical Yearbook, 2003)

1 – Introdução ao processo de alto forno

O metal é produzido num alto forno, de onde é transportado sob a forma de metal líquido quente para a aciaria. Lá, ocorre o refinamento do metal quente em aço, por meios da remoção de elementos tais como enxofre, silício, carbono, manganês e fósforo. O bom desempenho da aciaria requer uma qualidade consistente do metal quente, sob uma dada especificação. Tipicamente, um teor de silício entre 0,3% e 0,7%, manganês entre 0,2% e 0,4%, fósforo de 0,06% e uma temperatura a mais alta possível são usados.

O presente livro descreve como uma qualidade consistente e boa do metal quente pode ser obtida do alto forno.

No processo do alto forno, minério de ferro e combustíveis (coque, carvão) são transformados em metal quente e escória. O metal quente e a escória não se misturam, ficando separados um do outro, a escória flutua acima do ferro mais denso. O ferro pode ser separado da escória na casa de corrida. Como ocorre a produção de metal quente?

Primeiramente, consideremos por um instante, o conteúdo de um alto forno. O minério e o coque são carregados em camadas separadas no topo do forno. Com base em estudos de fornos resfriados, torna-se claro que, as camadas de minério e coque são mantidas até que as temperaturas sejam altas num ponto em que o minério começa a amolecer e a se fundir. Fornos resfriados são “congelados em ação” com a ajuda de água ou nitrogênio. Um exemplo de alto forno resfriado é mostrado na Figura 2. O alto forno resfriado mostra claramente a estrutura de camadas das camadas de coque e minério e, por uma análise adicional, informações sobre o aquecimento e fusão dos materiais de minério, bem como o progresso das reações químicas obtidas.

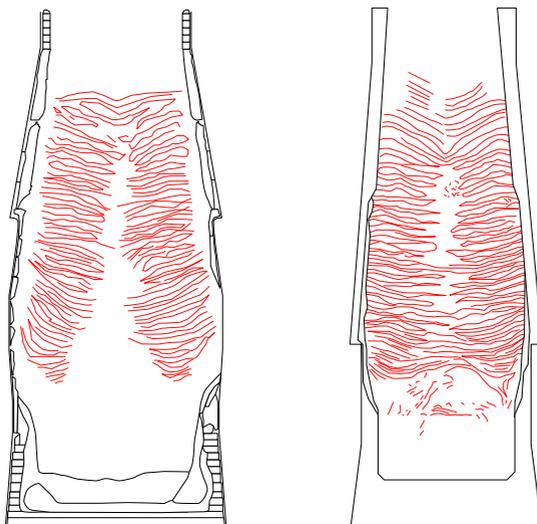


Figura 2: Dissecções de altos fornos resfriados (Base: Omori et al, 1987)

1 – Introdução ao processo de alto forno

Um alto forno em operação contém a qualquer momento, de cima para baixo, conforme indicado na Figura 3:

- Camadas de minério e coque.
- Uma área onde o minério começa a se amolecer e fundir (zona de amolecimento–fusão).
- Uma área onde existe apenas coque e ferro/escória líquidos: é chamada de zona de “coque ativo” ou zona de gotejamento.
- O homem morto: o coque no cadinho do forno.

O alto forno possui uma forma cônica típica. As seções do topo para baixo são:

- Goela, onde se encontra a superfície da carga.
- A cuba.
- A rampa paralela ou ventre.
- A rampa.
- O cadinho.

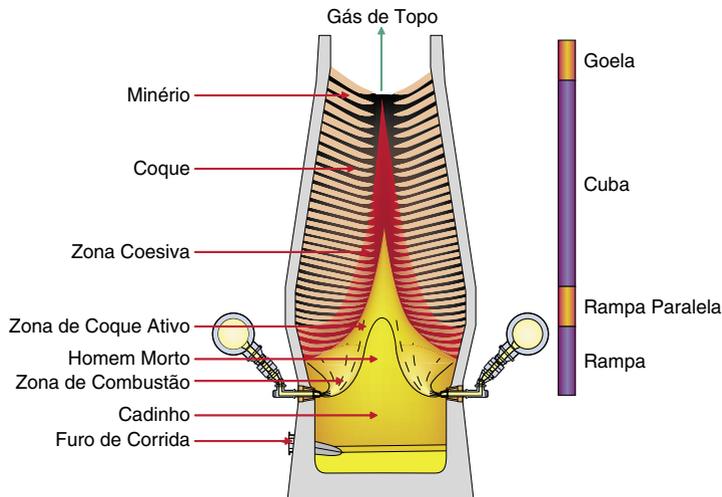


Figura 3: As zonas em um alto forno

1.1 O que impulsiona o forno?

1.1.1 Descrição do Processo

A força impulsora do alto forno está ilustrada na Figura 4 (próxima página)

- A alto forno é cheio com camadas alternadas de coque e da carga contendo minério de ferro.
- O jato de ar quente é soprado para dentro do alto forno via ventaneiras. A ventaneira é uma peça–suporte de cobre refrigerada a água – 12 polegadas em fornos menores, 40 em fornos maiores – através da qual o vento quente (até 1.200°C ou acima) é soprado para dentro do forno.

1 – Introdução ao processo de alto forno

- O jato de ar quente queima combustível (coque, assim como os combustíveis auxiliares injetados via ventaneiras). Neste processo de queima, o oxigênio do vento é transformado em monóxido de carbono (gás CO). O gás resultante possui uma alta temperatura de chama (2.100 – 2.300°C). A combustão do combustível consome o coque na frente das ventaneiras, criando vazios (lacunas).
- O gás muito quente ascende pelo forno e, durante sua ascensão, ele:
 - Aquece o coque na região da rampa/ventre.
 - Causa a fusão do minério de ferro na carga, criando vazios.
 - Aquece o material na região da cuba do forno.
 - Remove parte do oxigênio da carga por reações químicas.
- Em sua fusão, o minério de ferro produz metal quente e escória, o qual goteja caindo pela zona de coque até alcançar o cadinho, de onde ele é removido correndo por um furo de corrida. Na zona de gotejamento, o metal quente e a escória consomem coque, criando vazios.

O alto forno pode ser considerado como um trocador de calor de contra-corrente e massa: o calor é transferido do gás para a carga, oxigênio da carga para o gás. O gás sobe pelo forno, enquanto a carga e o coque descem pelo forno. O gás transfere calor para a carga e simultaneamente o oxigênio é transferido da carga para o gás. A característica de contra-corrente do processo o faz extremamente eficiente.

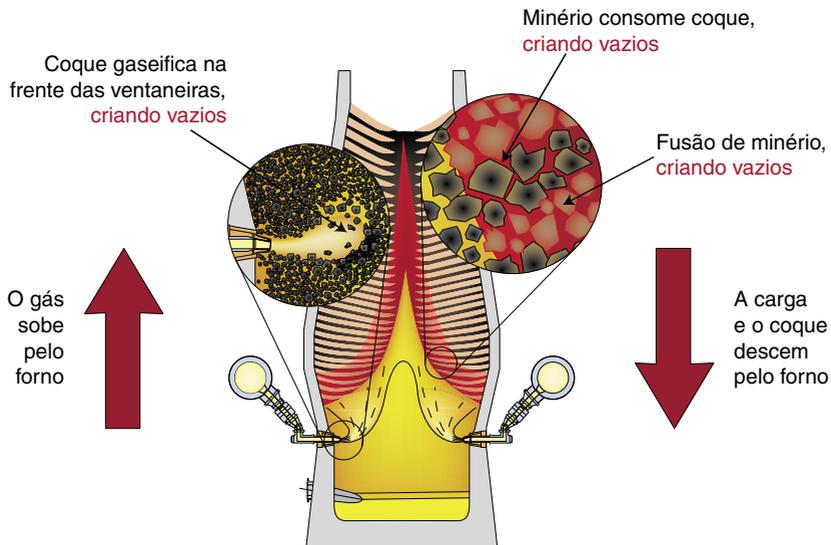


Figura 4: Força impulsora de um alto forno. O processo de contra-corrente cria vazios nas áreas indicadas fazendo com que a carga desça

Um exemplo típico do perfil de temperatura no alto forno é mostrado na Figura 5. É mostrado que a zona de amolecimento/fusão está localizada numa região em que as temperaturas vão de 1.100 a 1.450°C. As diferenças de temperatura são grandes.

1 – Introdução ao processo de alto forno

No exemplo, os gradientes de temperatura são maiores na direção horizontal do que na direção vertical, o que será explicado no capítulo 7.

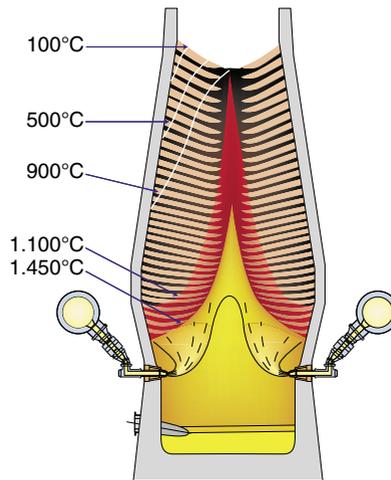


Figura 5: Perfil de temperatura num alto forno (exemplo típico)

1.2 O Equipamento

1.2.1 Visão geral do equipamento

Uma visão geral dos equipamentos principais usados no processo de um alto forno é apresentada na Figura 6. Estes incluem:

- Regeneradores. O jato de ar quente (temperatura de 1.000–1.200°C) é produzido nos regeneradores e é entregue ao forno por meios de uma linha principal de vento quente, pelo anel de vento e através das ventaneiras. O jato de ar quente reage com o coque e combustíveis auxiliares.
- Casa dos silos. Os materiais da carga e o coque são descarregados na casa dos silos. Os materiais são peneirados antes de serem pesados para descarga no forno. A casa dos silos é operada automaticamente. As correções de umidade no coque normalmente são feitas automaticamente. Por meios de caçambas de carregamento (skips), ou via correia transportadora, os materiais da carga e o coque são levados ao topo do forno, onde são descarregados para dentro do forno em camadas separadas de carga de minério e coque.
- Lavagem de Gás. O gás do topo sai do forno pelos coletores ascendentes e um tubo de descida de gás. Uma vez que o gás do topo contém muitos finos, este gás é passado por um coletor de pó e sistema de lavagem de gás.
- Casa de Corrida. O ferro e a escória se concentram no cadinho do forno, de onde são vazados por meios da casa de corrida e coletados em torpedos ou panelas.
- Granulação de Escória. A escória na maioria dos casos é granulada, o que significa resfriá-la com água. A escória granulada pode ser usada para a fabricação de cimento.

1 – Introdução ao processo de alto forno

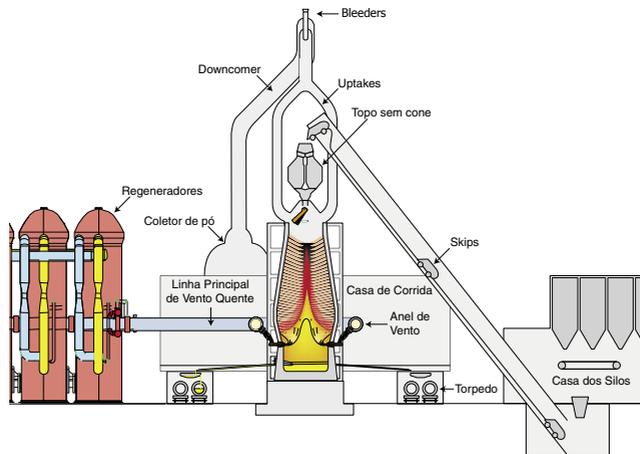


Figura 6: Arranjo geral de um Alto Forno

O topo do alto forno é fechado, tendo em vista que os altos fornos modernos operam com uma alta pressão de topo. Existem dois sistemas diferentes:

- O sistema de duplo cone. Para propósitos de distribuição de carga, freqüentemente equipados com uma blindagem móvel.
- O topo sem cone (bell-less top), o qual permite uma distribuição mais fácil da carga.

Ambos os tipos de topos são sistematicamente mostrados na Figura 7.

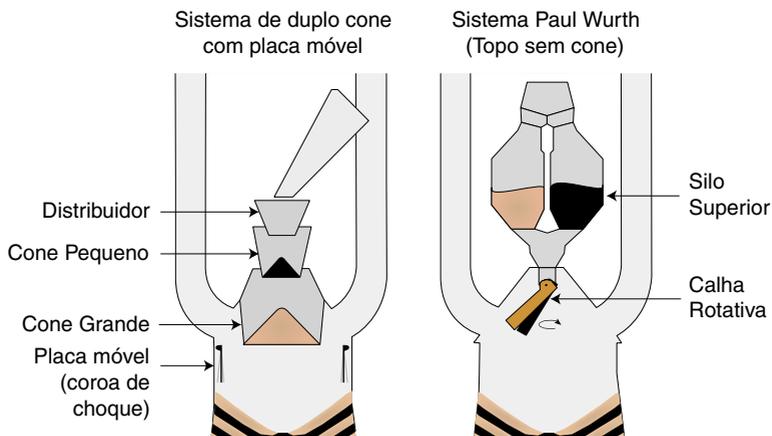


Figura 7: Topos de altos fornos

1.2.2 Construção do alto forno

Existem basicamente duas técnicas de construção para suportar altos fornos. O projeto clássico é o suporte em direção ao anel de suporte da cuba (maratra), no extremo mais baixo da cuba. O topo do forno se apóia no anel de suporte da cuba. A outra técnica é uma construção auto-portante, permitindo uma sustentação especial do topo do alto forno e do sistema de gás. A expansão necessária para a instalação se encontra, nos fornos por concepção por anel de suporte, abaixo do anel, ou seja, na região da rampa/ventre, ao passo que o compensador de expansão no forno auto-portante se encontra no topo, conforme indicado na Figura 8.

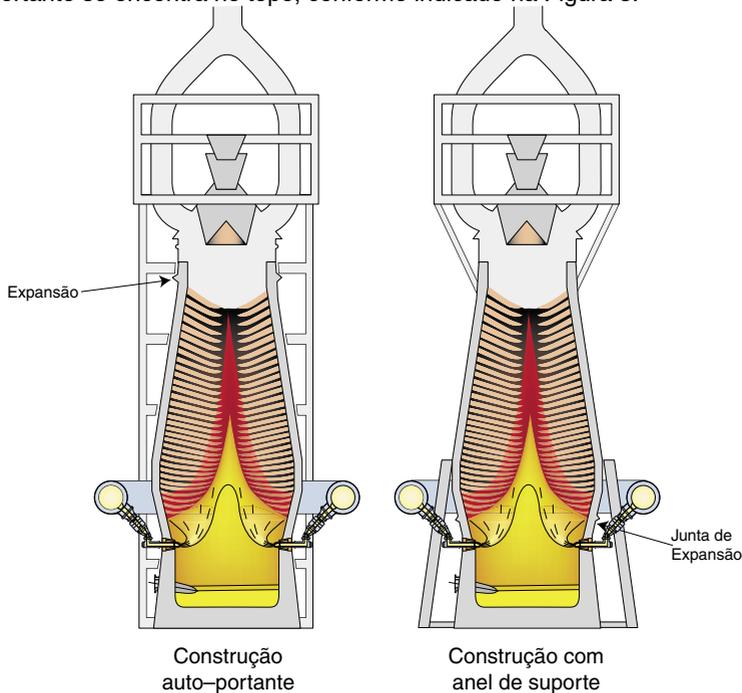


Figura 8: Construções de altos fornos

1.2.3 Evolução dos altos fornos

Os altos fornos evoluíram consideravelmente em tamanho durante o século XX. No início do século XX, os altos fornos tinham um diâmetro de cadinho de 4 a 5 metros e produziam próximo de 100.000 toneladas de metal quente por ano, na maioria a partir de minério calibrado e coque. Ao final do século XX, os maiores altos fornos tinham de 14 a 15 metros de diâmetro do cadinho e estavam produzindo de 3 a 4 milhões de toneladas por ano. Uma evolução típica dos altos fornos é mostrada na Tabela 1 para a situação da usina siderúrgica de IJmuiden, nos Países Baixos.

1 – Introdução ao processo de alto forno

Tabela 1: Evolução dos altos fornos na Corus IJmuiden, Países Baixos

Alto forno nº		1	2	3	4	5	6	7
Diâmetro Cadinho	m	4,8/5,6	4,8/5,6	5,2/5,9	8,5	8/9	10/11	13/13,8
Volume de Trabalho	m³	519	519	598	1.413	1.492	2.328	3.790
Ano de Construção		1924	1926	1930	1958	1961	1967	1972
Produtividade Inicial	t/d	280	280	360	1.380	1.700	3.000	5.000
Produtividade mais recente	t/d	1.000	1.000	1.100	3.500	3.700	7.000	10.500
Última Reforma							2002	1991
Demolido em		1974	1974	1991	1997	1997		

O tamanho de um alto forno é frequentemente expresso como o tamanho de seu cadinho ou como seu “volume de trabalho” ou “volume interno”. O volume de trabalho é o volume do alto forno disponível para o processo, ou seja, o volume entre as ventaneiras e o nível da carga. As definições de volume de trabalho e volume interno são apresentadas na Figura 9.

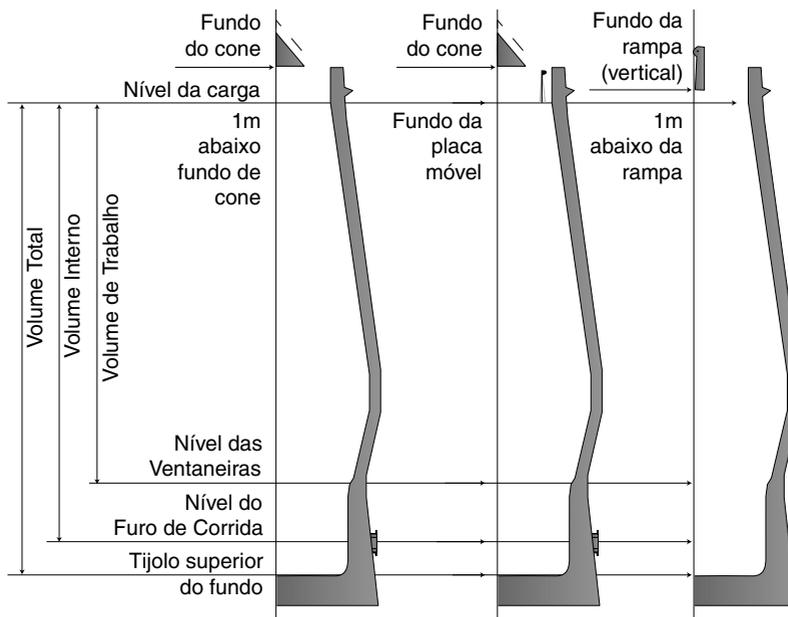


Figura 9: Definições de volume de trabalho e volume interno

1.3 Visão geral do Livro

A produção de ferro em altos fornos pode ser discutida a partir de três perspectivas diferentes:

- A abordagem operacional: discutindo o alto forno seus distúrbios operacionais.
- A abordagem da tecnologia química: discutindo o processo da perspectiva do tecnólogo que analisa o progresso das reações químicas e balanços de calor e massa.
- A abordagem da engenharia mecânica: focando no equipamento.

A ênfase do presente livro é a “visão do operador”, com um forte desejo de entender o que ocorre dentro do alto forno. Dentro desta abordagem, os princípios do processo são discutidos (Capítulo 2) seguidos pelas exigências de qualidade da carga (Capítulo 3) e coque e combustíveis auxiliares (Capítulos 4 e 5). Cálculos simplificados para a carga e gás de topo são feitos (Capítulo 6). O controle de processo é discutido no Capítulo 7: descida da carga e controle de vazão do gás. As questões pertinentes ao entendimento da produtividade e eficiência do alto forno são apresentadas no Capítulo 8. Subseqüentemente, a qualidade do metal quente e da escória (Capítulo 9), operação da casa de corrida (Capítulo 10) e situações especiais como paradas e entradas em marcha (Capítulo 11) são discutidas.

1.4 Exercícios

Os exercícios referem a um alto forno grande e moderno, operado com injeção de carvão pulverizado, e equipado com uma alta pressão de topo e alta temperatura do vento quente. O forno possui um volume de trabalho de 3.800 m³ e 4 furos de corrida.

O forno está produzindo 10.000 ton/dia e um volume de escória de 25%, ou seja, 250 kg/ton. Como combustível, o forno usa 300 kg de coque por tonelada de metal quente (tMQ) e 200 kg de carvão pulverizado injetado (ICP).

Perguntas:

1. O Instituto Internacional da Indústria do Aço (IISI) estima que a produção mundial de ferro gusa era de 575,7 milhões de toneladas em 2001. Quantos “fornos modernos” são necessários para produzir esta quantidade? E, se existirem 3 destes fornos em uma área de redução, quantas áreas de produção de ferro gusa são necessárias?
2. Calcule o fluxo anual de pelotas e carvão para tal área considerando a quantidade produzida de produtos acabados de aço:
 - a) A partir de 1 tonelada de ferro, 1,1 toneladas de aço líquido são produzidas e 0,9 tonelada de produtos acabados de aço.
 - b) Para 1 tonelada de ferro são necessárias 1,6 toneladas de pelotas.
 - c) O coque é produzido em plantas locais de coque. O carvão é gaseificado em 25% antes de ser transformado em coque.
 - d) Suponha um rendimento de 100% para a injeção de carvão.



Capítulo 2

O alto forno: conteúdo e fluxo de gás

2.1 A geração de gás e permeabilidade da carga

O alto forno é um reator de contra corrente. A força impulsora é o jato de ar quente que queima o coque nas ventaneiras. Neste capítulo, nós analisamos em melhores detalhes o fluxo de gás pelo forno. A carga se consiste de camadas alternadas de carga de minério (sínter, pelotas, minério calibrado) e coque. A carga é carregada fria e úmida no topo do forno, ao passo que nas ventaneiras o jato de ar quente queima o coque quente. Pela altura do forno (22 a 25 metros das ventaneiras a superfície da carga) a temperatura do gás cai de uma temperatura de chama de 2.200°C para uma temperatura de gás de topo de 100 a 150°C.

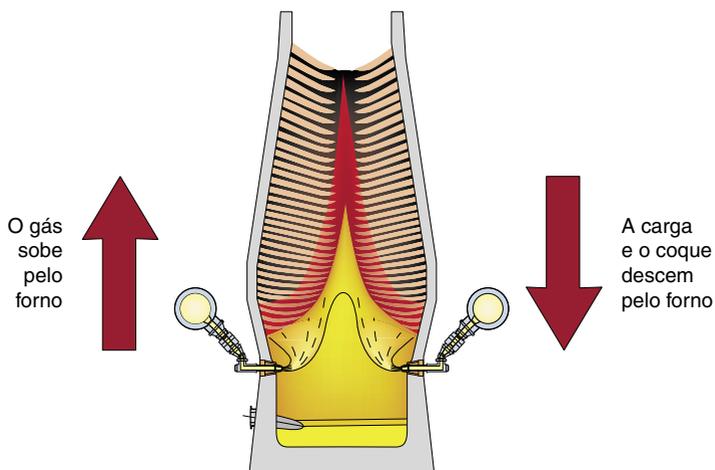


Figura 10: O alto forno como um reator de contra corrente

2 – O alto forno: conteúdo e fluxo de gás

O processo começa com o jato de ar quente pelas ventaneiras, o que queima o coque e carvão na zona de combustão (Figura 10). A queima do coque cria gás quente, o qual é capaz de fundir a carga de minério. A queima do coque e a fusão da carga de minério criam espaço dentro do forno, o qual é preenchido com a carga e coque sob descida. A produção de um alto forno está diretamente correlacionada com a quantidade de coque queimada na frente das ventaneiras, porque uma quantidade fixa de carga de minério é carregada para cada tonelada de coque. Numa situação estacionária, o metal quente é produzido assim que o coque é usado.

O oxigênio no vento quente irá queimar o coque convertendo em monóxido de carbono (CO). Para cada molécula de oxigênio, são formadas 2 moléculas de monóxido de carbono. O ar contém 21% de oxigênio. Se o vento quente for enriquecido com oxigênio, para se chegar a um teor de 25% de oxigênio, então cada metro cúbico (m³) de oxigênio irá reagir para 2 m³ de CO. Desta forma, se o vento quente tiver 75% de nitrogênio e 25% de oxigênio, o gás na rampa se consistirá de $75\% / (75 + 2 \cdot 25) = 60\%$ de nitrogênio e 40 % gás CO. Além disto, uma enorme quantidade de calor é gerada na zona de combustão, devido ao fato do coque e o carvão (ou óleo, gás natural) serem queimados. O calor leva a uma alta temperatura da chama, a qual fica normalmente em torno de 2.000 – 2.300°C. Uma vez que esta temperatura é mais alta do que a temperatura de fusão do ferro e da escória, o calor no gás quente pode ser usado para fundir a carga. A temperatura de chama será discutida em melhores detalhes na seção 7.1.3.

O gás quente sobe pelas camadas de minério e coque. Se houvesse apenas coque no alto forno, a composição química do gás não mudaria, porém, o gás se esfriaria, devido ao fato dele estar em contato com as camadas mais frias de coque na parte mais alta do forno. Uma apresentação do gás fluindo por um alto forno carregado de coque é apresentada na Figura 11. O fluxo de gás tem um caráter de fluxo de sustentação. Para o operador de alto forno experiente, um forno carregado apenas com coque pode parecer um conceito teórico. Todavia, em algumas situações práticas, como o acendimento inicial (blow-in) de um novo forno ou ao tirar um forno de operação por um longo tempo (abafamento) o forno é quase que completamente enchido com coque.

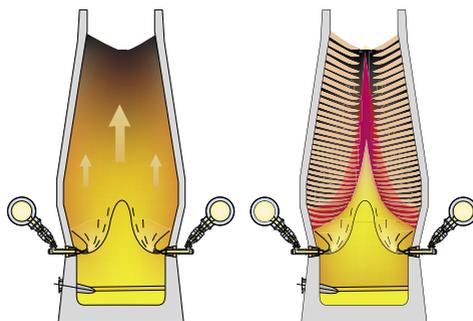


Figura 11: Fluxo de gás em forno carregado apenas com coque e carregado com camadas alternadas de coque e minério.

2 – O alto forno: conteúdo e fluxo de gás

Na situação normal de operação, o forno é carregado com camadas alternadas de coque e minério. Aproximadamente 35–45 camadas de minério estão presentes no coque. É importante notar que a permeabilidade do coque é muito melhor que a permeabilidade do minério. Ela é causada pelo fato de que o coque é muito mais grosso do que o sínter e pelotas, e devido à fração de vazio dentro da camada de coque ser mais alta. Por exemplo, o tamanho médio do coque num alto forno é tipicamente de 45–50 mm, ao passo que o tamanho médio do sínter é de 14 a 20 mm e das pelotas de 10 a 12 mm.

Conseqüentemente, as camadas da carga determinam como o gás flui pelo forno, enquanto que as camadas de coque funcionam como distribuidores de gás.

Se o gás flui da rampa para cima, o que acontece com o gás, à medida que ele gradualmente se esfria?

Primeiro: o calor acima de uma temperatura de aproximadamente 1.400°C – que é a temperatura de fusão da escória – é transferido para as camadas da carga e de coque, fundindo a carga de minério. O mesmo se aplica para o calor acima de um nível de temperatura de 1.100°C, porém, a carga não se funde por completo, e sim, amolece e os constituintes grudam uns aos outros. Na zona de amolecimento e fusão o oxigênio restante é removido da carga. Tipicamente, para cada átomo de ferro existe 0,5 átomo de oxigênio de resto. O oxigênio reage com o coque e gera monóxido de carbono adicional. Esta é a denominada reação de redução direta (Capítulo 8), a qual ocorre somente na parte mais baixa do forno.

O gás agora se esfriou para aproximadamente 1.100°C, sendo que gás adicional foi gerado. Uma vez que a reação de redução direta custa muita energia, a eficiência do forno depende em muito da quantidade de oxigênio removido dos materiais da carga antes de alcançar esta temperatura de 1.100°C. Em resumo:

- O calor é transferido do gás para a carga, a qual se funde (>1.400°C) ou se amolece (>1.100°C).
- O oxigênio residual na carga é removido pela reação com o coque e CO adicional é gerado. Isto é conhecido como reação de redução direta.

Ao se esfriar ainda mais, o gás é capaz de remover oxigênio do material da carga, ao passo que produz dióxido de carbono (CO₂). Quanto mais oxigênio é removido, mais eficiente é o forno. Abaixo de temperaturas de 1.100°C ocorre o seguinte:

- O calor é transferido do gás para a carga.
- O gás CO₂ é gerado a partir do gás CO, enquanto a quantidade de oxigênio da carga é reduzida. Desta forma, ela é chamada de reação de redução de gás. Nenhum gás adicional é gerado. Na literatura técnica, ela às vezes é chamada de “redução indireta” ao contrário da “redução direta”.
- Uma reação similar ocorre com o hidrogênio. O hidrogênio pode remover oxigênio da carga formando água (H₂O).

Na parte mais alta do forno, a umidade na carga e no coque é evaporada e eliminada da carga antes que as reações químicas ocorram.

2 – O alto forno: conteúdo e fluxo de gás

Se nós seguirmos a carga e o coque em seus percursos descendentes, a carga e o coque são gradualmente aquecidos. Primeiramente a umidade se evapora e à aproximadamente 500°C, a remoção do oxigênio é iniciada. Um esquema simplificado da remoção de oxigênio da carga é mostrado na Figura 12.

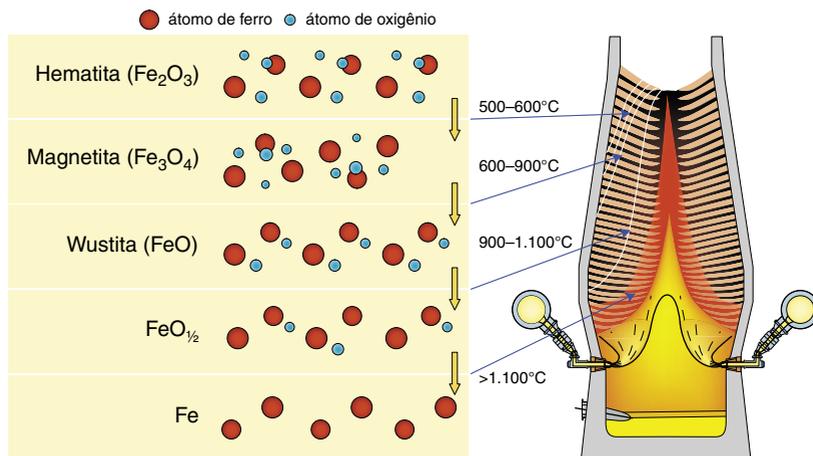


Figura 12: Apresentação esquemática da redução de óxidos de ferro e temperatura

O primeiro passo é a redução da chamada hematita (Fe_2O_3) para magnetita (Fe_3O_4). A reação de redução gera energia, assim, ela ajuda a aumentar a temperatura da carga. Além disso, a reação de redução cria tensão na estrutura cristalina do material da carga e a estrutura cristalina poderá quebrar em partículas menores. A propriedade é chamada de degradação em baixa temperatura. Vários testes estão disponíveis para se quantificar os efeitos (ver capítulo 3). Mais embaixo no forno, a temperatura da carga aumenta gradualmente até que a carga comece a se amolecer e fundir na zona coesiva. O ferro e a escória sob fusão são coletados no cadinho.

Nós agora consideramos a interação entre o gás e a carga de minério. Quanto mais o gás remove oxigênio da carga de minério, mais eficiente é o processo do alto forno. Conseqüentemente, o contato entre o gás e a carga de minério é muito importante. Isto significa que a permeabilidade da carga de minério tem que ser boa, e que, a taxa do gás fluindo pela carga de minério e a quantidade de oxigênio a ser removido da carga tem que ser balanceada. Por outro lado, os óxidos de ferro têm que ser “razoavelmente” redutíveis. Porém, os óxidos de ferro só são redutíveis se em contato com o gás.

A experiência tem mostrado que muitos problemas em altos fornos são consequência das camadas de minério deficientemente permeáveis. Assim, a permeabilidade das camadas de minério sobre o diâmetro do forno é uma questão de grande relevância. A permeabilidade da camada de minério é, em muito, determinada pela quantidade de finos (< 5 mm) na camada. A grande parte dos finos vem do sinter, se carregada no forno.

2 – O alto forno: conteúdo e fluxo de gás

O problema com a quantidade de finos no forno é que os finos tendem a se concentrar nos anéis do forno. Os finos são carregados no forno e concentrados no ponto de impacto onde a carga é entrada, ou são gerados por redução–degradação de baixa temperatura. Assim, é importante peneirar adequadamente os materiais da carga, normalmente com peneiras de 5 ou 6 mm na casa dos silos, e controlar as características da redução–degradação de baixa temperatura da carga.

2.2 Eficiência do forno

A eficiência – considere como sendo a taxa de combustível por tonelada de metal quente – do processo do alto forno é continuamente monitorada medindo–se a composição química do gás do topo.

A eficiência é expressa como a utilização de gás: o percentual de gás CO que foi transformado em CO₂. Numa fórmula:

$$\text{Utilização de gás CO} = \frac{\text{CO}_2\%}{(\text{CO}\% + \text{CO}_2\%)}$$

Além disto, em fornos modernos, a composição do gás pelo raio é determinada (semi–) continuamente. Esta última mostra se há ou não um bom equilíbrio entre a quantidade de gás de redução e a quantidade de minério na carga. A zona da parede é especialmente importante. Desta forma, o percentual de coque na região da parede não deverá ser baixo demais. É muito difícil fundir a carga na região da parede, devido ao fato da quantidade de carga ser bem mais alta pelo raio e porque as perdas térmicas pelas paredes do forno são retiradas do gás na região da parede.

A análise do gás do topo proporciona uma representação de razoável precisão com relação à eficiência do forno. Ao comparar diferentes fornos, deve–se perceber que o H₂ também faz parte no processo de redução (Seção 8.2.4).

A utilização do gás também depende da quantidade de oxigênio, a qual tem que ser removida. Uma vez que as pelotas têm aproximadamente 1,5 átomos de oxigênio por átomo de Fe (Fe₂O₃) e o sinter tem aproximadamente 1,45 (mistura de Fe₂O₃ e Fe₃O₄), a utilização do gás do topo será mais baixa ao se usar sinter. Ela pode ser calculada como sendo aproximadamente 2,5% da eficiência do gás do topo, ao comparar uma carga composta totalmente de pelotas com uma totalmente de sinter.

2.3 Exercício: fluxo de gás e o conteúdo de um alto forno

O conteúdo de um alto forno pode ser derivado dos resultados operacionais. Quanto tempo a carga e o gás ficam dentro do forno?

Considere o exemplo de um alto forno grande e de alta produtividade, com diâmetro de cadinho de 14 metros. Em produção normal ele opera a 6.500 m³ STP/min. com 25,6% de oxigênio no vento quente e tem uma produção diária de 10.000 toneladas de metal quente (MQ), sob uma taxa de coque de 300 kg/tMQ e uma taxa de injeção

2 – O alto forno: conteúdo e fluxo de gás

de carvão de 200 kg/t. O volume de trabalho das ventaneiras ao nível da carga é de 3.800 m³ dos quais 500 m³ são usados para a zona ativa de coque. A umidade no vento quente e as perdas de rendimento são desprezadas. Alguns dados adicionais são fornecidos na Tabela 2.

Tabela 2: Dados por cálculo do conteúdo do alto forno

	Consumo		Peso Específico		Conteúdo de Carbono
Minério	1,580	kg/tMQ	1,800	kg/m ³	
Coque	300	kg/tMQ	470	kg/m ³	87 %
Carvão	200	kg/tMQ			78 %
Volume de Vento Quente	6,500	m ³ STP/min	1.3	kg/m ³ STP	
Gás de Topo			1.43	kg/m ³ STP	
O ₂ no Vento Quente	25.6	%			
Volume de Trabalho	3,800	m ³	(500 m ³ usado para zona de coque ativo)		
Diâmetro de Goela	10	m			
Uma carga contem	94.8	t minério	18	t coque	
Uma tonelada de metal quente contem	945	kg Fe	45	kg carvão	
Vazios	30	%			

1 tonelada de metal quente contem 945 kg Fe= 945/55.6 = 17.0 quilomole

Perguntas (Respostas em Anexo III):

1. Quanto de oxigênio no vento quente é usado por tonelada de metal quente?
2. Com que frequência o conteúdo do forno é substituído?
3. Quantas camadas de minério existem no forno a qualquer dado momento?
4. O que acontece com o coque e o carvão?
5. Quanto gás de topo se obtém?
6. Estimativa de quanto tempo o gás permanece no forno.
7. Se você obter uma grande quantidade de gás de topo, existe um forte vento quente no forno?

Capítulo 3

A carga de minério: sinter, pelotas e minério calibrado

3.1 Introdução

Nos primórdios da fabricação de ferro, os altos fornos eram freqüentemente localizados próximos das minas de minério. Naquele tempo, os altos fornos usavam minério local e carvão vegetal (ou, posteriormente, coque). Na maioria das regiões industriais daquela época, século XIX, muitos altos fornos se encontravam em operação na Alemanha, Inglaterra e nos Estados Unidos. Após a aplicação da turbina a vapor em navios e para o transporte, o centro da atividade industrial mudou das jazidas de minério para os rios de grande importância, assim como o Reno, e posteriormente, das margens dos rios para a costa. Esta tendência poderá parecer óbvia no presente, mas é de história recente. Em 1960 havia 60 altos fornos em operação na Bélgica e Luxemburgo. No presente (2002), apenas 6 estão em operação, dos quais dois gozam da favorável localização litorânea.

A tendência no sentido de se ter menos altos fornos, porém maiores, fez da escolha de uma carga rica em ferro uma opção natural. Uma carga rica em ferro significando um alto teor de Fe. Como alimentação de fornos, finos de minério não podem ser usados, uma vez que são muito impermeáveis ao gás. Desta forma, os materiais preferidos como carga são sinter, pelotas e minérios calibrados. O sinter e as pelotas são aglomerados de finos. Os finos vêm das minas de minério e normalmente passaram por um processo de enriquecimento, o qual não será descrito aqui. Primeiramente, são descritas as exigências de qualidade para a carga do alto forno. Subseqüentemente, são discutidos sinter, pelotas e minério calibrado.

Uma boa carga de alto forno se consiste, em sua maioria, de sinter e/ou pelotas. As cargas de sinter são comuns na Europa e Ásia, enquanto que as cargas de pelotas são usadas na América do Norte e Escandinávia. Muitas empresas usam sinter, assim como pelotas, contudo, em proporções muito diferentes.

3 – A carga de minério: sinter, pelotas e minério calibrado



Figura 13: Materiais de Carga

O minério calibrado é relativamente escasso e, geralmente, possui propriedades deficientes para a carga. Ele é usado como uma alternativa barata às pelotas. Para se obter uma operação de alto forno de alta produtividade e baixa taxa de coque, o índice máximo do minério calibrado fica na faixa de 10% a 15%. A taxa depende da qualidade do minério calibrado, sendo que, existem casos com êxito de percentuais mais altos.

3.2 Exigências de qualidade para a carga do alto forno

3.2.1 Descrição da qualidade

As exigências para a carga do alto forno se estendem para:

- A composição química da carga: após os processos de redução e fusão, a composição correta do ferro e escória tem que ser feita. A composição da carga é discutida no Capítulo 6.
- As propriedades da carga têm que ser tais que o oxigênio da carga possa ser removido (reduzido).

A redutibilidade da carga é determinada pelo contato entre o gás e as partículas da carga como um todo, bem como pela difusão do gás em partículas. Se uma boa redução será ou não obtida no alto forno, isto será ditado pela “estrutura da camada” da carga no forno, pela permeabilidade das camadas e pelo fluxo interno de gás do alto forno. Os efeitos do fluxo de gás dentro do forno se sobrepõem às propriedades de redutibilidade dos componentes da carga pura.

As exigências de qualidade para a carga têm a ver com duas áreas:

- A permeabilidade ao fluxo de gás.
- As propriedades de amolecimento e fusão.

Na zona da cuba a permeabilidade da carga ao gás é determinada pela quantidade de finos (veja a Figura 14), considere finos como sendo o material < 5 mm. Caso haja finos em demasia, a fração de vazios usada para o transporte do gás de redução irá diminuir e afetará o “fluxo bruto de gás” pela carga. Existem duas fontes de finos: finos carregados no forno e finos gerados dentro do processo, na cuba.

3 – A carga de minério: sinter, pelotas e minério calibrado

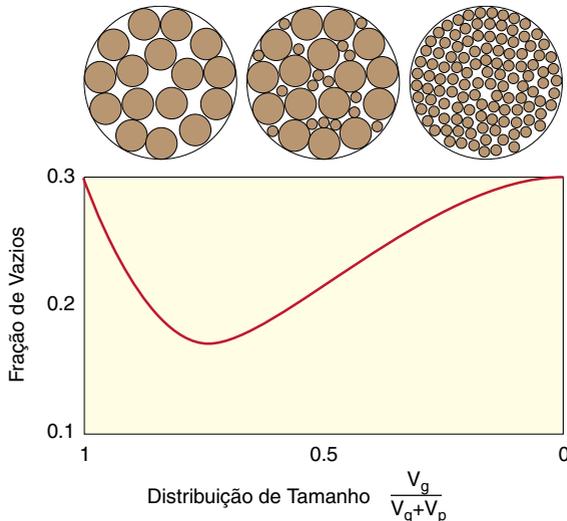


Figura 14: A permeabilidade ao fluxo de gás depende da fração de vazios, que por sua vez depende da taxa entre partículas menores e maiores. Exemplo de dois tipos de partículas esféricas que entram na proporção: Pequeno volume (V_p) e Grande volume (V_g).

Durante o primeiro passo da redução de hematita para magnetita, a estrutura dos materiais da carga se enfraquece e os finos são gerados. Em particular, o sinter e o minério calibrado são propensos a esta, assim chamada, “redução–degradação”. Um requerimento importante para a carga do alto forno é manter os finos dentro do forno em um nível baixo, ou seja:

- Um peneiramento adequado dos materiais da carga antes do carregamento. Peneiras com orifícios de 5–6 mm fazem parte da prática normal de operação.
- Boas propriedades de redução–degradação.

O tópico é de importância especial, uma vez que durante o carregamento do forno os finos nos materiais da carga tendem a se concentrarem sob o ponto de impacto, na superfície da carga. Não obstante, quanto mais lento for o aquecimento e a redução do material, mais se aumenta a degradação por redução: de forma que, um anel no nível da carga com uma concentração relativamente alta de finos irá impedir o fluxo de gás, mas também, sofrer uma alta degradação por redução, porque o aquecimento é lento: um círculo “vicioso”.

Assim que o material da carga começa a se fundir, a permeabilidade ao gás fica altamente reduzida. Desta forma, os materiais da carga deverão começar a se fundir sob temperaturas relativamente altas. As propriedades de fusão dos materiais da carga são determinadas pela composição da escória.

A fusão de pelotas e minério calibrado começa sob temperaturas de 1.000 a 1.100°C, ao passo que o sinter básica geralmente começa a se fundir em temperaturas mais altas.

3.2.2 Qualidade definida da carga de minério

O material da carga de minério é caracterizado por (veja Figura 21):

- Composição química.
- Distribuição de tamanho.
- Propriedades metalúrgicas com relação a:
 - Resistência a frio,
 - Redução–degradação,
 - Propriedades de amolecimento e fusão.

É importante para a permeabilidade ter finos mínimos (<5% abaixo de 5mm) e ter uma faixa restrita de tamanho. A medição do percentual de finos após o peneiramento na casa dos silos – embora desajeitado de se fazer – poderá dar indicações se uma quantidade excessiva de finos foi ou não carregada no forno. Uma descrição sucinta dos testes usados para caracterização dos materiais é dada abaixo. O objetivo é entender a terminologia. Em muitas situações, os denominados testes de rolagem são usados. Uma amostra de material é rolada dentro de um tambor rotativo por um número determinado de rotações. A distribuição de tamanho após a rolagem é determinada e usada como indicador de qualidade (Figura 15).

Princípio do teste de rolagem: Amostra de material é rolada por um número determinado de rotações. A distribuição de tamanho é determinada após rolagem. Porcentagens de peso acima ou abaixo de alguns tamanhos de peneira são usados como parâmetro de qualidade.

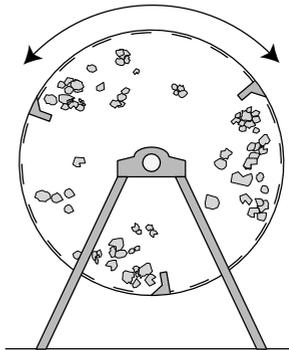


Figura 15: Princípio do teste de rolagem

3.2.2.1 Testes de resistência a frio

A resistência a frio é, em sua maioria, caracterizada por um teste de rolagem: uma quantidade de material é rolada num tambor rotativo e a quantidade de finos é analisada após a rolagem. Para pelotas, a resistência à compressão a frio é determinada. Ela é a força necessária para quebrar as pelotas.

3.2.2.2 Testes de redução–degradação

Os testes de degradação por redução são executados aquecendo–se uma amostra da carga a 500°C, reduzindo a amostra com gás contendo CO (e às vezes H₂). Após o teste a amostra é resfriada, rolada, e a quantidade de finos é determinada. O resultado é o percentual abaixo de 3,15 mm.

3 – A carga de minério: sinter, pelotas e minério calibrado

O teste HOSIM (teste de simulação de alto forno) é um teste que reduz a amostra até o final da redução–gás no forno via a curva de temperatura / composição do gás. A amostra é rolada após o teste. Os resultados são: reductibilidade (tempo necessário para reduzir a amostra até o extremo da redução do gás) e degradação por redução como o percentual de finos (abaixo de 3,15 mm) após a rolagem.

3.3 Sinter

3.3.1 Produção

A fabricação de sinter começou como uma maneira eficiente de reusar os subprodutos da planta no alto forno. O processo de sinter é usado para “fundir” juntos os finos separados de minério de ferro. A resistência da força coesiva dependerá da quantidade e tipo de material fundido entre as partículas.

Dwight e Lloyd construíram em 1906 as primeiras sinterizações contínuas. Uma apresentação esquemática é mostrada na Figura 16. A qualidade do sinter melhorou de forma progressiva e, em vários países (ou seja, países da Europa, Japão, Brasil, Coréia), o sinter é a carga contendo ferro predominante dos altos fornos. Os subprodutos das plantas como o pó, provindo do coletor de pó do alto forno, os finos com origem no peneiramento do sinter/pelota/minério do alto forno, carepas de laminador e outros materiais são reusados na fabricação de sinter. Atualmente, os grandes veios de sinter possuem 5 metros de largura e possuem um comprimento de 120 metros, com uma área eficaz de sinter de 400 m². A produtividade típica é de 30–45 t/m²/dia.

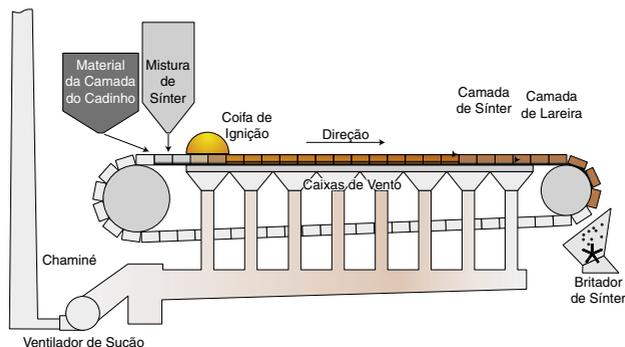


Figura 16: Sinterização

O sinter é produzido conforme a seguir. Após a entrega dos finos de minério para a siderúrgica, os finos de sinter são armazenados e misturados em proporções selecionadas. A homogeneização (blend) poderá ser feita misturando quantidades apropriadas numa correia transportadora antes da sinterização ou por aplicação de uma pilha de homogeneização, a qual é depositada numa direção longitudinal e usada perpendicularmente. A carga de sinter contém calcário, sinter retornado e finos de coque. A homogeneização é misturada em um tambor rotativo, onde a água

3 – A carga de minério: sínter, pelotas e minério calibrado

é adicionada num percentual de até 5–7% para a ligação (aglomeração) primária entre as partículas de minério. É importante que a homogeneização tenha uma boa permeabilidade, de forma que o ar possa ser sugado através da mistura, e os finos de coque (e magnetitas) possam gerar o calor necessário para o processo de sinterização.

A homogeneização é depositada em camadas de 35–65 cm num veio de sínter. Primeiramente uma pequena camada de sínter (numa faixa típica de tamanho de 15 a 25 mm) é depositada, a qual impede que a frente das chamas alcancem os carros de sínter. O processo de sínter começa com a ignição da camada superior. Os ventiladores sugam o ar pelo leito de sínter. Os combustíveis no leito geram o calor para fundir e aglomerar as partículas de minério. No final do veio de sínter, a frente das chamas passou por toda a homogeneização até a parte inferior. Subseqüentemente, o sínter é jogado num silo de coleta, é quebrado, resfriado e peneirado em frações apropriadas. Os finos de sínter (< 5 mm) são reusados e parte do material é reciclado (15–25 mm) para a camada inferior, sendo que o resto é enviado para os silos do alto forno. A rota do processo é mostrada na Figura 17.

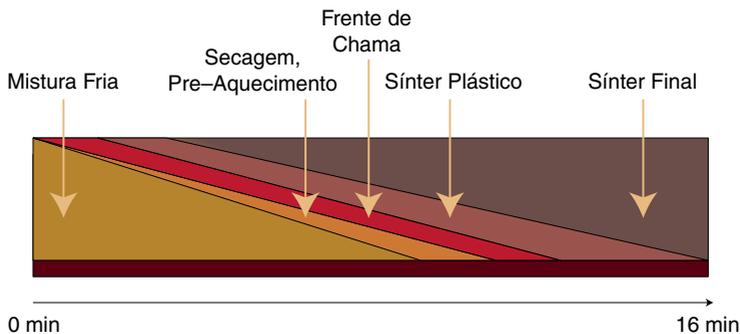


Figura 17: Evolução da Produção de Sínter: perfil da temperatura da homogeneização durante a sinterização

De um ponto de vista químico, é importante observar que o cal (CaCO_3 , CaO) adicionado ao sínter é importante como fundente para o alto forno. Nós discriminamos o sínter ácido, o sínter auto-fundente e o sínter super-fundente. O sínter auto-fundente trás o cal necessário para fundir seus componentes ácidos (SiO_2). O sínter super-fundente trás extra CaO para o alto forno. A vantagem de se adicionar cal o sínter é que a reação de descarbonização ($\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$, custa 117 kJ/mol) ocorre fora do alto forno e o calor necessário não é extraído do fluxo de gás do alto forno. Para o sínter contendo fundente, o cal faz com que a temperatura da homogeneização caia e, sob temperaturas relativamente baixas (1.100 – 1.300°C), fortes aglomerações são formadas. Ela compensa o calor da reação de descarbonização. A quantidade de calor da chama em frente é mais baixa com o sínter contendo fundente do que com o sínter ácido, a qual resulta numa manutenção mais baixa da planta.

Finalmente, se CO_2 for removido fora do alto forno, ele não interferirá com as reações de redução no alto forno. O sínter possui uma resistência mínima sob uma

3 – A carga de minério: sínter, pelotas e minério calibrado

basicidade (CaO/SiO_2) de aproximadamente 1.3. A uma basicidade > 2 , o sínter é mais forte e a produtividade da sinterização é mais alta.

Os pontos básicos que influenciam a produtividade, custos e operação do veio de sínter são:

- A seleção da homogeneização apropriada da alimentação de sínter é importante do ponto de vista de custo. A maioria das empresas usam modelos “valor–em–uso” atribuindo prêmios e penalidades para todos os aspectos do sínter. Não apenas o seu valor de Fe, mas também o valor de outros elementos como o fósforo. Este último tendo uma penalidade.
- A homogeneização apropriada inclui a distribuição de tamanho dos vários materiais. Materiais muito finos não podem ser facilmente sinterizados, por causa do impacto negativo para a permeabilidade do leito de sínter. O tamanho e a quantidade dos finos de coque são importantes para a qualidade do sínter.
- A composição química do sínter exigida é importante. Sob uma basicidade mais alta, a produtividade do sínter aumenta. O teor de MgO tem que ser acima de 1,4% para uma boa degradação (decomposição) das propriedades durante a redução.
- Uma vez que é necessário calor para descarbonizar o calcário, o uso de cal queimado aumenta a produtividade do veio de sinter, na maioria, através do aumento da permeabilidade.
- As preocupações com o meio ambiente têm um impacto local de peso na operação da sinterização. Não apenas a partir da perspectiva de uso de materiais tipo “resíduos”, mas também as preocupações que poderão ser geradas com relação as emissões de uma sinterização.

3.3.2 Qualidade do Sínter

O sínter é feito em três tipos diferentes: sínter ácido, auto–fundente e super–fundente. O sínter auto–fundente é o mais comum. Uma vez que as propriedades da sínter variam com o tipo de homogeneização e composição química, somente algumas observações qualitativas podem ser feitas.

A qualidade tem a ver com:

- A distribuição de tamanho: o tamanho médio do sínter varia de 17 a 30 mm conforme medido após a sinterização. Quanto mais básica é o sínter, menor é o tamanho médio. O sínter degrada durante o transporte e o manuseio. Desta forma, o sínter tem que ser re–peneirado nos altos fornos. O sínter do pátio de armazenamento poderá ter propriedades muito diferentes do sínter “fresco” vindo diretamente da sinterização. Se o sínter do pátio de armazenamento tiver que ser usado no alto forno, ele deverá ser carregado da forma mais consistente possível, ou seja, usando um número mínimo de caçambas de sínter do pátio de armazenamento na casa dos silos do alto forno.
- Resistência a frio: normalmente medida por meios de um teste de rolagem. Quanto mais combustível é usado, mais forte é o sínter. A resistência a frio influencia a produtividade da sinterização, uma vez que uma baixa resistência a frio resulta numa alta taxa de reciclagem de finos.

3 – A carga de minério: sinter, pelotas e minério calibrado

- Propriedades de degradação por redução. A redução de hematita para magnetita causa tensão na partícula de sinter. Quanto mais forte for sinter, melhor será a resistência à tensão. As propriedades de degradação por redução melhoram com uma estrutura mais densa do sinter, ou seja, quando o sinter é feito com mais finos de coque. Como consequência do aumento de finos de coque usado, o teor de FeO do sinter irá aumentar. A partir de correlações experimentais sabe-se que, para um dado tipo de sinter, a degradação por redução aumenta com o teor de FeO.
- Na usina siderúrgica da Corus, na cidade de IJmuiden, o sinter é caracterizado pelo teste denominado HOSIM, que quer dizer “teste de simulação em Alto forno”. No teste, o sinter é exposto ao padrão de temperatura–redução experimentalmente observado no forno. A redução é continuada até o final da redução–gás. Após a rolagem, a quantidade de finos (< 3,15 mm) e a redutibilidade são medidos.
- A fusão do sinter é determinada pela composição química, ou seja, a composição química local. O mais importante é a basicidade, a presença de FeO e SiO₂. Estes dois últimos funcionando como materiais, o que abaixa a temperatura de fusão. Sob temperaturas de 1.200–1.250°C, o sinter começa a amolecer e a fundir. As partes muito básicas (CaO/SiO₂>2) se fundem a temperaturas mais altas, mas continuarão tendo temperaturas de fusão próximas de 1.300°C na presença de FeO suficiente. Se o FeO for baixo, então poderão ser observadas temperaturas de fusão excedendo 1.500°C. Todavia, a fusão em um alto forno difere da fusão de materiais “puros” da carga, uma vez que fortes interações entre diferentes componentes da carga são observadas.

Um resumo é dado na Tabela 3.

Tabela 3: Caracterização do sinter e minério calibrado

	O que é medido	Resultados	Faixa de Aceitação	Referência
Tamanho médio	Distribuição de tamanho	Tamanho médio < 3.15 mm	15–25 mm < 2%	ISO 4701
Resistência a frio	Distribuição de tamanho após rolagem Rolagem Japonês	> 6.3 mm	> 70–80%	ISO 3271
		> 10 mm	> 52%	JIS
Redução–degradação	Distribuição de tamanho após redução e rolagem (500°C, RDI–1, estática)	< 3.15 mm	< 28 %	ISO 4696–1
Redutibilidade	Diminuição de peso durante a redução	%/min	> 0.8%	ISO 4695
Decrepitação (minério calibrado)	Efeito de choque térmico (700°C)	< 6.3 mm	< 8%	ISO 8371

3 – A carga de minério: sinter, pelotas e minério calibrado

3.3.3 Informações básicas com relação às propriedades do sinter

O sinter é um tipo de material muito heterogêneo. Pesquisas conduzidas em vários tipos de sinter num forno resfriado tem deixado claro que várias fases estão presentes simultaneamente. Figura 18. As fases presentes mais importantes são:

- Magnetita primária e secundária (Fe_3O_4). A magnetita secundária é formada durante a sinterização sob alta temperatura, reduzindo áreas no veio de sinter, ou seja, próximo ao coque.
- Hematita primária e secundária (Fe_2O_3). A hematita secundária é formada no veio de sinter durante o resfriamento da sinter na presença de ar (oxigênio).
- As ferritas de cálcio são estruturas formadas a partir de cal (CaO) (queimado) e óxidos de ferro.

Fica claro pela Figura 18 que, sob uma basicidade em elevação, uma fração aumentada de ferritas de cálcio poderão ser encontradas. Isto tem conseqüências de grandes proporções para o processo de sinterização, bem como para o uso de sinter no alto forno.

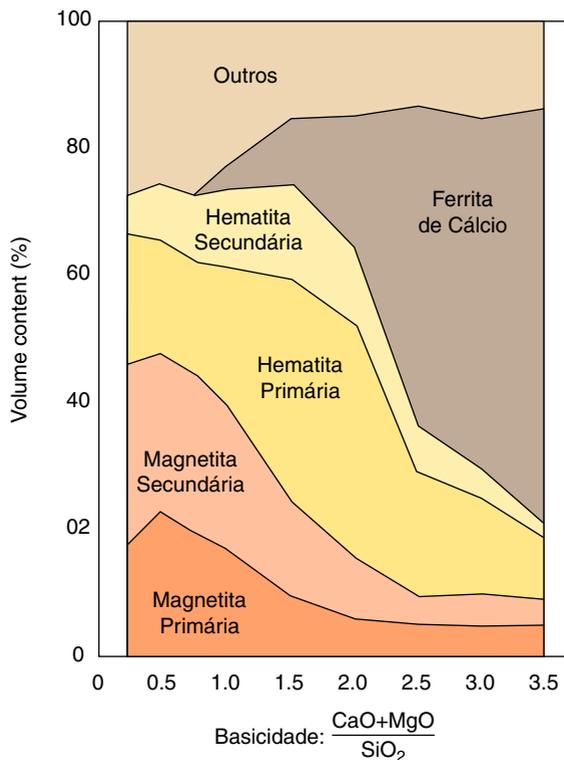


Figura 18: Composição das fases do sinter (Grebe et al, 1980)

3 – A carga de minério: sínter, pelotas e minério calibrado

Primeiramente consideremos as temperaturas da curva liquidus dos materiais do tipo sínter. Os materiais dos tipos ácidos possuem uma temperatura de curva liquidus muito mais alta do que a sínter básica. Isto é devido ao fato de que as estruturas do tipo ferrita de cálcio possuem uma temperatura de curva liquidus tão baixa quanto 1.200°C (Figura 19), ao passo que a sínter ácida possui esta temperatura situada bem acima de 1.400°C. Isto significa também que a sinterização da sínter com fundente ou sínter superenriquecida com fundente poderá ser conseguida com temperaturas mais baixas do que é necessário para a sinterização de um blend (mistura) de uma sínter mais ácida. Por causa disto, a sínter ácida é geralmente mais grosseira e possui uma resistência a frio mais alta do que a sínter básica.

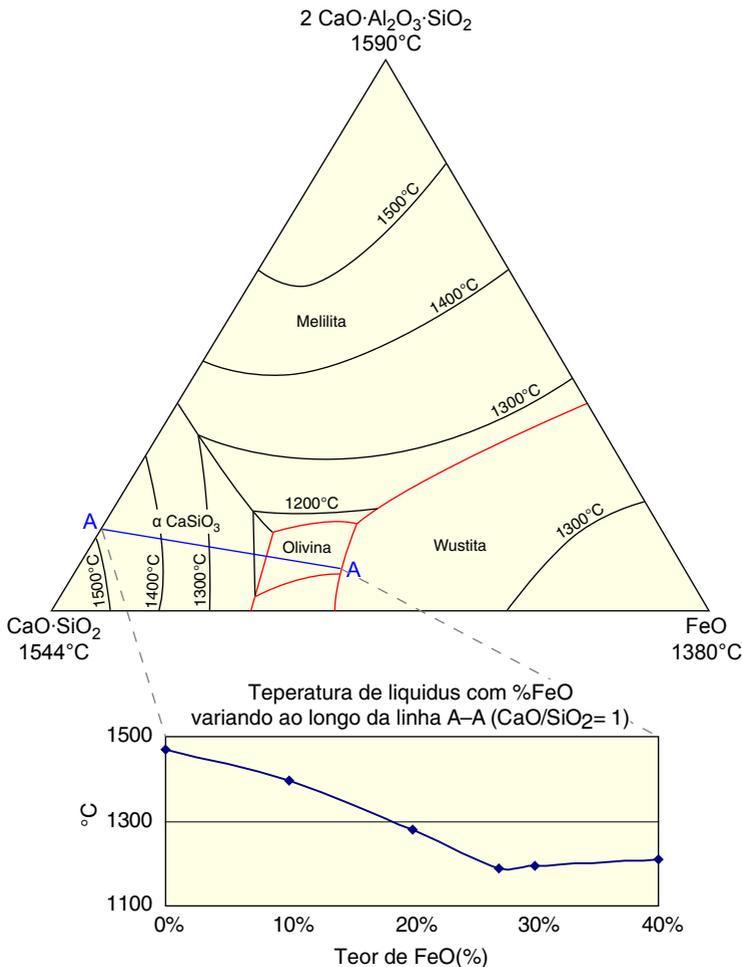


Figura 19: Exemplo de curva de temperatura de liquidus de materiais do tipo sínter

3 – A carga de minério: sinter, pelotas e minério calibrado

Em segundo lugar, nós consideramos as propriedades redução–desintegração da sinter. A força motriz da redução–desintegração de baixa temperatura da sinter é a passagem da estrutura cristalina de hematita para magnetita, o que causa tensão interna na estrutura cristalina ferro–óxido. Assim, a redução–desintegração da sinter está relacionada com a fração de hematita na sinter. Conforme mostrado na Figura 18, existem hematitas primárias e secundárias na sinter. Em particular, estas últimas causam redução–desintegração, uma vez que são mais facilmente reduzidas na parte superior do forno do que as hematitas primárias.

Quanto mais alto for o percentual de hematita na sinter, mais a sinter estará propensa a redução–desintegração. Ou vice-versa: há uma relação forte entre o teor de FeO da sinter e a redução–desintegração: quanto mais alto o teor de FeO, menos redução–desintegração irá ocorrer. O teor de FeO da sinter poderá ser aumentado adicionando mais combustível (finos de coque) ao blend de sinter. Todavia, a relação precisa entre o teor de FeO da sinter e a qualidade da sinter depende do blend de minério usado– e é específico da planta. As propriedades da redução–desintegração dependem do tipo de FeO presente na estrutura cristalina. Como exemplo: uma alta fração de magnetita no blend de sinter também dá uma sinter com uma alta fração de magnetita (primária). Além do mais, na presença de suficiente SiO_2 , as chamadas estruturas faialita ($2\text{FeO}\cdot\text{SiO}_2$) poderão ser formadas. Estas estruturas são muito estáveis e difíceis de se reduzir. Elas são reduzidas sob altas temperaturas, ou seja, as chamadas reações de redução direta (veja a seção 8.2.1). Por outro lado, na presença de MgO, estruturas de espinélio contendo grandes quantidades de FeO poderão ser formadas (espinélio: $\text{MgO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$ com FeO). As estruturas de espinélio são relativamente fáceis de se reduzir. Finalmente, a sinter que foi formada sob altas temperaturas (sinter ácida), irá conter estruturas do tipo vidro e o FeO é relativamente difícil de se reduzir.

É possível suprimir a formação de hematitas secundárias resfriando a sinter com ar de baixo percentual de O_2 (12 a 14%). Isto é feito na Corus IJmuiden com um sistema de reciclagem de gás. Como resultado o teor de FeO da sinter fica relativamente alto, devido ao fato de uma quantidade menor de hematita secundária ser formada. Isto proporciona um grande benefício para as propriedades de redução–desintegração deste tipo de sinter. Além disto, o valor calorífico do gás de topo do alto forno aumenta, uma vez que uma quantidade menor de oxigênio terá que ser removida da carga de minério, o que proporciona também uma clara vantagem financeira. Durante o processo de sinterização existe uma diferença de peso entre o uso de CaO e MgO como fundentes. Ambos materiais são normalmente adicionados como sendo o carbonato (calcário: CaCO_3 ou dolomita $\text{CaCO}_3\cdot\text{MgCO}_3$). Os carbonatos são decompostos no veio de sinter, o que custa muita energia. Contudo, as fusões contendo quantidades substanciais de cal CaO possuem uma temperatura de curva liquidus baixa, ou seja, tão baixa quanto 1.100°C para misturas de 20 a 27% CaO e óxidos de ferro. Para as fusões contendo MgO – as estruturas de espinélio mencionadas acima – as temperaturas de fusão são muito mais altas. Desta forma, é mais fácil formar ligação de escória na sinter com a ajuda de CaO do que com MgO. E geralmente: a produção de sinter com CaO pode ser feita sob temperaturas mais baixas. Porém, a sinter com alto MgO é mais resistente contra redução–desintegração.

3 – A carga de minério: sinter, pelotas e minério calibrado

Para o resultado final da sinter produzida, é importante notar que o blend de sinter antes da sinterização é bastante não-homogêneo. Ele contém vários tipos de materiais e existem, localmente, composições variadas presentes. As partículas de minério podem ter um tamanho de até 5 mm, finos de coque até 3 mm e calcário e dolomita até 2,5 mm. Todos os tipos de composições químicas estão presentes numa escala micro, onde a sinterização acontece. Os tipos de materiais usados, a distribuição de tamanho dos vários materiais, o blending (homogeneização) do mix da sinter, a quantidade de ligações de escória formando materiais no blend, bem como a quantidade de combustível usada para a sinterização, todos têm suas próprias desvantagens para a qualidade da sinter. Isto torna a otimização da qualidade da sinter um desafio tecnológico específico da planta.

Nas seções acima nós enfatizamos a importância da redução-desintegração da sinter. Quanto mais baixa for a redução-desintegração, mais deficiente será a redutibilidade da sinter. As estruturas tipo agulha de ferritas Ca possuem uma estrutura relativamente abertas e ficam facilmente acessíveis ao gás de redução no alto forno. Na condição fria, a sinter é forte (ou seja, bons resultados no ensaio de tambor), a degradação durante o transporte também é boa, porém, a redução relativamente rápida no alto forno faz com que a sinter seja muito propensa à redução-desintegração. As estruturas mais sólidas na sinter possuem propriedades melhores neste aspecto. A redução-desintegração leva a uma permeabilidade mais deficiente das camadas da carga de minério no alto forno e impede uma redução extra apropriada dos óxidos de ferro no alto forno.

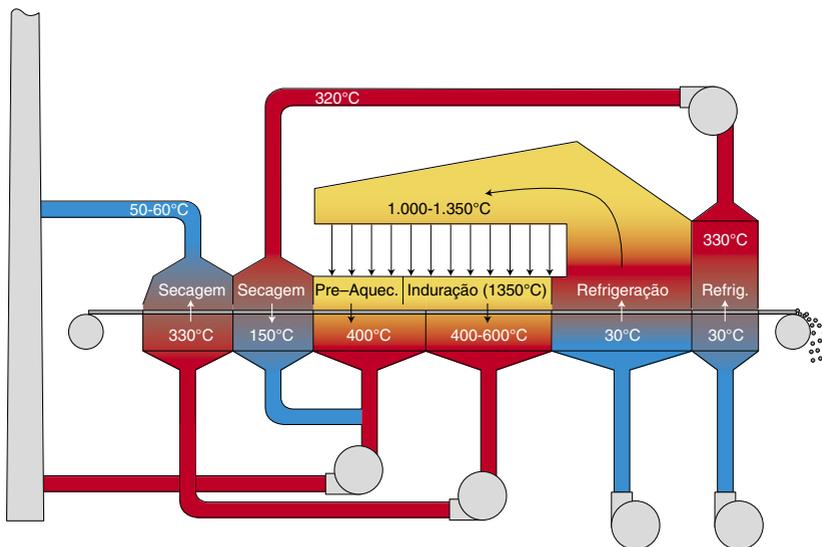


Figura 20: Planta de Pelotas

3.4 Pelotas

3.4.1 Produção

A produção de pelotas é um processo que foi desenvolvido relativamente recentemente e é causado pela geração de frações muito finas de minério, resultando dos métodos de enriquecimento de minério usados. Uma planta de pelotas é mostrada na Figura 20. A maioria das plantas de pelotas está localizada próximo das minas. A produção de pelotas ocorre em 4 passos.

3.4.1.1 Passo 1 – Formação de pelotas verdes

É feita uma homogeneização (blend) de minérios muito finos, para a qual poderão ser adicionados finos de coque (máximo de 1%). A homogeneização é pré-pelotizada em pelotas denominadas pelotas verdes em discos rotativos ou tambores rotativos. Neste passo, água e um aglutinante são adicionados à homogeneização. O mecanismo se dá conforme a seguir. Na superfície de uma partícula de minério, uma camada fina umidade está presente, permitindo a partícula formar uma ponte de umidade com uma outra partícula. Quando a partícula é girada, mais e mais partículas poderão se aderir, sendo que a fração apropriada do tamanho será selecionada por peneiramento. Os finos são re-circulados, retornando para os tambores ou discos rotativos.

3.4.1.2 Passo 2 – Secagem

As pelotas verdes são carregadas via uma peneira para uma grade de transporte e têm que secar e a água de ligação tem que ser substituída por um aglutinante químico. Desta forma, as pelotas são gradualmente aquecidas para 300–350°C. Na mistura, um aglutinante como bentonita ou aglutinante orgânico está presente

3.4.1.3 Passo 3 – Queima

As pelotas secas são aquecidas para uma temperatura de 1.250–1.350°C e os finos de minério são ligados (aglutinados). O calor necessário vem dos queimadores, bem como dos finos de coque adicionados aos finos originais. É chamado de “endurecimento”.

3.4.1.4 Passo 4 – Refrigeração

As pelotas queimadas têm que ser resfriadas. Durante o processo, o resfriamento é controlado, de forma a impedir a degradação das pelotas.

Para o tratamento térmico das pelotas, várias instalações estão disponíveis. Um leito móvel, um forno de cuba, ou um sistema de forno de calcinação com grade poderão ser usados.

3 – A carga de minério: sinter, pelotas e minério calibrado

3.4.2 Qualidade da Pelota

Com a composição química e o endurecimento apropriado, as pelotas geralmente permanecem intactas no alto forno. Desta forma, ao julgar pelotas, os aspectos principais são:

- Resistência a frio, medida como resistência à compressão e os finos gerados com a rolagem.
- As propriedades de inchamento. Com uma composição incorreta da escória, as pelotas tendem a ter propriedades de inchamento extremas. Tendo em vista que o fenômeno é bem conhecido, ele normalmente não acontece com pelotas disponíveis comercialmente.
- As propriedades de degradação por redução. Estas propriedades representam menos problemas com pelotas do que com sinter e minério calibrado.
- O amolecimento e fusão. As pelotas tendem a fundir em temperaturas mais baixas do que o sinter.

Seu volume e composição de escória e as forças de ligação, em sua maioria, determinam a qualidade das pelotas. Os três principais tipos de pelota são:

- Pelotas ácidas,
- Pelotas auto-fundentes ou básicas,
- Pelotas olivinas com fundente.

As propriedades típicas dos três tipos de pelotas são mostrados na Tabela 4 e Tabela 5.

Tabela 4: geral das propriedades da pelota

Tipo de Pelota	Compressão	Redutibilidade	Inchaço
Ácida	++	–	–
Básica/Fundente	+	+	+
Olivina	+	+	+

Tabela 5: Análise e compressão típicas de vários tipos de pelotas

Tipo	Basicidade CaO/SiO ₂	Fe%	SiO ₂ %	MgO%	Compressão kg/pelota
Pelotas ácidas	< 0,15	64–67%	2–5%	<0,2%	250–300
Pelotas olivina	< 0,15	64–67%	2,5–5%	1,3–1,8%	150–200
Pelotas básicas	~ 0,8–1,0	60–64%	3,5–5,5%	1,3%	200–250
Pelotas fundentes	~ 1,1–1,3	60–63%	3,5–5,5%	1,5%	200–250

As pelotas ácidas são fortes, porém, têm propriedades metalúrgicas moderadas. Elas possuem uma boa resistência à compressão (> 300 kg/pelota), porém, uma redutibilidade relativamente deficiente. Além disto, as pelotas são muito sensíveis ao teor de CaO. A um teor de $\text{CaO/SiO}_2 > 0,3$ as pelotas têm uma forte tendência ao inchamento, o que poderá interferir negativamente com a operação adequada do alto forno.

3 – A carga de minério: sínter, pelotas e minério calibrado

As pelotas básicas possuem boas propriedades metalúrgicas para a operação do alto forno. Adicionando-se calcário a homogeneização, o requerimento de energia para a queima/endurecimento aumenta por causa da reação de descarbonização. Por este motivo, a capacidade de produção de uma planta de pelota poderá ser de 10 a 15 por cento mais baixa quando estiver produzindo pelotas básicas.

As pelotas olivinas com fundente possuem MgO ao invés de CaO e não têm a desvantagem de perda de produção. Todavia, estas pelotas se mostram mais fracas ao serem testadas com relação à resistência de compressão a frio.

A diferença na resistência a compressão poderá parecer muito grande. Entretanto, no alto forno as pelotas são reduzidas e a diferença diminui durante a redução. Após o primeiro passo de redução para Fe_3O_4 , a resistência de compressão a frio cai para 45–50 kg no caso das pelotas ácidas, e para 40–45 kg no caso das pelotas de olivina com fundente.

Além da composição química, a qualidade da pelota poderá ser influenciada pela taxa de produção: quanto mais lento a grade se mover mais forte poderá ser a queima, o período de endurecimento aumentará e as pelotas ficarão mais fortes. A final conclusion on the “optimum” pellet properties has not yet been reached. A summary of acceptability ranges for pellet quality parameters is given in Table 6.

Tabela 6: Caracterização de pelotas

	O que é medido	Resultados	Faixa de Aceitação	Referência
Tamanho médio	Distribuição de tamanho	8–16 mm < 6,3 mm	> 90% < 5%	ISO 4701
Resistência a frio	Força de compressão Força de rolagem	Medio kg/p *) % < 60 kg/p > 6,3 mm < 0,5 mm	> 150 **) <4% > 95% <5%	ISO 4700 ISO 3271 o ASTM
Desintegração a baixa temperatura	Distribuição de tamanho após redução e rolagem (dinâmica)	Força > 6,3 mm Desgaste < 0,5 mm	> 80% < 15%	ISO 13930
Redutibilidade	Diminuição de peso durante a redução	%/min (dR/dt)40	> 0,8%	ISO 4695
*) kg/p corresponde com unidade métrico daN/p: decaNewton por pelota (=0.98 kg/p) **) dependa de tipo de pelota. Veja tabela 5.				

3.5 Minério calibrado

Os minérios calibrados são materiais naturalmente ricos em ferro, os quais são usados diretamente das minas. As minas normalmente produzem minério calibrado, bem como finos (sinter). As maiores jazidas de minério calibrado estão presentes na Austrália (Hamersley, Mount Newman), América do Sul (Carajás, Robe River), África do Sul (Sishen). Em muitos outros lugares, quantidades limitadas de minério calibrado são produzidas.

Os minérios calibrados são mais baratos que as pelotas. Por esta razão, em muitos altos fornos o uso de grandes quantidades de minério calibrado está sendo considerado. O custo mais baixo do minério calibrado comparado ao custo das pelotas é contrabalançado pelas qualidades metalúrgicas mais pobres. De uma forma geral, em comparação às pelotas, o minério calibrado:

- gera mais finos durante o transporte e manuseio,
- possui propriedades mais pobres de degradação por redução,
- possui uma temperatura mais baixa de fusão.

O minério calibrado é usado numa fração apropriada de tamanho, por exemplo, 8–30 mm. Para operação de alto forno em alta produtividade e altos níveis de injeção de carvão, o minério calibrado é um tipo mais pobre de material de carga.

Todavia, tendo em vista que o minério é um material natural, as propriedades podem diferir de um tipo de minério para o outro. Por exemplo, o alto forno da Siderar na Argentina opera, com êxito, com um minério calibrado brasileiro que compõe até 40% da carga, sob uma alta produtividade do forno. Os parâmetros de qualidade para minérios calibrados são semelhantes aos parâmetros para o sinter.

Capítulo 4

Coque

O alto forno é carregado com camadas alternadas de coque e materiais da carga. O coque forma um esqueleto pelo qual o gás se distribui através do conteúdo do forno e penetra nas camadas de minério. Tendo em vista que o coque é queimado durante o processo, o termo “combustível” é freqüentemente aplicado. Entretanto, o coque gera o monóxido de carbono, o qual é necessário às reações de redução. O coque é mais um reagente químico do que um combustível.

Desde o século 18, o coque tem sido a fonte mais importante de carbono para o processo do alto forno. Desde 1960, combustíveis auxiliares têm sido usados de forma cada vez mais freqüente, tais como óleo, alcatrão, carvão e gás natural. Os combustíveis auxiliares são injetados através das ventaneiras. Uma vez que ao assim se fazer, a temperatura de chama cai, um enriquecimento do vento quente com oxigênio é freqüentemente usado para compensar simultaneamente com a injeção auxiliar de combustível.

Pelos últimos 50 anos, a taxa de coque do processo do alto forno caiu consideravelmente. Isto é devido à aplicação da injeção de combustível auxiliar, e também a fatores tais como uma qualidade aprimorada da carga, temperaturas mais altas do vento quente, fornos maiores e um controle de processo melhorado. Isto está ilustrado na Figura 21. Atualmente, as taxas de combustível de grandes altos fornos estão bem abaixo de um valor equivalente de coque de 500 kg/tMQ.

4 – Coque

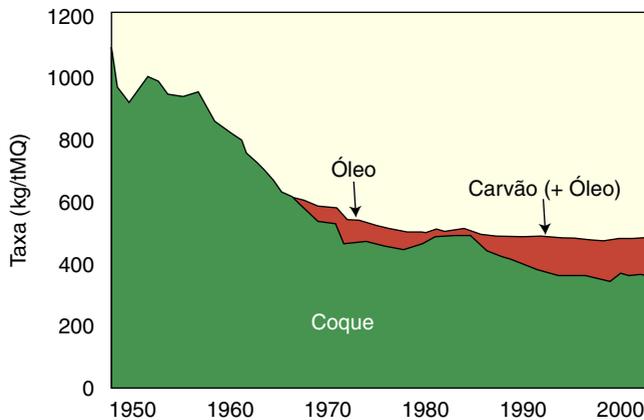


Figura 21: Diminuição da taxa de coque (Cortesia VDEh)

4.1 Funções do coque

As funções mais importantes do coque são:

- que o coque se queime para monóxido de carbono (CO) e gere o calor necessário para fundir a carga,
- o monóxido de carbono é usado para remover o oxigênio da carga. O carbono é também usado para redução dos óxidos de ferro,
- o coque provê o esqueleto através do qual o gás poderá subir e ser distribuído pela carga. O coque é um material sólido e permeável até temperaturas bem altas (> 2.000°C). Ele é de uma importância especial no cadinho, zona de fusão e zona de amolecimento. O coque é o único material sólido na área abaixo da zona de fusão. O peso do conteúdo do alto forno se apóia no esqueleto de coque. O leito de coque tem que ser permeável, de forma que o ferro e a escória possam fluir para o furo de corrida.
- o coque proporciona o carbono usado para a carbonização do metal quente.

4.2 Qualidade do coque

A qualidade do coque pode ser descrita dentro de duas amplas categorias: sua composição e sua resistência mecânica a frio e a quente. Os aspectos relevantes da composição têm a ver com o seu uso como combustível e reagente no forno: o teor de cinzas e o teor de umidade. Ambos deverão ser o mais baixo possível. Os teores de cinzas geralmente vão de 8 a 11%, mas dependem da situação local. A umidade é uma consequência do resfriamento e do subsequente manuseio do coque. Outros aspectos da composição química do coque são os teores de enxofre e álcali. Os motivos são descritos mais adiante. A qualidade física do coque é caracterizada por:

- Tamanho e distribuição do tamanho. O tamanho médio do coque metalúrgico fica tipicamente dentro da faixa de 45 a 55 mm. A distribuição deverá ser restringida de forma a propiciar uma boa permeabilidade do coque. Em especial, uma grande fração de coque > 100 mm é uma indicação de um controle deficiente do processo

4 – Coque

de produção de coque.

- A resistência à fragmentação devido ao transporte e outros esforços mecânicos. Os parâmetros usados para esta propriedade são: I40, M40 e estabilidade.
- A resistência contra abrasão. Ela é caracterizada pelo resultado do teste denominado I10 e M10.
- A reatividade do coque. O coque pode reagir com o CO₂, o qual ataca a matriz de coque e leva a uma taxa de coque mais alta no alto forno. O coque possuindo reatividade mais baixa (CRI, índice de reatividade do coque) e resistência mais alta após a reação (CSR, resistência do coque após a reação) possui uma resistência mecânica mais alta na parte mais baixa do forno.
- A consistência, numa base diária, da qualidade do coque. O aspecto da consistência diária da qualidade do coque – em especial o “tamanho e distribuição do tamanho” – é uma área negligenciada na operação de altos fornos. A inconsistência na qualidade do coque lava a diferenças na distribuição da carga e poderá influenciar o fluxo gasoso interno do alto forno.

Os vários resultados de testes para caracterizar o coque e a relevância para o processo estão indicados na Tabela 7 e na Figura 22.

Tabela 7: Faixa de aceitabilidade para os parâmetros de qualidade do coque

	O que é medido	Resultados	Faixa de Aceitação	Melhor	Referência
Tamanho médio	Distribuição de tamanho	Tamanho médio (mm) % < 40 mm % < 10 mm	45–60 < 25% < 2%		
Resistência a frio	Distribuição de tamanho após rolagem	I40 % > 40 mm	> 45	55	Teste Irsid
		I20 % > 20 mm	> 78		
		I10 % < 10 mm	< 19	16	
		M40 % > 40 mm	> 80	87	
Estabilidade no porto Estabilidade na casa dos silos Dureza		M10 % < 10mm	< 7	5.5	Teste Micum Teste ASTM
		% > 1“	> 58		
		% > 1“	> 60		
		% > 1/4“	> 70		
Resistência após reação	CSR: reação (CO ₂) + rolagem	% > 10 mm	> 58	70	
Reatividade	CRI: % de perda de peso durante o teste	%	< 29%	24	

Os testes IRSID, MICUM e ASTM diferem em suas preparações de amostras. O teste Irsid pega uma amostra de coque > 20mm. O teste MICUM pega uma amostra de coque > 63 mm. O teste ASTM pega uma amostra de coque de 2”-3”. Referência: após Kolijn (2001), Vander e colaboradores (1996)

4 – Coque

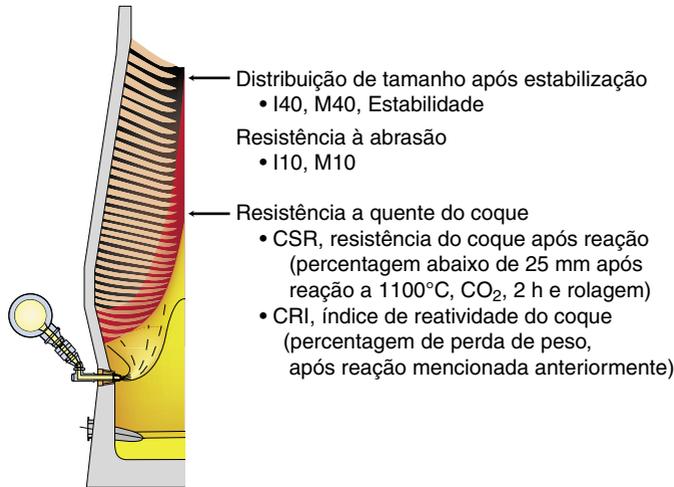


Figura 22: Testes de coque e o processo do alto forno

A qualidade do coque é, em sua maioria, determinada pela homogeneização de carvão usada. Todavia, a preparação do carvão, o tempo de carbonização, equipamento e resfriamento também influenciam a qualidade do coque.

A química do carvão influencia em muito a química do coque. Normalmente uma homogeneização de vários tipos de carvões é usada para o alto forno. Os Carvões de coque são tipos de carvões adequados à fabricação de coque e possuem um preço mais alto do que os carvões não adequados à fabricação de coque. A otimização da homogeneização do carvão em si é uma arte. Os fatores importantes a serem levados em consideração são: a matéria volátil do carvão e a pressão do gás gerada durante a carbonização. O coque resultando da homogeneização deverá se encolher o suficiente de forma que possa ser removido da câmara de coque, e deverá ter uma pressão de gás suficientemente baixa, de forma a não danificar as paredes da câmara de coque. A taxa de carbonização dependerá das temperaturas da parede da câmara de coque. Quando mais alta for a taxa de carbonização, mais fissuras ocorrerão e menor será o coque resultante. Geralmente, os tempos de carbonização para coquearias utilizando fornos de escatelar estão na faixa de 16 a 24 horas.

4.3 Produção de Coque

O coque é produzido a partir de uma homogeneização de carvão. O carvão é aquecido a altas temperaturas num ambiente isento de ar. À medida que a temperatura aumenta, a matéria volátil do carvão escapa e uma matriz sólida de carbono é formada: carbonização do carvão. Um processo de produção simplificado de coque está mostrado na Figura 24.

4 – Coque

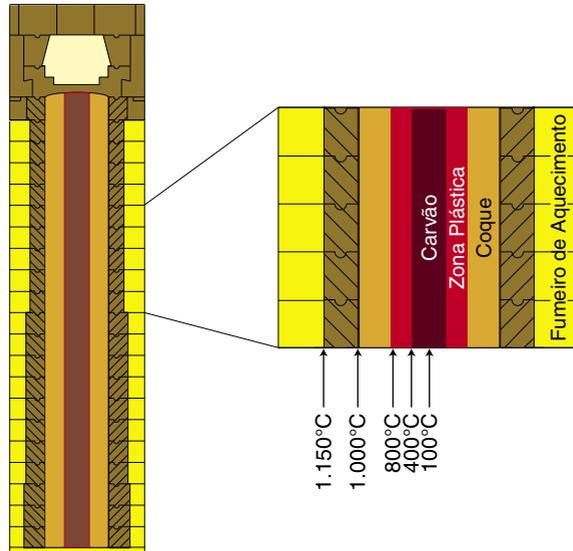


Figura 23: Câmara de coque

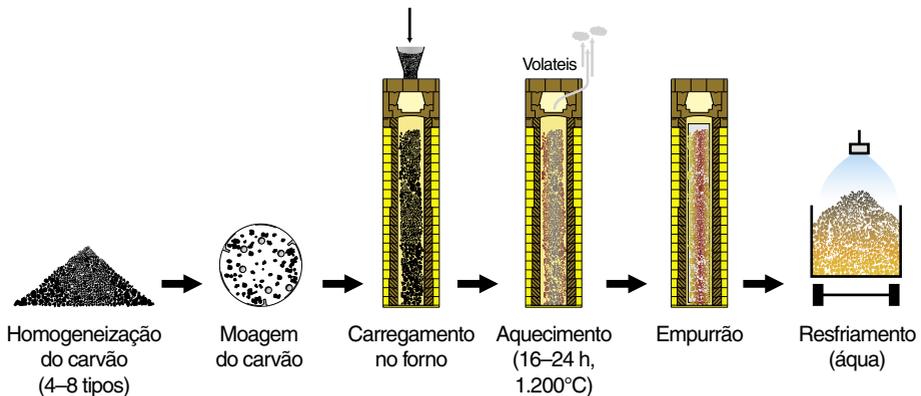


Figura 24: Programa de produção de coque

4.4 Qualidade do coque no alto forno

O coque está sujeito ao ataque mecânico e químico durante sua descida do nível da carga até o cadinho. O tamanho médio do coque diminui durante sua descida, conforme apresentado num exemplo típico de degradação do coque na Figura 25. Foi constatado que o coque se degrada pela rota da coqueria até as ventaneiras e, durante a medição após estabilização (I40) permaneceu constante. Quando mais grosso for o coque carregado no forno, mais grosso ele chegará às ventaneiras.

4 – Coque

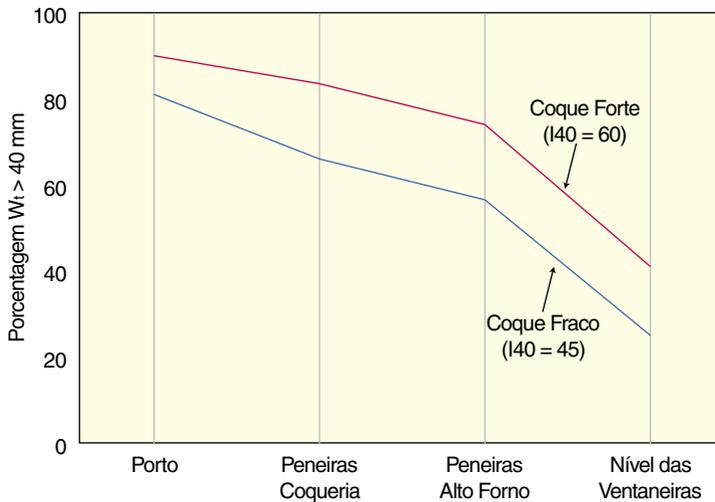


Figura 25: Degradação do coque do porto até as ventaneiras (Van der Velden, 2001)

A qualidade do coque no cadinho é uma questão especial. Os líquidos têm que ser vazados do cadinho e a permeabilidade do leito de coque tem que ser boa. Todavia, a taxa de reação no cadinho é lenta, uma vez que o coque só é usado pelas reações de redução direta e carbonização de ferro. Por conseguinte, o tempo de residência do coque no cadinho é longo. A fração de vazios dentro do coque pode ser bem pequena. O desgaste do refratário do cadinho pela exposição às correntes circunferentes de ferro ao longo da parede do cadinho poderá ser afetado pela qualidade do coque: quanto menor a fração de vazios, mais fortes serão as correntes circunferentes. Pensa-se que, o coque carregado no centro do forno, é o coque que chega ao cadinho. Algumas empresas têm se empenhado muito para carregar o coque grosso e forte no centro do alto forno, numa tentativa de se manter uma boa permeabilidade do homem morto.

A reatividade do coque ($C + CO_2 \rightarrow 2 CO$) é determinada pela temperatura na qual o coque começa a reagir com o dióxido de carbono. A temperatura depende especialmente da presença de catalisadores tal como o álcali (Na, K) e da composição das cinzas do coque: quanto mais Fe na cinza do coque, maior a reatividade. Uma reatividade maior do coque leva, em princípio, a uma taxa de coque maior no alto forno.

Capítulo 5

Injeção de carvão e outros combustíveis auxiliares

O uso de combustíveis auxiliares, os quais são injetados pelas ventaneiras, pode abaixar o custo do metal quente. Os combustíveis auxiliares quase sempre são o carvão e o gás natural, porém, o óleo, o alcatrão e outros materiais podem também ser usados. O balanço financeiro preciso depende muito das situações locais.

A injeção de carvão encontrou a aplicação mais difundida. Até o início dos anos 80, a injeção de óleo era mais comum. Isto mudou devido às mudanças nos preços relativos do carvão e do óleo. Observe que a preparação do carvão envolve um custo de investimento bem alto e, desta forma, ele se torna viável, na maioria dos casos, para plantas com uma produção significativa de ferro (> 4 milhões de toneladas por ano). Os argumentos mais importantes para a injeção de carvão (ou gás natural) num alto forno são:

- Uma taxa de coque mais baixa. O custo do coque é substancialmente mais alto que o custo do carvão. Não obstante, o uso de uma substância injetável permite a operação do forno numa temperatura alta do vento quente, o que também leva a uma taxa de coque mais baixa,
- Aumento da produção pelo uso de um vento quente enriquecido com oxigênio.

O motivo da versatilidade aparente do alto forno em consumir todos os tipos de combustíveis é que, nas ventaneiras as temperaturas de chama são tão altas que todos os materiais injetados são convertidos em moléculas simples como H_2 e CO .

A injeção de carvão foi aplicada no alto forno Amanda da empresa ARMCO (Ashland, Kentucky) nos anos 60. Nos primórdios da injeção de carvão, níveis de injeção de 60 – 100 kg de carvão por tonelada de metal quente eram comuns. Atualmente, o padrão industrial é alcançar uma taxa de coque de 300 kg/tonelada, com níveis de injeção de 200 kg de carvão por tonelada de metal quente. O entusiasmo inicial de que taxas de coque bem abaixo de 250 kg/tonelada eram possíveis, gradualmente se dissipou.

5 – Injeção de carvão e outros combustíveis auxiliares

5.1 Injeção de carvão: equipamento

A concepção básica para instalações de injeção de carvão requer que as funções apresentadas sejam realizadas:

- Moagem do carvão: O carvão tem que ser moído em tamanhos bem pequenos. O mais comumente usado é o carvão pulverizado: aproximadamente 60% do carvão é $< 75 \mu\text{m}$. O carvão granular é algo mais grosso com tamanhos de até 1 – 2 mm.
- Secagem do carvão: O carvão contém quantidades substanciais de umidade, de 8% até mais de 10%. Uma vez que a injeção de umidade aumenta a taxa de combustível, a umidade deve ser removida ao máximo possível.
- O transporte do carvão pelas tubulações: Se o carvão for pequeno demais, o transporte pneumático será reprimido. Isto poderá resultar na formação de pequenas incrustações (cascões) nas paredes e até mesmo levar a um vazamento de carvão por parte dos tubos de transporte.
- Injeção de carvão pulverizado: O carvão tem que ser injetado em quantidades iguais por todas as ventaneiras. Em especial, sob uma taxa de coque baixa e uma alta produtividade, a simetria circunferencial da injeção deverá ser mantida.

Existem muitos fornecedores de instalações de injeção de carvão pulverizado (ICP) disponíveis, os quais se comprometem com as funções mencionadas acima, numa maneira específica.

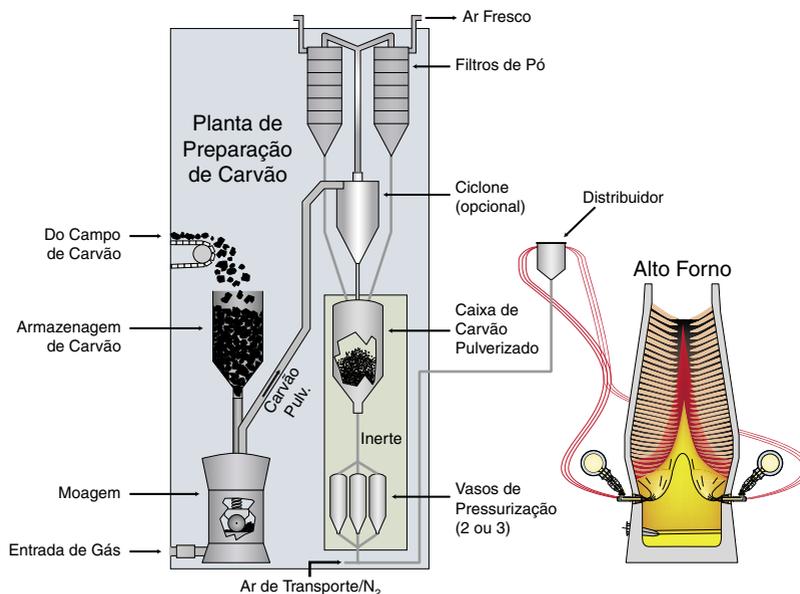


Figura 26: Exemplo de Instalação de ICP

5.2 Especificação de carvão

Os tipos de carvões são discriminados de acordo com a matéria volátil. A matéria volátil é determinada pesando-se o carvão antes e após o aquecimento por 3 minutos a 900°C. Os carvões de baixa volatilidade possuem um percentual de matéria volátil de 6–12%. Já os carvões de alta volatilidade, 30% ou mais. Todos os tipos de carvões têm sido usados com êxito. As propriedades mais importantes do carvão são:

- Alta taxa de reposição (TR) do coque: a composição e o teor de umidade de injeção dos carvões determinam a quantidade de coque substituído por um certo tipo de carvão. Uma simples fórmula para a taxa de substituição (comparada com um coque tendo 87,5% de carbono) é:

$$TR = 2 * C\%(\text{carvão}) + 2,5 * H\%(\text{carvão}) - 2 * \text{umidade}\%(\text{carvão}) - 86 + 0,9 * \text{cinza}\%(\text{carvão})$$

(Toxopeus e colaboradores, 1991)

- Composição: um alto enxofre e alto fósforo poderão fazer surgir custos adicionais na aciaria e poderão ser considerados antes da compra de certos tipos de carvões. Carvões jovens (com alto teor de oxigênio) são também conhecidos por serem mais susceptíveis ao auto-aquecimento e ignição em atmosferas contendo oxigênio. Este é também um fator importante que deverá ser considerado dependendo das limitações do sistema de manuseio de carvão moído.
- Dureza: a dureza do carvão, caracterizada pelo HGI – Índice de Abrasividade de Sulco (hardgrove grindability index) – precisa corresponder às especificações do equipamento de moagem. O tamanho resultante do carvão moído é também fortemente dependente deste parâmetro e precisa corresponder aos limites do sistema de manuseio e injeção de carvão.
- Teor de umidade: ambos o teor de umidade do carvão em estado natural (bruto), e o teor máximo de umidade para impedir a umidade de superfície no carvão moído têm que ser considerados. A umidade de superfície no carvão moído irá causar agarramento e problemas de manuseio. A parcela de umidade precisa se secada para alcançar este limite do carvão em estado natural. O carvão em estado natural precisa também estar dentro das especificações do equipamento de secagem do carvão. A umidade de equilíbrio é um parâmetro freqüentemente usado para caracterizar o teor máximo de umidade sem umidade de superfície.

Carvões de injeção de potencial deverão ser avaliados com base no “valor em uso”, onde todos os efeitos sobre o custo são levados em conta. Freqüentemente é possível usar homogeneizações de dois ou mais tipos de carvões de injeção, de forma que as propriedades não favoráveis possam ser diluídas.

5.3 Injeção de carvão nas ventaneiras

O carvão é injetado por meios de lanças para dentro dos algaravizes, entra em ignição e gaseificado. O carvão tem um tempo muito curto (5 milésimos de segundo) na região da zona de combustão e, desta forma, a gaseificação do carvão tem sido extensamente estudada. A gaseificação do carvão se consiste de vários passos conforme delineado na Figura 27. Primeiramente o carvão é aquecido e umidade se

5 – Injeção de carvão e outros combustíveis auxiliares

evapora. Em seguida ocorre um aquecimento adicional do carvão e a gaseificação dos componentes voláteis. Os componentes voláteis então entram em combustão e se queimam, causando um aumento de temperatura. Por fim, o carbono é queimado. Todos estes passos ocorrem em seqüência com alguma sobreposição.

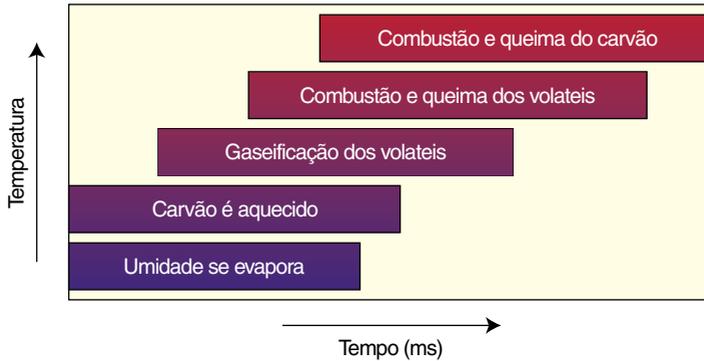


Figura 27: Gaseificação do Carvão

Os efeitos do projeto da lança, o oxigênio extra e o tipo de carvão na combustão têm sido analisados. Originalmente, as lanças de carvão eram lanças retas de aço que ficavam posicionadas na interfase ventaneira/algaraviz, ou próximo dela, conforme indicado na Figura 28. De uma forma geral, o arranjo simples funciona bem. Todavia, ocasionalmente o “carbono” (carvão não queimado e desgaseificado) ou “fuligem” (carbono muito fino formado a partir do gás) escapa do alto forno através do topo. Para contornar este problema – especialmente em altas taxas de injeção – as empresas têm instalado diferentes tipos de sistemas de injeção nas ventaneiras, tais como:

- Lanças coaxiais com fluxo de oxigênio e fluxo de carvão,
- Equipamento da lança com uma ponta especial para se obter mais turbulência na ponta da lança,
- O uso de duas lanças por ventaneira,
- Pré-aquecimento do carvão.

Ao usar Injeção de Carvão Pulverizado (ICP), ocasionalmente poderão ser encontrados depósitos de cinzas de carvão na ponta da lança ou dentro da ventaneira. Os depósitos poderão ser removidos pela purga periódica da lança, ou seja, cortando o carvão enquanto o fluxo de ar (ou nitrogênio) é mantido.

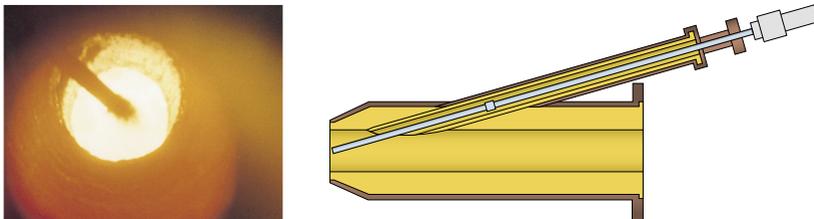


Figura 28: Injeção de carvão nas ventaneiras e posicionamento da lança

5 – Injeção de carvão e outros combustíveis auxiliares

A gaseificação do carvão será mais rápida:

- quanto mais voláteis forem os carvões,
- quanto menores forem as partículas de carvão,
- quanto melhor for a mistura entre carvão e vento quente.

Não obstante, quanto mais alto for o nível de injeção maior será a quantidade de carvão deixando a zona de combustão sem ser gaseificado.

A gaseificação do carvão também depende do percentual de matéria volátil. Se carvões de baixa volatilidade (5–10% MV, matéria volátil) forem colocados em combustão, um percentual relativamente alto de carvão não entrará em combustão na zona de combustão e será transportado com o gás para a zona ativa de coque. O “carbono” normalmente será usado no processo, porém poderá afetar a distribuição de gás. O carvão de alta volatilidade (HV, > 35% MV) e o carvão de volatilidade ultra–alta (> 40% MV) produzem uma grande quantidade de gás na zona de combustão e uma pequena quantidade de carbono. Caso a combustão do gás não for concluída, fuligem poderá se formar. Assim, existe uma vantagem de fazer uma homogeneização de vários tipos de carvão, especialmente os de alta volatilidade (HV) e os de baixa volatilidade (LV) conforme mostrado na Figura.

Foi constatado que o coque na borda entre a zona de combustão e o homem morto contém mais finos de coque ao trabalhar em altas taxas de injeção. É chamado de “ninho de passarinho”.

5.4 Controle de processo com Injeção de Carvão Pulverizado

Numa operação com uma alta Injeção de Carvão Pulverizado, aproximadamente 40% do combustível é injetado através das ventaneiras. Desta forma, é importante controlar a quantidade de carvão por tonelada de metal quente. O carvão possui duas funções: ele gera gás redutor (CO e H_2), o qual é usado para tirar oxigênio dos materiais da carga, e gera também o calor para fundir a carga. Os tanques de alimentação da injeção de carvão são pesados continuamente e a taxa de fluxo do carvão pode ser controlada. Isto pode ser feito com pressão de nitrogênio nos tanques de alimentação ou por meios de um sistema de dosagem por parafuso sem–fim ou válvula rotativa. De forma a calcular uma taxa de fluxo apropriada de carvão (em kg/minuto) a produção tem que ser conhecida. Existem várias maneiras de calcular a produção. A taxa de produção poderá ser derivada da quantidade de material carregada no forno. Correções de curto prazo poderão ser feitas calculando o consumo de oxigênio por tonelada de metal quente a partir dos parâmetros do vento quente num período estável e em seguida calculando a produção real a partir dos dados do vento quente. Erros sistemáticos e/ou a exigência de carvão extra, poderão ser colocados no modelo de controle.

O requerimento de calor da parte mais baixa do forno é um tópico especial ao se usar carvão de ICP. O carvão não é apenas usado para produzir os gases de redução, sua queima tem um efeito sobre o balanço de calor na parte mais baixa do forno. O calor do gás da rampa tem que ser suficiente para fundir a carga: entenda “calor de fusão” como sendo o calor necessário para fundir a carga. O requerimento

5 – Injeção de carvão e outros combustíveis auxiliares

de calor da carga é determinado pelo “grau de pré-redução”: quanto oxigênio ainda tem que ser retirado da carga durante a fusão (a remoção deste oxigênio custa muita energia) e também pela eficiência da transferência de calor do gás para a carga. A “capacidade de fusão” do gás é definida como sendo o calor disponível com o gás da rampa sob uma temperatura $> 1.400^{\circ}\text{C}$. A capacidade de fusão do gás depende:

- da quantidade de gás de ventaneira disponível por tonelada de metal quente. (especialmente ao usar carvão de alta volatilidade, existe uma grande quantidade de H_2 no gás da rampa),
- da temperatura de chama na zona de combustão.

A temperatura de chama em si é determinada pela taxa de carvão, pelo tipo de carvão, pela temperatura do vento quente, pela umidade do vento quente e pelo enriquecimento de oxigênio.

Das colocações acima, o percentual de oxigênio no vento quente pode ser usado para equilibrar as necessidades de calor nas partes mais altas e mais baixas dos fornos. O equilíbrio (balanço) é dependente da situação local. Ele depende, por exemplo, da qualidade da carga e do coque, e do tipo de carvão usado. Para o equilíbrio existem algumas limitações técnicas e tecnológicas, as quais são apresentadas como um exemplo na Figura 29. Para taxas de injeção mais altas, é necessário mais oxigênio. As limitações são dadas por:

- uma temperatura muito baixa do gás do topo. Se a temperatura do gás do topo se tornar muito baixa, a carga levará muito tempo para se secar e o comprimento efetivo do alto forno encurtará,
- uma temperatura de chama muito alta. Se temperatura de chama se tornar muito alta, a descida da carga poderá ficar descontrolada,
- limitações técnicas com relação ao enriquecimento de oxigênio permitido ou disponível para o vento quente, tal como as de segurança.

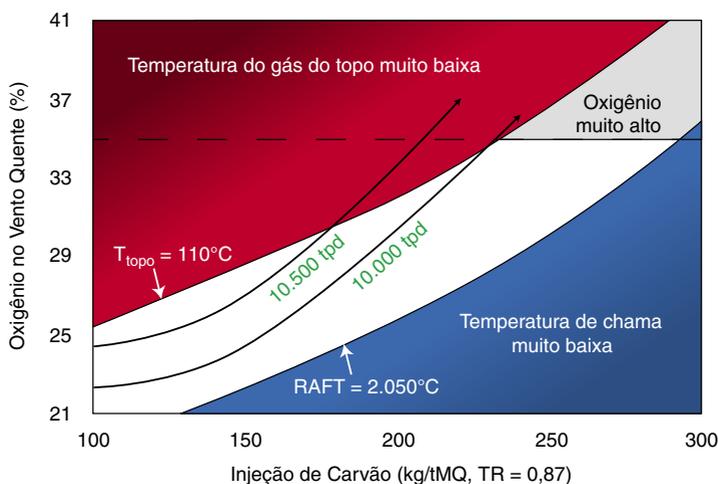


Figura 29: Fatores de limitação que afetam as condições da zona de combustão com Injeção de Carvão Pulverizado (ICP)

(RAFT = Temperatura Adiabática da Chama na Zona de Combustão)

5 – Injeção de carvão e outros combustíveis auxiliares

Em particular, observe o efeito do uso da injeção de carvão extra para a recuperação de um forno em resfriamento. Colocando carvão extra no forno a taxa de produção diminui: com aproximadamente 2,5% para cada 10 kg de carvão extra por tonelada de metal quente. Simultaneamente, a temperatura de chama cai em aproximadamente 32°C. Desta forma, dependendo da situação específica, a “capacidade de fusão” por tonelada de metal quente poderá até mesmo diminuir. Se a temperatura de chama cair de 2.050 para 2.018°C, a “capacidade de fusão” diminui em 5% (32/2.050–1.400) e a produção diminui em 2,5%, resultando numa diminuição do calor de fusão por tonelada de metal quente de 2,5%. Se o forno sob resfriamento tiver uma capacidade de fusão insuficiente do gás, um volume extra da ICP poderá deteriorar a situação. Em tal situação, a eficiência do processo tem que ser melhorada, ou seja, por uma taxa de produção mais baixa e um volume mais baixo do vento quente.

5.5 Controle do fluxo de gás

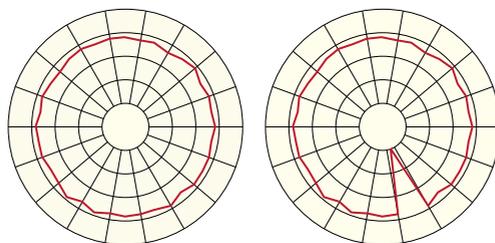
Para um processo otimizado do alto forno, o controle do fluxo de gás interno do alto forno é muito crítico. Uma discussão detalhada é apresentada no Capítulo 7. De uma forma geral, foi constatado que o equilíbrio entre o fluxo de gás central e fluxo de gás na parede tem que ser mantido. Na usina siderúrgica da Corus, em IJmuiden, a presença de um centro livre de minério é usado para distribuir o gás da rampa de forma apropriada pelas incisões de coque. Como consequência, a raiz da zona de fusão poderá descer para bem próximo das ventaneiras. O risco associado a uma raiz baixa da zona de fusão é o dano as ventaneiras (vazamento e/ou emborcação). Uma alta injeção de carvão pulverizado (ICP) requer uma simetria circunferencial melhor do processo, não apenas por parte do carregamento, mas também da distribuição do vento quente e injeção de carvão pelas ventaneiras.

5.6 Simetria circunferencial da injeção

Se cada ventaneira num alto forno for considerada como uma parte da “torta” do alto forno e for responsável pelo processo para o stockline (nível da carga), fica evidente que a simetria circunferencial do processo tem que ser assegurada para se alcançar resultados bons e de alto desempenho. Os vários sistemas de ICP em uso possuem métodos diferentes para assegurar uma boa distribuição.

Todavia, o maior desvio da simetria circunferencial ocorre quando nenhum carvão é injetado numa dada ventaneira. Se nenhuma injeção for aplicada, a taxa de produção na ventaneira em particular irá dobrar. Por consequência, o operador do alto forno terá que tomar cuidado para que todas as ventaneiras estejam injetando carvão. Em especial, na situação onde duas ventaneiras próximas uma da outra não estejam injetando carvão, e o forno estiver operando sob altas taxas de ICP, a situação será bem séria e ações de curto prazo terão que ser tomadas para corrigir a situação.

5 – Injeção de carvão e outros combustíveis auxiliares



Operação Normal

Uma Ventaneira Bloqueada

Figura 30: Apresentação esquemática do efeito da ausência de ICP em uma ventaneira

Tabela 8: O uso de coque por ventaneira em caso uma única ventaneira não recebe nenhum carvão

ICP a todas ventaneiras		Uma ventaneira bloqueada
• Taxa de coque	300 kg coque/t	<ul style="list-style-type: none"> • Ventaneira consome 3.300 kg/hr, só coque • Aumento de produção nesta ventaneira sem ICP de: $3.300/1.600 = 205\%$
• ICP 200 (T.R. = 0.85)	170 kg coque/t	
• Total	470 kg coque/t	
• Produção	10 t/hr por ventaneira	
• Equilíbrio de carbono por ventaneira:		
• Coque	3,000 kg/hr	
• Carvão	1,700 kg/hr	
• Total	4,700 kg/hr	
• Iron carburisation	-500 kg/hr	
• A redução direta*	-900 kg/hr	
• Usado em ventaneiras		
• de qual carvão	1,700 kg/hr	
• de qual coque	1,600 kg/hr	

5.7 Outros combustíveis

Conforme informado, todos os tipos de materiais de injeção (hidrocarbonos) podem ser usados como combustível auxiliar. Uma comparação de composição química típica e efeito na temperatura da chama é apresentada na Tabela 9.

Tabela 9: Dados típicos de combustíveis de injeção

Combustível de injeção	Taxa de Reposição *)	C %	H %	Umidade %	Efeito na temperatura da chama °C **)
Carvão	0,80	78–82	4–5,5	1–4	- 32
Óleo	1,17	87	11	2	- 37
Gás natural	1,05	57	19	-	- 45
Alcatrão	1,0	87	6	2	- 25

*) Comparado ao coque com 87,5% C

**) Ao injetar uma quantidade adicional de 10 kg/ton. de Metal Quente

Capítulo 6

Cálculo da carga e balanços de massa

6.1 Introdução

O alto forno é carregado com pelotas, sinter, minério calibrado e coque, enquanto que o combustível adicional poderá ser injetado pelas ventaneiras. A aciaria requer uma qualidade definida para o metal quente e a escória tem que ser escolhida pelas propriedades otimizadas com relação à fluidez, capacidade de dessulfuração e assim por diante. Desta forma, o operador do alto forno tem que fazer cálculos para escolher a carga do alto forno. O capítulo atual primeiramente indica as condições para o cálculo da carga, as quais estão ilustradas com um exemplo prático. Na seção 2, o cálculo da carga é levado a um passo a frente para indicar os resultados do processo. Para esta finalidade, é usado um balanço simples de massa de único estágio.

6.2 Cálculo da carga: pontos de partida

Os pontos de partida para os cálculos da carga são as exigências de qualidade para o metal quente e a escória.

- Qualidade do metal quente: silício, tipicamente 0,4–0,5%. Baixo enxofre (<0,03%) e níveis definidos de fósforo (os quais variam devido à variação nos materiais da carga de 0,05% to 0,11%).
- Qualidade da escória: geralmente, quanto mais baixo o volume de escória melhor. Tipicamente os quatro principais constituintes da escória contêm aproximadamente 96% do volume total. Al_2O_3 9–12%, MgO 6–11%, SiO_2 28–34% e CaO 32–40%. O desenvolvimento para a escória é discutido no capítulo 11.

A carga tem que preencher os requerimentos com relação a:

- Admissão máxima de S – uma vez que quase todo o fósforo deixa o forno juntamente com o ferro.

6 – Cálculo da carga e balanços de massa

- Admissão máxima de álcali, especialmente o potássio, o qual pode atacar o refratário e afetar o processo. Tipicamente, um limite de 1–1,5 kg/tMQ é usado.
- Admissão máxima de zinco: o zinco pode condensar no forno e pode – de forma semelhante ao álcali – levar a um ciclo de Zn dentro do forno. Tipicamente, os limites são 100–150 g/tMQ. Note que, com altas temperaturas do gás central, o zinco e o álcali são removidos pelo topo.

Tabela 10: Cálculo simplificado da carga

Análise química								
	Cinza	Umidade	Perda	Fe	SiO ₂	CaO	MgO	Al ₂ O ₃
Coque	9%	5%	2%	0,5%	5,0%			3,0%
Carvão	6%	1%	0%	0,2%	3,0%			1,5%
Sínter		1%	1%	58%	4,0%	8,3%	1,4%	0,6%
Pelotas		1%	1%	65%	3,5%		1,3%	0,8%
Minério calibrado		3%	1%	61%	4,0%			1,0%
	Peso	Após perdas						
Carga	kg/tMQ	kg/tMQ		Admissão – kg/tMQ				
Coque	300	294		1	15	0	0	9
Carvão	200	200		0	6	0	0	3
Sínter	1.000	990		575	40	82	14	6
Pelotas	500	495		322	17	0	6	4
Minério calibrado	80	79		49	3	0	0	1
Total	1.580			947	81	82	20	23
Correção de silício MQ 0,46%= 10 kg SiO ₂ /tMQ					-10			
Escória					71	82	20	23
Resultados								
Volume escória *)			kg/tMQ	204	SiO ₂	CaO	MgO	Al ₂ O ₃
Composição escória					35%	40%	10%	11%
Basicidade	CaO/SiO ₂			1,16				
	(CaO+MgO)/SiO ₂			1,45				
	(CaO+MgO)/(SiO ₂ +Al ₂ O ₃)			1,10				
	Al ₂ O ₃			11%				
	Proporção mineral/coque			5,3				

*) $1.04x(\text{SiO}_2+\text{CaO}+\text{MgO}+\text{Al}_2\text{O}_3)$

6 – Cálculo da carga e balanços de massa

6.3 Um exemplo de cálculo de carga

O cálculo da carga usa como parâmetros de entrada a composição química (numa condição seca) e os pesos dos vários materiais numa carga. Uma carga se consiste de uma camada de material de carga e coque, juntamente com seus combustíveis auxiliares conforme injetados através das ventaneiras. De forma a ter condições de fazer os cálculos, as perdas de rendimento ao carregar o forno são também levadas em consideração. O exemplo atual é restrito aos componentes necessários para calcular a composição da escória. Os 4 componentes principais (SiO_2 , CaO , MgO e Al_2O_3) representam 96% do volume total de escória. A perda dos materiais carregados pelo topo no alto forno é levada em consideração e normalmente é baseada em amostras de material do coletor de pó e sistema de lavagem de gás. Os cálculos são apresentados na Tabela 10.

6.4 Cálculos de processo: um balanço de massa simplificado

Os cálculos da seção anterior podem ser estendidos para incluir o vento quente dentro do forno. Assim se fazendo, a entrega (produção) do forno poderá ser calculada: não apenas o metal quente e a composição da escória e a taxa de fluxo, mas também a composição do gás de topo. O cálculo da composição do gás de topo é feito de uma maneira gradual, na qual os balanços dos componentes do gás (nitrogênio, hidrogênio, oxigênio, CO e CO_2) e do ferro são feitos. Para os cálculos, são usados os dados de amostra do capítulo 2 e a abordagem gradual indicada na Tabela 11.

Tabela 11: Balanço de massa simplificado

Elemento de Entrada	Nitrogênio (N_2)	Hidrogênio (H_2)	Ferro (Fe)	Carbono (C)	Oxigênio (O_2)
Principais fontes	Vento quente	Injeção de Combustível Umidade do vento Quente	Carga	Coque Injeção de Combustível	Carga (52%) Vento quente (48%)
O que saber	% de N_2 no vento quente	% de H no combustível	% de Fe na carga	% de C no coque e combustível	% de O_2 no vento quente
Saída principal via	Gás do topo	Gás do topo	Metal quente	Gás do topo (85%) Metal quente (15%)	Gás do topo • CO (32%) • CO_2 (64%) • H_2O (4%)
O que saber	% de N_2 no gás do topo	Eficiência do H_2	Composição do metal quente	Composição da taxa por tonelada	
Cálculo do(a)	Volume do gás do topo	% de H_2 no gás do topo	Entrada de oxigênio via carga	Composição do Gás do topo % de CO e CO_2	

6 – Cálculo da carga e balanços de massa

A abordagem é conforme a seguir:

Passo 1 balanço de nitrogênio: do balanço de nitrogênio, o volume total do gás do topo é estimado.

Passo 2: balanço de hidrogênio: da admissão de hidrogênio e de uma utilização de hidrogênio=40%, o hidrogênio do gás do topo pode ser estimado. Na prática são encontradas utilizações de hidrogênio de 38–42%.

Passo 3: balanço de ferro e carbono: o uso de carbono por tonelada é conhecido a partir da composição química do metal quente e uso de coque e carvão por tonelada.

Passo 4: balanço de oxigênio: a composição da carga fornece a quantidade de oxigênio por tonelada de metal quente entrada no topo, enquanto que a quantidade de oxigênio com o vento quente é também conhecida por tonelada de metal quente.

Passo 5: os balanços podem ser combinados para calcular a composição do gás do topo.

Os cálculos são baseados em cálculos químicos básicos. Os pontos de partida para os cálculos são:

- 12 quilogramas de carbono é um número definido de átomos de carbono definidos como um quilomol,
- Cada mol de uma substância possui um certo peso definido pela “tabela periódica dos elementos químicos”,
- 1 quilomol de gás sob pressão atmosférica e a 0°C toma 22,4 m³ STP.

As propriedades dos vários componentes usadas para os cálculos estão indicadas na Tabela 12. O balanço atual é usado com propósitos educacionais. As cifras e as composições são números arredondados. Os efeitos da umidade no carvão pulverizado e o argônio no vento quente são desprezados.

Tabela 12: Propriedades de materiais usadas para cálculos de balanço de massa

	Peso atômico		Peso molecular	
N ₂	28	kg/quilomol	CO	28 kg/quilomol
O ₂	32	kg/quilomol	CO ₂	44 kg/quilomol
H ₂	2	kg/quilomol		
C	12	kg/quilomol		
Fe	55.6	kg/quilomol		
Si	28	kg/quilomol		

1 quilomol de gás (N₂, O₂, etc.) = 22,4 NM³

1 tonelada de metal quente contém 945 kg de Fe= 945/55,6 = 17,0 quilomol

6.4.1 Balanço de Nitrogênio

O nitrogênio não reage no alto forno, assim, ele escapa intacto através do gás do topo. Numa condição estável, a entrada é igual à saída e o volume do gás do topo pode ser calculado com um balanço de nitrogênio, dada a admissão de nitrogênio e a concentração de nitrogênio no gás de topo.

6 – Cálculo da carga e balanços de massa

Os dados de entrada para um modelo simplificado estão mostrados na Tabela 13 e o volume do gás de topo é calculado na Tabela 14.

Tabela 13: Admissão do balanço de massa

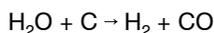
Volume do vento quente	6.500	m ³ STP/min		
Oxigênio no vento quente	25,6	%		
Umidade	10	g/m ³ STP		
Produção	6,9	tMQ/min		
Taxa de carvão	200	kg/tMQ		
Taxa de coque	300	kg/tMQ		
Gás de topo				
CO ₂	22	% vol		
CO	25	% vol		
H ₂	4,5	% vol		
N ₂	48,5	% vol		
	C%	H%	O%	N%
Carvão	78	4,5	7	1,4
Coque	87	0,2		1,4

Table 14: Balanço de nitrogênio e volume do gás de topo

Nitrogênio do vento quente	(1-0,256)x 6.500	4.836	m ³ STP/min
Do carvão		16	m ³ STP/min
Do coque		23	m ³ STP/min
Admissão total		4.875	m ³ STP/min
Nitrogênio no gás de topo		48,5	%
Volume do gás de topo		10.051	m ³ STP/min

6.4.2 Balanço de hidrogênio

A umidade no vento quente e no carvão reage com H₂ e CO de acordo com:



Todo hidrogênio no carvão e no coque é convertido em H₂ no forno. Uma vez que o volume do gás de topo é conhecido, assim como a admissão de hidrogênio, o hidrogênio no gás de topo poderá ser calculado, caso se assumira uma utilização de 40%. Existem maneiras de verificar a utilização de hidrogênio, porém estas estão além da abrangência do presente exercício. A Tabela 15 mostra a admissão e calcula o hidrogênio no gás de topo.

6 – Cálculo da carga e balanços de massa

Tabela 15: Balanço de hidrogênio

	kg/min	em m ³ STP/min
Do vento quente	7	
Do carvão	56	
Do coque	4	
Admissão total	67	750
40% de utilização, assim:		
Restante no gás de topo: 60%		450
Volume do gás de topo		10.051
% de H ₂ no gás de topo		4,5%

6.4.3 Balanço de ferro e carbono

O metal quente contém 945 kg de Fe por tonelada. O balanço é tirado pelo carbono (45 kg), silício, manganês, enxofre, fósforo, titânio e assim por diante. O teor preciso de Fe do metal quente depende ligeiramente do estado térmico do forno e qualidade da admissão. Para o balanço nós usamos 945 kg Fe/tMQ. Isto dá um total de $947/55,6 = 17$ quilomol.

O balanço de carbono é mais complicado. O carbono é queimado na frente das ventaneiras e é usado durante a reação de redução direta. O carbono deixa o forno via o gás de topo e com o ferro. O balanço de carbono é feito por tonelada de metal. A Tabela 16 mostra os resultados. O carbono via o gás de topo é também dado em quiloátomo por tonelada de metal quente.

Tabela 16: Balanço de carbono

Carbono usado	em kg/tMQ	quiloátomo/tMQ
Carbono do coque	261	
Carbono do carvão	156	
Uso total de carbono	417	
Carbono via ferro	-45	
Carbono via gás de topo	372	31,0

6.4.4 Balanço de oxigênio

O balanço de oxigênio é ainda mais complicado. O oxigênio é trazido para dentro do forno com o vento quente, com a Injeção de Carvão Pulverizado (ICP), com a umidade e com a carga. Ele deixa o forno pelo topo. A carga com sinter não contém apenas Fe₂O₃ (proporção O/Fe 1,5), mas também um pouco de Fe₃O₄ (proporção O/Fe 1,33). A proporção O/Fe usada é 1,46. O balanço é dado na Tabela 17.

6 – Cálculo da carga e balanços de massa

Tabela 17: Balanço de oxigênio

		m ³ STP/tMQ	kg O/tMQ	quiloátomo/tMQ
Admissão	Do vento quente	240	342	
	Da umidade do vento quente		8	
	Do carvão		14	
	Da carga		397	
Admissão total			762	
Saída via gás do topo			762	47,6

6.4.5 Cálculo da análise do gás de topo

O oxigênio no gás de topo deixa o forno em três estados diferentes:

- Ligado ao hidrogênio. A quantidade é conhecida, uma vez que nós sabemos a quantidade de hidrogênio que foi convertida em água de processo,
- Ligado ao carbono sob a forma de CO,
- Ligado ao carbono sob a forma de CO₂.

Uma vez que o oxigênio no gás de topo está deixando o forno nos três estados acima, nós podemos agora, a partir da combinação do balanço de carbono e do balanço de oxigênio, derivar a utilização do gás de topo, conforme mostrado na Tabela 18.

Tabela 18: Cálculo da utilização do gás de topo

		quiloátomo/tMQ		
Carbono via gás de topo		31,0		
Oxigênio via gás de topo		47,6		
Oxigênio ligado ao hidrogênio		-1,9		
Oxigênio sob a forma de CO e CO ₂		45,7		
Balanço de oxigênio: CO + 2*CO ₂		45,7		
Balanço de carbono: CO + CO ₂		31,0		
CO ₂		14,7		
CO		16,3		
Utilização	CO ₂ /(CO+CO ₂)	47,3%		
Volume de CO ₂	2.283	m ³ STP/min	CO ₂ %	22,7%
CO	2.539	m ³ STP/min	CO%	25,3%

Os cálculos podem ser usados para verificar os dados corretos de entrada. Modelos mais avançados estão disponíveis, os quais também levam em consideração o balanceador de calor das reações químicas. Os modelos são úteis para análise, especialmente questões como “nós estamos produzindo de forma eficiente?” e para previsão: “E se a ICP for aumentada?”, “E se a temperatura do vento quente for aumentada?” e assim por diante.



Capítulo 7

O processo: descida da carga e controle do fluxo de gás

7.1 Descida da carga: onde é criado o vazio?

A carga desce no alto forno após o gás ter se formado nas ventaneiras. O gás é distribuído através das camadas de coque e para dentro das camadas de minério, penetrando nas camadas da carga. A Figura 31 mostra uma apresentação da descida da carga. Ela é indicada com as stock rods (sondas de nível superior da carga), as quais se apóiam na superfície da carga e descem com a carga entre carregamentos. A superfície da carga desce a uma velocidade de 8–15 cm/minuto.

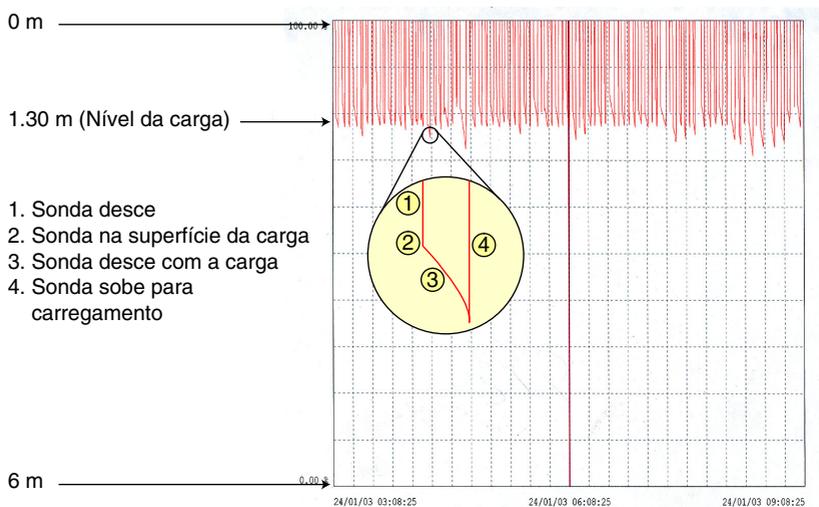


Figura 31: Descida estável da carga

7 – O processo: descida da carga e controle do fluxo de gás

De forma que a carga desça, têm que ser criados vazios em algum lugar do forno. Onde estes vazios ocorrem?

- Primeiro: o coque é queimado em frente as ventaneiras, por conseguinte, criando vazios nas ventaneiras.
- Segundo: o gás quente sobe pelo forno e funde o material da carga. Desta forma, o volume da carga começa a desaparecer na zona de fusão.
- Terceiro: o gotejamento de metal quente consome carbono. Ele é usado para a carbonização do ferro bem como para as reações diretas de redução. Assim, abaixo da zona de fusão o coque é consumido. Existe uma relação direta com a quantidade de metal quente produzida.

É possível indicar quanto cada um dos 3 mecanismos contribui.

Veja indicação na Figura 32. A maior parte dos vazios é criada na zona de fusão e na área imediatamente abaixo dela. Em nosso exemplo “alto forno” apenas aproximadamente 25% é criado como uma consequência da queima do coque nas ventaneiras.

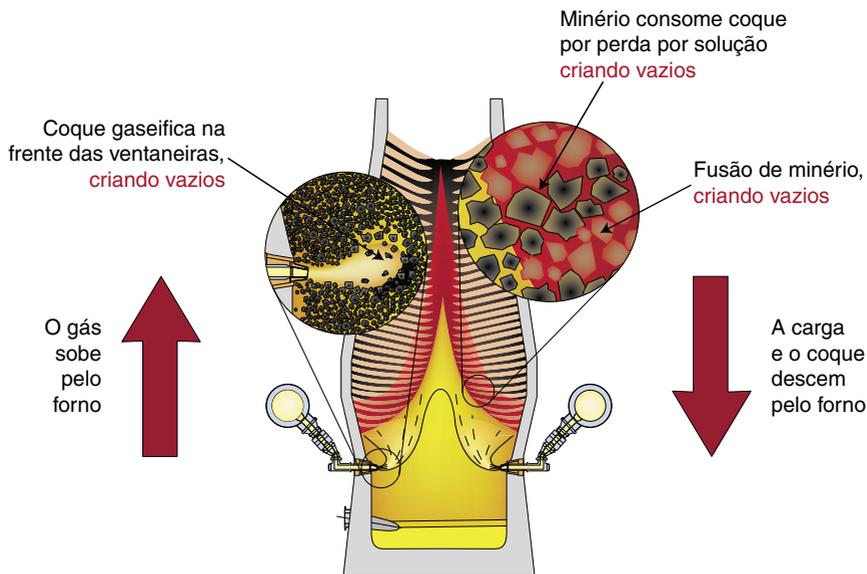


Figura 32: Criação de vazios no alto forno

Isto implica, que o fluxo da massa de materiais é fortalecido em direção ao anel, onde a maior quantidade de minério é carregada no forno. Desta forma, sob taxas de coque mais baixas, uma alta concentração de minério em qualquer anel da circunferência, especialmente na região da parede, tem que ser evitada.

Os materiais granulares da carga e o coque fluem bem facilmente através de silos, conforme pode ser observado na casa dos silos de um alto forno. Daí, na área do alto forno onde o material é granular, a massa flui com uma facilidade similar para as áreas de vazios. Não obstante, os operadores de alto forno estão familiarizados com cargas de descida deficiente (Figura 33 como exemplo). Da mesma forma, o

7 – O processo: descida da carga e controle do fluxo de gás

fenômeno de “engaiolamento” (quando não há descida da carga) e “arriamentos” (descida rápida e descontrolada da carga) são familiares. A partir da análise nesta seção, segue-se que, falando de uma forma geral, a causa da descida deficiente da carga tem que ser encontrada na configuração da zona de fusão (uma outra possibilidade é a formação de cascões na parede).

Perceba também que os vazios são criados no forno mesmo se o forno não estiver descendo. As forças de ação contrária que impedem uma descida apropriada da carga são discutidas na próxima seção.

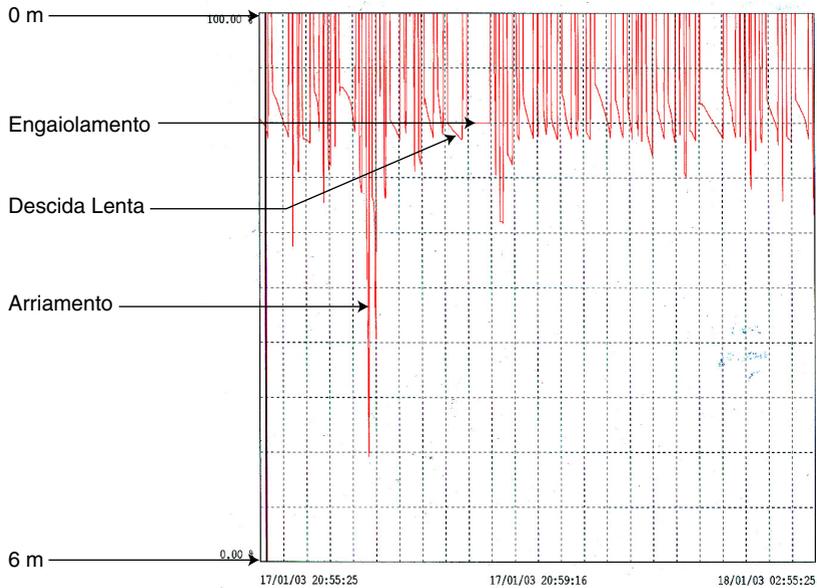


Figura 33: Descida irregular da carga

7.2 Descida da carga: sistema de forças verticais

A carga desce devido ao fato das forças descendentes (de sentido para baixo) da carga excederem as forças de ação contrária ascendentes (de sentido para cima). A força descendente mais importante é o peso da carga, a força ascendente mais importante é a diferença de pressão entre o vento quente e a pressão do topo. O lado mais baixo da zona de fusão é a área com a mais alta perda de carga, e também com a mais alta força ascendente. Se esta diferença de pressão se tornar muito alta, a descida da carga poderá sofrer distúrbios (Figura 34). Além disto, o coque submerso no metal quente exerce também uma alta força ascendente na carga devido as forças de flutuação (Figura 35).

7 – O processo: descida da carga e controle do fluxo de gás

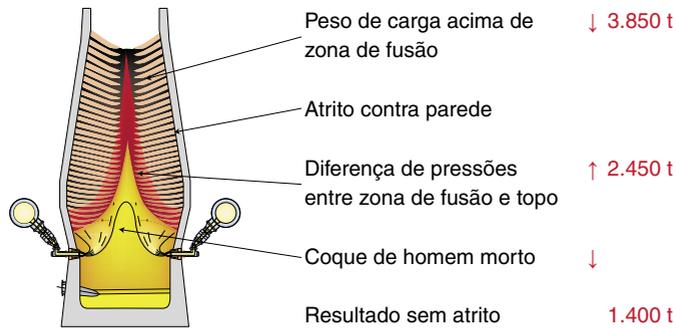


Figura 34: Sistema de forças verticais num alto forno

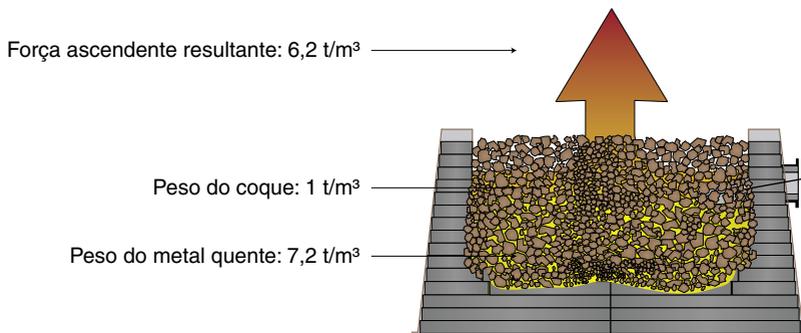


Figura 35: Força ascendente do líquido do cadinho

Na prática operacional uma descida falha da carga é freqüentemente um indicador de um processo deficiente do alto forno. As razões podem ser:

- A força ascendente está alta demais. Operadores experientes têm ciência da diferença máxima de pressão pela carga que proporciona uma operação suave.
- É sabido também que um forno quente apresenta uma descida mais imperfeita da carga. Isto se deve ao fato de que a zona de fusão está localizada numa parte mais alta no forno, o que aumenta a área sobre a qual a diferença de pressão exerce força ascendente, sendo que a força descendente fica menor, devido ao menor peso da carga acima da zona de fusão.
- A descida da carga pode ser muito sensível à operação da casa de corrida por causa da força ascendente mencionada do coque submerso.
- A força descendente é contida pelo material sendo amolecido e fundido na zona de fusão, levando a formação de ponte. Este problema poderá ser resolvido através de ajustes na distribuição da carga.

7.3 Fluxo do gás no alto forno

O gás gerado nas ventaneiras e abaixo, e na zona de fusão, possui um curto tempo de residência de 6 a 8 segundos no alto forno. Durante este tempo, o gás se resfria da temperatura de chama para a temperatura do gás de topo, de 2.000–2.200°C

7 – O processo: descida da carga e controle do fluxo de gás

para 100–150°C, enquanto que, o oxigênio é simultaneamente removido da carga. A distância vertical entre as ventaneiras e o stock line (linha do nível da carga) é de aproximadamente 22 metros. Desta forma, a velocidade do gás no forno é bem limitada: numa distância vertical ± 2 a 5 m/s, o que é comparável com uma velocidade de vento de 2 a 3 na escala de Beaufort. Agora a questão é: como o gás gerado na zona de combustão é distribuído pelo forno.

Primeiramente considere a diferença entre as camadas de coque e a carga de minério. É importante notar, conforme indicado na Figura 36, que a carga de coque e minério possui uma resistência mais alta a vazão do gás do que o coque. O perfil da resistência do forno determina como o gás flui pelo forno. O fluxo de gás pela parede pode ser derivado das perdas de calor ou das temperaturas da face quente, uma vez que o gás aquece a parede.

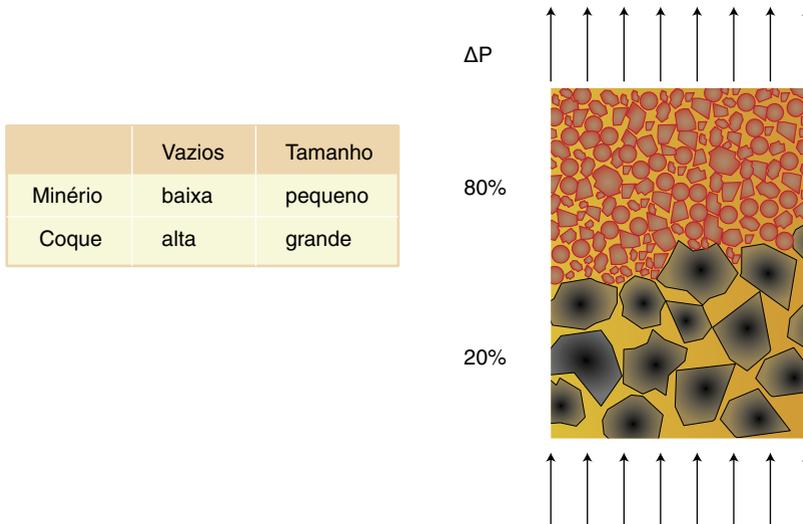


Figura 36: Perda de pressão pelo coque e minério

7.3.1 Observação dos fluxos térmicos pela parede

A Figura 37 mostra a temperatura na face quente da parede do forno. Tem sido observado em muitos fornos, que a temperatura sobe repentinamente em minutos e diminui durante a(s) próxima(s) hora(s). Isto é freqüentemente atribuído ao desprendimento de cascões (solidificações) na parede do forno.

A explicação apresentada neste livro é que tais excursões de temperatura são devido à “presença de caminhos curtos” do gás pela da parede do forno. Estes “caminhos curtos” são devidos à formação de aberturas ao longo da parede do forno criando uma área muito permeável pela qual os gases quentes irão preferencialmente fluir. Foram observadas baixas concentrações de CO_2 na parede durante tais excursões e confirmam a “presença de caminhos curtos”. A premissa

7 – O processo: descida da carga e controle do fluxo de gás

básica do presente livro é que as perdas térmicas pela parede são causadas pelo fluxo de gás ao longo das paredes.

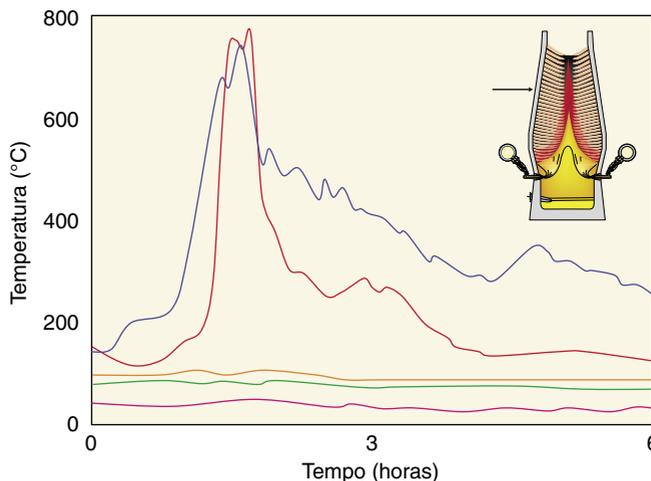


Figura 37: Temperatura na face quente

Porque o gás flui ao longo da parede? O gás toma a rota que oferece a resistência mais baixa. A resistência para a vazão do gás num alto forno carregado está localizada nas camadas de minério, tendo em vista que a permeabilidade inicial delas é de 4 a 5 vezes inferior a permeabilidade das camadas de coque. Existem duas áreas no alto forno que possuem a mais alta permeabilidade: o centro do forno, caso ele contenha coque suficiente, e a região da parede. Na parede pode haver aberturas (espaços vazios) entre a carga sob descida e a parede. No centro do forno poderá haver um alto percentual de coque e poderá haver minério relativamente grosso da carga devido à segregação.

Os materiais da carga carregados no centro do forno começam a se amolecer e fundir quando alcançam 1.100°C . Assim ocorrendo, a camada da carga desaba e se torna (quase) impermeável ao gás. Nesta situação o fluxo central do gás é bloqueado.

7.3.2 Dois tipos básicos de zona de fusão

A eficiência do forno é determinada pela quantidade de energia usada no processo. As perdas térmicas na parede e o excesso de temperatura do gás do topo são exemplos de perdas de energia. O gás do topo contém CO e H_2 , possuindo um alto valor calorífico. Desta forma, a eficiência de um alto forno é determinada pelo progresso das reações químicas e, por conseguinte, o fluxo de gás pelo forno. Dois tipos básicos de distribuição de gás podem ser discriminados: o forno com "marcha central" e o forno com "marcha periférica". O estudo destas classificações foi desenvolvido para explicar as diferenças na operação. Padrões intermediários

7 – O processo: descida da carga e controle do fluxo de gás

podem também ser observados.

No forno com “marcha central”, o fluxo de gás é direcionado em direção ao centro. Neste caso, o centro do forno contém apenas coque e materiais grossos da carga e é de boa permeabilidade. A zona de fusão assume uma “forma de V invertido”.

Num forno com “marcha periférica”, o fluxo do gás pelo centro é bloqueado, por exemplo, pelo material da carga em amolecimento e fusão. O gás flui preferencialmente pela zona com a melhor permeabilidade, ou seja, a região da parede. Neste caso, a zona de fusão assume a “forma de um W”. A Figura 38 mostra ambos os tipos.

Ambos os tipos de fluxo de gás podem ser usados para operar um alto forno, mas possuem suas próprias desvantagens. O controle do fluxo de gás é alcançado com a distribuição da carga.

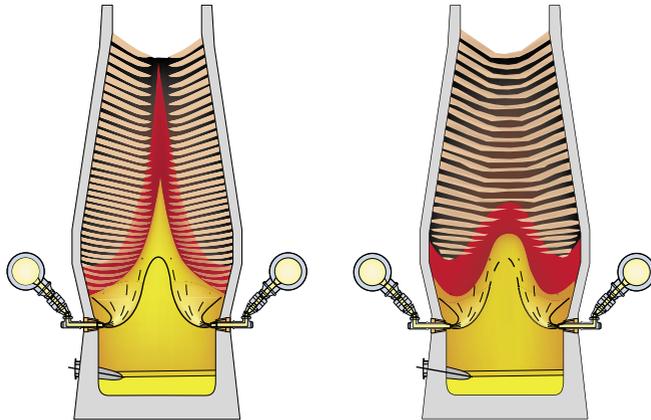


Figura 38: Dois tipos de zona de fusão, marcha central e marcha periférica

7.3.3 Forno com marcha central

Os dois tipos de fluxos de gás pelo forno podem ser alcançados com a ajuda da distribuição da carga. Na Figura 39 a proporção minério / coque pelo raio é mostrada para um forno com marcha central. Na Figura, o centro do forno só contém coque. Desta forma, nenhuma zona de fusão é formada no centro do forno e o gás é distribuído através das incisões de coque, a partir do centro e em direção ao raio externo do forno. A zona de fusão assume a forma de um V ou até mesmo a de um U invertido. A coluna de coque central não apenas age como um distribuidor de gás, mas também como um tipo de válvula de pressão: ela funciona para estabilizar a pressão do vento quente.

7 – O processo: descida da carga e controle do fluxo de gás

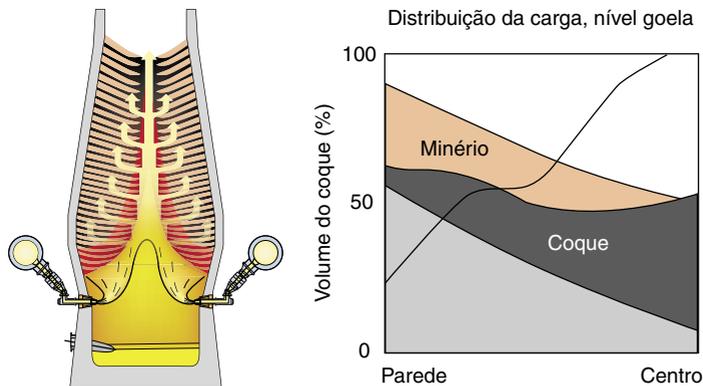


Figura 39: Forno com marcha central

A forma na qual o coque é colocado no centro do forno dependerá do tipo de equipamento de distribuição de carga usado. Com um topo sem cone (bell-less top), as posições da colher de carregamento mais voltadas para o centro poderão ser usadas. Com um sistema de duplo cone, o coque tem que ser levado ao centro do forno pelo empuxo do coque (veja abaixo) e pela escolha da espessura correta da camada de minério, de forma a impedir o abarrotamento do centro com materiais da carga.

Em um forno funcionando com marcha central existe uma quantidade relativamente pequena de gás quente na parede do forno: por conseguinte, baixas perdas térmicas. Como resultado, a fusão da carga na região da parede ocorre próximo as ventaneiras. Daí, a raiz da zona de fusão fica baixa no forno. O risco deste tipo of processo é que a carga de minério não é completamente fundida antes de passar pelas ventaneiras. Isto poderá levar a presença de torrões (pedaços) de carga amolecida de minério, o que poderá ser observado pelos orifícios de observação das ventaneiras. Isto poderá levar a condições que vão de um ligeiro resfriamento do forno (pelo aumento da redução direta) e qualidade irregular do metal quente, até a resfriamentos severos e danos as ventaneiras.

O risco de uma raiz da zona de fusão muito baixa tem que ser controlado através do gás e da distribuição da carga. As medidas operacionais são apresentadas a seguir:

- Manter um percentual de coque suficientemente alto na parede. Pode-se conseguí-lo também através do uso de coque em nozes na região da parede. Perceba que uma camada de minério de 55 cm na goela necessita de aproximadamente 20 a 22 cm de coque para a carbonização e redução direta. Assim, se o percentual de coque na parede for inferior a 27%, uma coluna contínua de carga será feita na parede.
- Assegure um fluxo de gás mínimo pela parede na rampa e ventre, o que poderá ser observado pelas medições de perdas térmicas e/ou leituras de temperatura. Se o fluxo de gás pela parede se tornar muito pequeno, ele poderá ser aumentado por meios da distribuição da carga (mais coque carregado junto à parede ou um fluxo menor de gás no centro do forno) ou através do aumento do volume do gás por tonelada de metal quente (pela diminuição do oxigênio).

7 – O processo: descida da carga e controle do fluxo de gás

- Controlar o fluxo de gás central. Note que o fluxo de gás pelo centro deixa o forno com um alto percentual de CO e H₂ e com uma alta temperatura. A proporção de energia do gás central não é eficientemente usada no processo e, por consequência, o fluxo do gás central deverá ser mantido a um mínimo.

O forno funcionando com marcha central poderá proporcionar resultados muito bons de processo com relação à produtividade, qualidade do metal quente e taxa de combustível. Ele leva também a uma campanha de longa duração do forno acima das ventaneiras. Todavia, o processo fica muito sensível aos desvios nos materiais da carga (especialmente a distribuição de tamanhos), a operação da casa de corrida e a consistência operacional, em particular com relação à simetria circunferencial.

7.3.4 Forno com marcha periférica

Na Figura 40 é mostrado o forno funcionando com marcha periférica. A carga de minério sob fusão bloqueia o centro do forno e o fluxo de gás é direcionado para a região da parede.

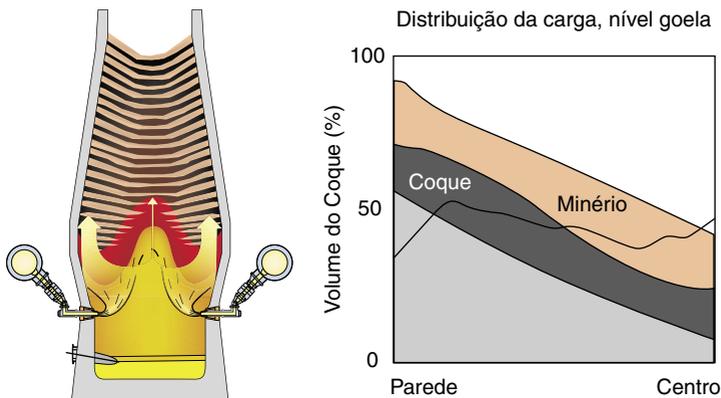


Figura 40: Forno com marcha periférica

O fluxo de gás causa altas perdas térmicas na área do forno onde uma abertura (espaço vazio) possa se formar entre a carga e a parede, isto é, na cuba inferior e média. A zona de fusão assume a forma de um W ou até mesmo a forma de um disco. Nesta situação, a raiz da zona de fusão fica mais alta, acima das ventaneiras, o que torna o processo menos sensível a inconsistências. O processo poderá ser operado bem eficientemente. Todavia, devido às altas perdas térmicas, o desgaste do refratário na cuba é muito mais acentuado do que no caso do forno funcionando com marcha central. O gás passando pela parede poderá também se resfriar rapidamente e, ao assim ocorrer, perderá sua capacidade de redução. Não obstante, as flutuações na diferença de pressão pela carga são mais acentuadas, o que leva a limitações de produtividade.

7.3.5 Distribuição do gás pelas camadas de minério

O gás é distribuído através do forno pelas camadas de coque.

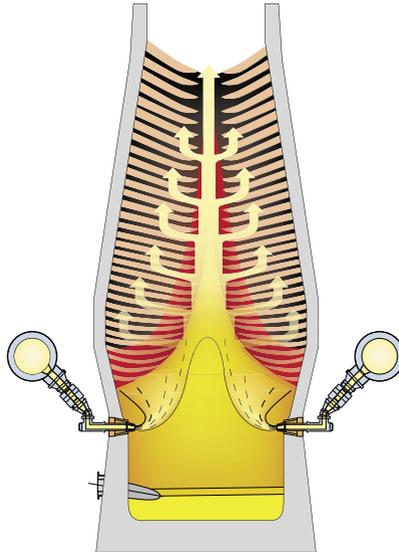


Figura 41: Apresentação esquemática da distribuição do gás pelas camadas de coque

As camadas da carga são responsáveis, em princípio, por aproximadamente 80% da resistência ao fluxo de gás. O processo de redução ocorre dentro das camadas de minério.

O que determina o contato entre o gás e as camadas da carga?

O fator mais importante na determinação da permeabilidade para o fluxo de gás é a quantidade de vazios entre as partículas. Conforme mostrado na Figura 41 os vazios entre as partículas dependem fortemente da fração de partículas grossas e pequenas (V_g/V_p). Quanto mais ampla for a distribuição dos tamanhos, menor será a quantidade de vazios. Não obstante, quanto mais finos forem os materiais, mais baixa será a permeabilidade (Capítulo 3).

Em operações práticas, a permeabilidade dos materiais da carga é determinada pela quantidade de finos (% < 5 mm). Os finos são distribuídos de forma bastante não-uniforme pelo raio do forno.

Na Figura 42 um exemplo típico da distribuição de finos pelo raio é indicado. Os finos se concentram pela parede, especialmente sob o ponto de impacto da nova carga com a stock line.

7 – O processo: descida da carga e controle do fluxo de gás

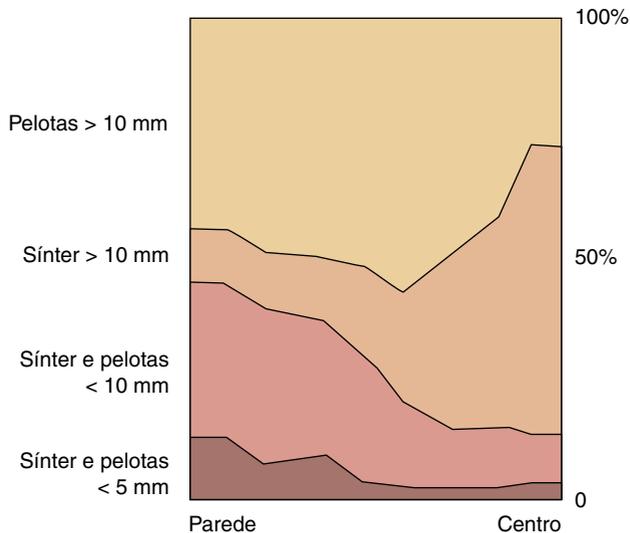


Figura 42: Distribuição de finos pelo raio (Geerdes et al, 1991)

Se for usado um topo sem cone, os pontos de impacto podem ser distribuídos pelo raio. Com um sistema de carregamento de duplo cone os finos se concentram num anel estreito na superfície da carga e próximo da parede. Quando a carga está descendo, os materiais mais grossos na carga acompanham a parede, enquanto que os finos preenchem os buracos entre as partículas maiores e não acompanham a parede na mesma proporção que as partículas mais grossas. Desta forma, durante a descida, os finos na carga tendem a se concentrarem ainda mais.

Não obstante, a sínter e o minério calibrado podem quebrar em partículas menores durante o primeiro passo da redução (de hematita para magnetita). Este efeito será mais acentuado quanto mais lentamente o material for aquecido. Por conseguinte, quanto mais lentamente o material for aquecido, maior será a quantidade de finos gerados. Em suma:

- A permeabilidade do minério é determinada pela quantidade de finos.
- A quantidade de finos é determinada pela(o):
 - eficiência do peneiramento na casa dos silos,
 - degradação física durante o transporte e o carregamento,
 - método de distribuição de carga usado,
 - propriedades de quebra da carga, em partículas menores, sob baixa temperatura.

Os efeitos mencionados – concentração de finos no carregamento e durante a descida, e quebra em partículas menores sob baixa temperatura – causam, em muitos altos fornos em operação, um “anel” de material de carga com uma permeabilidade deficiente. Em particular, este anel de material causa muitos distúrbios operacionais.

7.4 Fluidização e canalização (formação de chaminés)

A velocidade média do gás acima da carga é bem baixa, conforme mostrado no capítulo 2. Entretanto, num forno funcionando com marcha central, a velocidade do gás poderá alcançar localmente 10 m/s, ou mais especificamente no centro do forno. Isto está bem acima das velocidades teóricas do gás na qual a fluidização pode ser observada. O coque fluidiza muito mais facilmente do que a carga de minério devido ao seu tamanho maior e densidade mais baixa. Aparentemente, o minério dos materiais da carga fixa as partículas de coque no centro. De qualquer forma, se as velocidades do gás local estiverem se tornando muito altas, poderá ocorrer fluidização. Se a fluidização se estender para a parte mais baixa do forno, poderá ocorrer a canalização (formação de chaminés), o que cria “caminhos curtos” entre a parte mais baixa do forno (ou até mesmo a zona de combustão) e o topo. A canalização é observada como sendo uma consequência de problemas operacionais. Por exemplo, vazamentos (corridas) atrasados podem criar velocidades mais altas do gás local e podem levar a canalização. Durante a canalização, o gás poderá escapar pelo topo com uma temperatura muito alta e uma baixa utilização, uma vez que o gás não estará num contato apropriado com a carga.

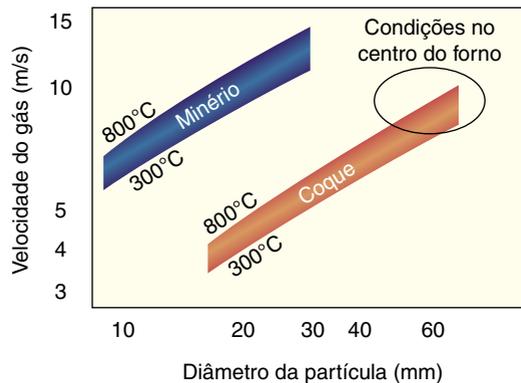


Figure 43: Velocidades de gás para fluidização de minério e coque. A área indicado varia de 800°C a 300°C, pressão de 1 atmosfera. (Base: Biswas, 1981)

7.5 Distribuição da carga

A distribuição da carga pode ser usada para controlar o fluxo de gás do alto forno. A plataforma conceitual de trabalho de uso da distribuição da carga é bem complexa, uma vez que a distribuição da carga é consequência da interação das propriedades dos materiais da carga com o equipamento de carregamento. No caso da fluidização, o fluxo de gás pode também afetar a distribuição da carga.

7.5.1 Propriedades dos materiais da carga

A Figura 44 mostra os ângulos de repouso dos vários materiais usados num alto forno. O coque possui o ângulo mais acentuado (íngreme) de repouso. As pelotas possuem o mais baixo ângulo de repouso e a sínter fica entre os dois. Daí, num forno carregado com pelotas as pelotas têm tendência a rolar para o centro.

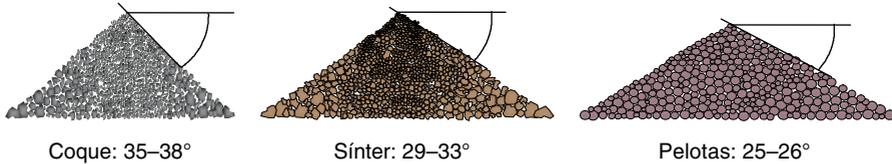


Figura 44: Segregação e ângulos de repouso

Os finos se concentram no ponto de impacto: as partículas grossas fluem “monte abaixo” ao passo que as partículas finas permanecem abaixo do ponto de impacto. Este mecanismo conhecido como segregação é também ilustrado na Figura 454.

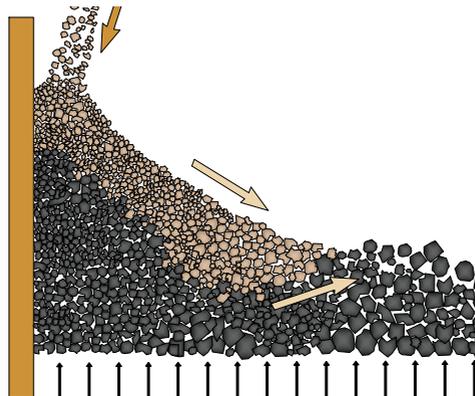


Figura 45: Efeito de empuxo do coque com o fluxo de gás

Quando a carga é carregada no forno, as partículas grossas de coque no topo da camada de coque se deslocam em direção ao centro. Este efeito é chamado empuxo do coque e é mais acentuado quando o forno está sob sopro. Ele é ilustrado na Figura 45.

7.5.2 O equipamento de carregamento

O tipo de mecanismo de carregamento usado desempenha um papel de grande importância na distribuição dos finos. A Figura 46 mostra os sistemas de topo sem cone (bell-less top) e topo de duplo cone (double bell). Em um topo sem cone, existe a possibilidade de distribuir os finos da carga pelos vários pontos de impacto movendo a colher para diferentes posições verticais. O coque pode ser trazido para o centro através da programação do ciclo de carregamento.

7 – O processo: descida da carga e controle do fluxo de gás

Com um sistema de carregamento de duplo cone existe uma possibilidade menor de variação dos pontos de impacto e os finos ficarão concentrados em anéis mais estreitos. Os altos fornos modernos com sistemas de carregamento de duplo cone, na maioria dos casos, são equipados com uma armadura (blindagem) móvel, o que dá uma certa flexibilidade com relação à distribuição de finos e para a proporção minério / coque pelo diâmetro. Contudo, sua flexibilidade é inferior a do sistema mais versátil de topo sem cone.

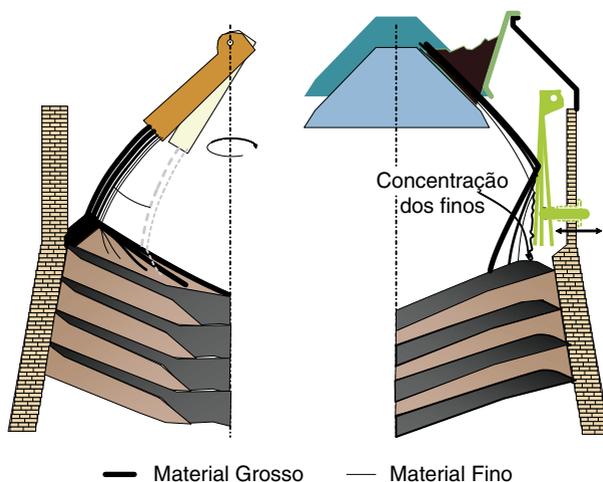


Figura 46: Carregamento com topo sem cone e carregamento com duplo cone: comparação da segregação de finos na linha de nível da carga (stock line)

7.5.3 Formação da camada mista

A linha de pensamento aplicada até aqui toma camadas limpas de minério e coque como porto de partida. Todavia, uma vez que o diâmetro médio do coque de 45 a 55 mm é muito maior do que o das pelotas e sinter (tipicamente < 15 mm e < 25 mm respectivamente), os componentes da carga jogados numa camada de coque tenderão a formar uma camada mista. Esta camada mista terá uma permeabilidade comparável à da camada de minério. A formação das camadas mistas é também produzida pelas partes salientes ou desviadas da parede: tais como placas de refrigeração salientes, placas ausentes na coroa de choque, desgaste do refratário na goela e assim por diante. As camadas mistas possuem uma permeabilidade diferente e podem culminar no surgimento de uma assimetria circunferencial de processo.

7.5.4 Controle do fluxo de gás

O fluxo de gás otimizado em um forno moderno, sendo operado em alta produtividade e com uma baixa taxa de coque, possui o tipo de zona de fusão com a forma de um V invertido, conforme descrito acima. Contudo, o gás que escapa pelo

7 – O processo: descida da carga e controle do fluxo de gás

centro (sem minério) deixa o forno com uma baixa utilização. Esta perda de gás “não usado” deve ser minimizada.

Se o fluxo de gás central for muito alto, a raiz da zona de fusão se aproxima demais das ventaneiras. Nesta situação, a taxa de combustível será alta e haverá uma grande chance de dano as ventaneira. É essencial que o gás fluindo pelo centro de distribua pelas incisões de coque até as camadas da carga. Desta forma, a permeabilidade da coluna de coque central não deverá ser muito alta. Isto significa que o diâmetro da coluna central de coque não poderá ser muito grande.

Se o fluxo do gás central for (parcialmente) bloqueado, o gás escapará ao longo da parede e se resfriará. O resultado é que o contato entre o gás e a carga fica insuficiente. Nesta situação o fluxo de gás central é pequeno e as perdas térmicas são altas.

Nossa experiência tem mostrado que o fluxo de gás pela parede e o fluxo de gás central estão fortemente correlacionados. O controle do fluxo de gás está baseado na manutenção do equilíbrio entre o fluxo de gás central e o fluxo de gás pela parede.

A dificuldade com o controle do fluxo de gás é que o fluxo de gás é influenciado por muitas mudanças nos componentes da carga, parâmetros de processo e situação da instalação. Em particular, a variação no percentual de finos próximo da (mas não na) parede, e as propriedades de quebra dos materiais da carga sob baixa temperatura são importante.

De forma a controlar o fluxo de gás, ele é monitorado de perto. A instrumentação do alto forno se encontra descrita na próxima seção. Os parâmetros mais importantes para definir a situação do processo são:

- A descida da carga (sondas de nível da carga, tomadas de pressão) e a queda de pressão pela carga,
- As perdas térmicas da parede ou temperaturas na parede,
- A composição do gás na linha do nível da carga e o perfil da temperatura.

O controle do fluxo de gás e a distribuição otimizada da carga são encontrados com base em tentativa e erro, e têm que ser desenvolvidos para cada forno de forma individual. Algumas observações gerais podem ser feitas.

1. O fluxo de gás é, em sua maioria, controlado com a proporção coque / minério pelo raio. Um exemplo de uma distribuição calculada da carga é mostrado na Figura 45. Perceba o centro sem minério.
2. O centro do forno deverá ser permeável e nenhuma, ou uma quantidade mínima, de carga de minério grosso deverá estar presente.
3. O percentual de coque na parede não deverá ser muito baixo. Note que 55 cm de minério na goela consome aproximadamente 20 cm de coque para redução direta e carbonização. Uma coluna vertical contínua de material da carga deverá ser evitada. Uma incisão de coque deverá ser mantida entre todas as camadas de minério.
4. A concentração de finos próxima à parede deverá ser evitada.

7 – O processo: descida da carga e controle do fluxo de gás

5. O fluxo de gás central é comandado pela quantidade da carga de minério que alcança o centro. A quantidade de minério que alcança o centro depende muitíssimo da espessura da camada de minério e da quantidade de torrões de coque grosso. Para se chegar a um fluxo estável de gás, o fluxo de gás central deverá ser mantido o mais consistente possível e, conseqüentemente, quando forem necessárias mudanças na proporção minério / coque, a camada de minério deverá ser mantida constante em primeiro lugar. Isto é de especial importância ao alterar o nível de injeção de carvão. Nesta situação são feitas grandes mudanças na espessura relativa da camada de minério e coque.

Na situação prática, pequenas mudanças na espessura da camada de minério poderão influenciar fortemente o fluxo de gás central.

Um exemplo de um esquema de controle para distribuição da carga é apresentado na Tabela 19. Se for necessário um fluxo maior de gás central, a programação Coque 2 é substituída pela Coque 3. Um fluxo menor de gás central é obtido pela substituição da programação Coque 2 pela Coque 1.

Tabela 19: Programas de carregamento do topo sem cone com fluxo de gás central sob variação

	Posição	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	
		Parede										Centro	
Coque 1	Mais central	–	14%	14%	16%	14%	14%	14%	–	6%	–	8%	
Coque 2	Normal	–	14%	14%	14%	14%	14%	14%	–	6%	–	10%	
Coque 3	Menos central	–	14%	14%	12%	14%	14%	14%	–	6%	–	12%	
Minério		16%	16%	16%	12%	10%	10%	10%	10%				

Programações semelhantes poderão ser desenvolvidas para um sistema de carregamento de duplo cone. Com um sistema de carregamento de duplo cone, o uso da espessura da camada de minério poderá também ser aplicado: uma camada menor de minério proporciona um fluxo de gás central mais alto e vice versa.

Se for necessária uma grande mudança na taxa de coque, o operador terá a opção de mudar a base de minério e manter a base de coque constante, ou mudar a base de coque e manter a base de minério constante. Ambas as filosofias podem ser aplicadas com êxito. Os operadores que mantêm a base de coque constante indicam o papel essencial do coque para a manutenção da permeabilidade do alto forno.

Os autores são a favor de um sistema no qual a base de minério é mantida constante. A distribuição do gás é comandada pelo padrão de resistência das camadas da carga de minério e – conforme mencionado acima – pela quantidade da carga de minério que chega ao centro. Esta última poderá mudar substancialmente ao alterar a base de minério, especialmente em fornos equipados com sistema de carregamento por duplo cone.

Um exemplo ilustrativo mostrando uma mudança na taxa de coque de 350 kg/

7 – O processo: descida da carga e controle do fluxo de gás

tMQ para 300 kg/tMQ é apresentado na Tabela 20. A base de minério é mantida constante e a base de coque é reduzida. A experiência tem mostrado que serão necessárias mudanças relativamente muito pequenas na distribuição da carga para a otimização do fluxo de gás central (ou seja, distribuição do coque). Os ajustes na distribuição da carga podem ser aplicados como um segundo passo, se necessário.

Tabela 20: Mudança na base de coque quando a taxa da ICP se altera

	Situação Anterior	Nova Situação
Taxa de coque	350 kg/tMQ	300 kg/tMQ
Base de coque	21 t	18 t
Base de minério	90 t	90 t
Distribuição da carga		Não mude até que seja necessário

As mudanças na distribuição da carga deverão estar baseadas numa análise das causas das mudanças no fluxo de gás. O fluxo de gás poderá também ser influenciado por problemas operacionais, tais como um nível baixo da carga ou problemas na casa de corrida. Nesta situação, os ajustes na distribuição da carga não irão proporcionar resultados satisfatórios. As perdas térmicas pela parede estão muito ligadas à descida da carga. Desta forma, a causa de altas cargas térmicas deverá ser analisada no contexto de outros dados de processo.

Um exemplo de uma distribuição de carga é mostrado na Figura 47.

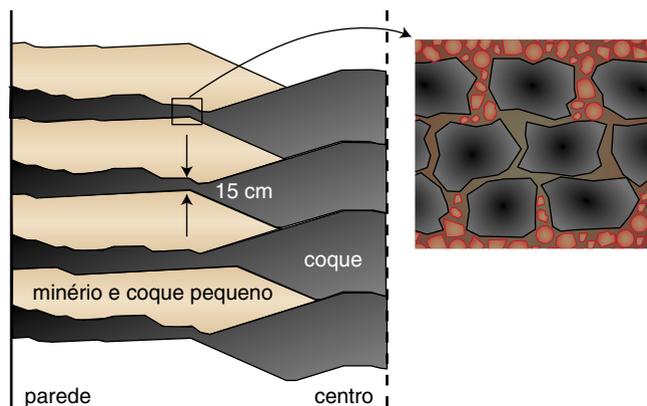


Figura 47: Exemplo de distribuição de carga com um centro sem minério

7.6 Descida anormal da carga e fluxo de gás

O gás no forno é distribuído pelas camadas de coque. A espessura da camada de coque na goela fica tipicamente na faixa de 45 a 55 cm. Em nosso exemplo na seção 2.3 a espessura é de 45 cm. O diâmetro do ventre é mais de 45% maior do

7 – O processo: descida da carga e controle do fluxo de gás

que o diâmetro do da goela. Daí, a superfície mais do que dobra durante a descida da carga e a espessura da camada é reduzida para menos da metade da espessura da camada na goela. As regras gerais no Japão indicam que a espessura da camada no ventre não deve ser inferior a 18 cm. Todavia, os autores têm tido êxito trabalhando com uma espessura da camada de coque no ventre de 14 cm.

O que poderá acontecer quando houver um ligeiro deslizamento de carga no forno? Isto está indicado na Figura 48: a distribuição consistente do gás pelas incisões de coque é bloqueada e o equilíbrio entre o processo de redução e o fluxo de gás nas camadas de minério é perturbado. Isto levará a um processo menos eficiente, uma redução direta aumentada e a um esfriamento em potencial do forno.

Só ocorrerá deslizamento de carga se houver vazios nas partes mais baixas do forno. O coque granular, as pelotas e a sínter fluem facilmente pelos silos da casa dos silos. Desta forma, os vazios no forno estão na zona de fusão ou abaixo dela. Isto também significa que, se um deslizamento for observado, ele ocorrerá sobre uma região substancial no forno, acima dos vazios que desabaram (10 metros ou mais). A estrutura da formação da camada será significativamente perturbada.

7 – O processo: descida da carga e controle do fluxo de gás

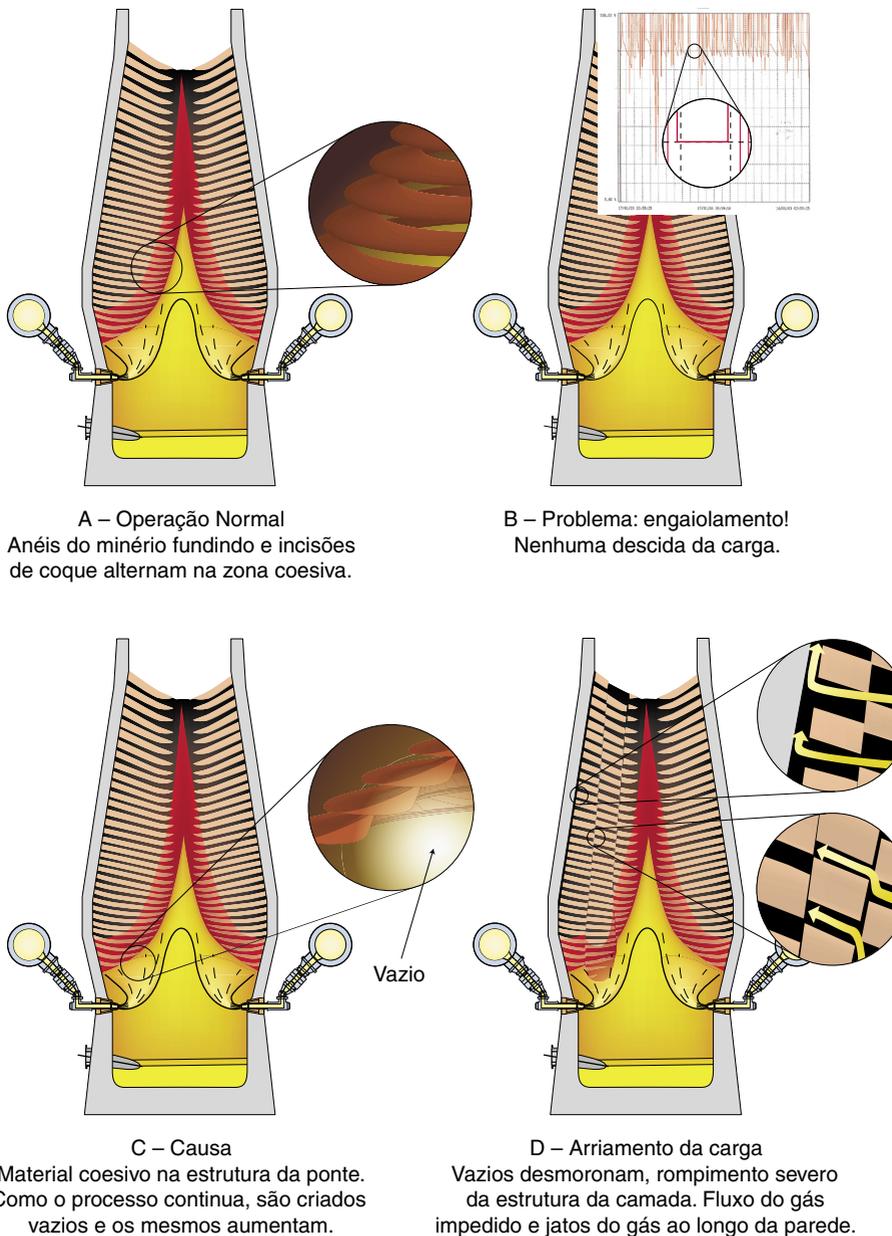


Figura 48: Efeito da descida irregular da carga

7.7 Instrumentação do alto forno

Uma visão geral da instrumentação do alto forno, conforme discutido em várias partes do texto, é apresentada na Figura 49.

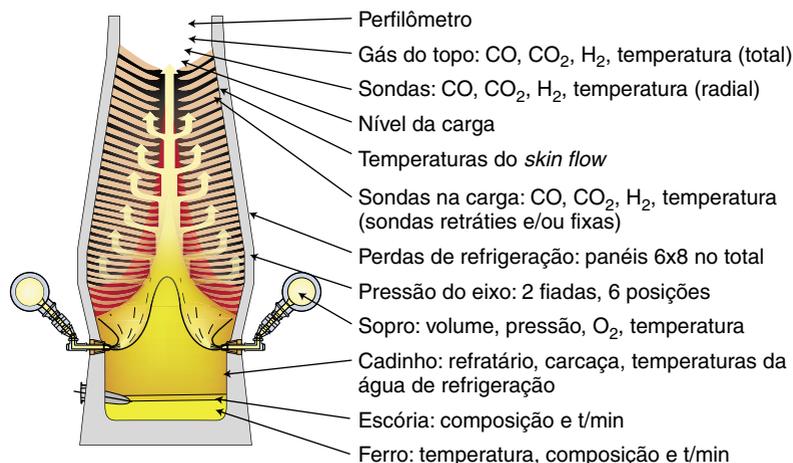


Figura 49: Visão geral da instrumentação do alto forno

7.8 Controle operacional diário do alto forno

O controle operacional diário do alto forno é discutido no presente capítulo.

Todos os dias, ou até mesmo em todos os turnos de trabalho, o processo tem que ser controlado. Os alvos do controle são:

- Composição correta do ferro e da escória: a carga metálica e o coque são ajustados para se obter a composição química correta do ferro e da escória. Com relação a esta última, em particular a basicidade da escória, ela é importante por causa do seu efeito no enxofre do metal. Uma composição correta do ferro e da escória também implica no controle do nível térmico, uma vez que o silício do metal quente está correlacionado com a temperatura do metal quente. Assim, existe a necessidade diária de se fazer cálculos para a carga com uma análise química atualizada dos componentes da carga e da carga real, e ajustes freqüentes do nível térmico do forno. Este último poderá ser alcançado através do ajuste da taxa de coque ou da injeção auxiliar de combustível pelas ventaneiras.
- Controle de processo: a descida da carga (conforme medida pelas sondas de nível da carga ou tomadas de pressão Figura 30), a produtividade e a eficiência do alto forno são avaliadas com base em dados diários. Um exemplo de avaliação diária de processo é apresentado na Figura 48. As condições da zona de combustão (por exemplo, a temperatura da chama) são monitoradas ou calculadas. A visão geral total do processo fornece uma indicação da necessidade ou não de ajustes.

7 – O processo: descida da carga e controle do fluxo de gás

- Controle do fluxo de gás: a questão do controle do fluxo de gás é discutida em melhores detalhes abaixo.

As medições e os dados necessários para o controle diário do fluxo de gás são mostrados na Figura 51.

O fluxo de gás pelo forno poderá ser monitorado com a ajuda da composição global do gás do topo, composição do gás do topo pelo raio, perdas térmicas e fluxo do gás pela parede. Este último poderá ser medido com as sondas curtas na carga: as sondas medem a temperatura à aproximadamente três metros abaixo do nível da carga em até 50 cm na carga. Se as temperaturas estiverem baixas ($< 100^{\circ}\text{C}$) a carga ainda não estará seca e será necessário um fluxo de gás ainda maior na região da parede para aumentar a capacidade de secagem pela parede.

Se o forno parecer estar com necessidade de um ajuste do fluxo de gás, o uso da distribuição da carga poderá ser considerado. Todavia, uma análise compreensiva da situação real terá que ser feita.

Por exemplo, considere a situação onde são observadas altas temperaturas centrais. Se estas altas temperaturas centrais forem observadas juntamente com baixas perdas térmicas e uma baixa utilização do gás, aparentemente o fluxo de gás central estará muito alto e poderá ser considerado para diminuir o fluxo do gás central.

Se, por outro lado, as altas temperaturas centrais estiverem combinadas com uma boa utilização do gás e um bom fluxo de gás pela parede, então não haverá necessidade de mudar as camadas de minério e coque. Deverá ser considerada a operação com um volume de gás mais baixo por tonelada de metal quente, isto é, com um enriquecimento mais alto de oxigênio.

Perceba também que as perdas térmicas são muito sensíveis a decida da carga. Uma decida irregular da carga leva a aberturas (espaços vazios) na parede e a altas perdas térmicas. Assim, se um forno estiver apresentando altas perdas térmicas, mais uma vez, a causa deverá ser investigada em detalhes antes de se ajustar a distribuição da carga. Por exemplo, se um alto forno for levado aos seus limites máximos de produção e a descida da carga for sacrificada devido à alta diferença de pressão pela carga, a solução para as altas perdas térmicas será a redução do nível de produção (ou melhor: volume de gás) e não ajustar a distribuição da carga.

7 – O processo: descida da carga e controle do fluxo de gás

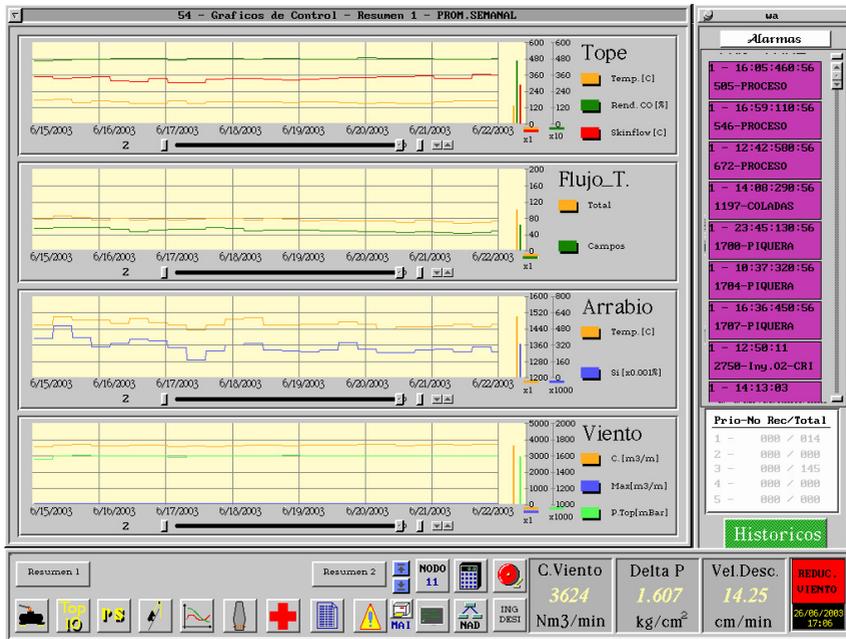


Figura 50: Apresentação de dados do processo num forno em operação. O gráfico semanal fornece uma visão geral da estabilidade e desenvolvimento do processo. De cima para baixo: **Tope** – Utilização de CO (%), temperatura do skin flow (fluxo superficial) (°C) e temperatura do topo (°C); **Flujo T.** – Perda térmica total e soma dos campos (GJ/hr); **Arrabio** – Temperatura do metal quente (°C) e silício (%); **Viento** – Volume do vento quente (Nm³/min) e pressão do topo (bar).

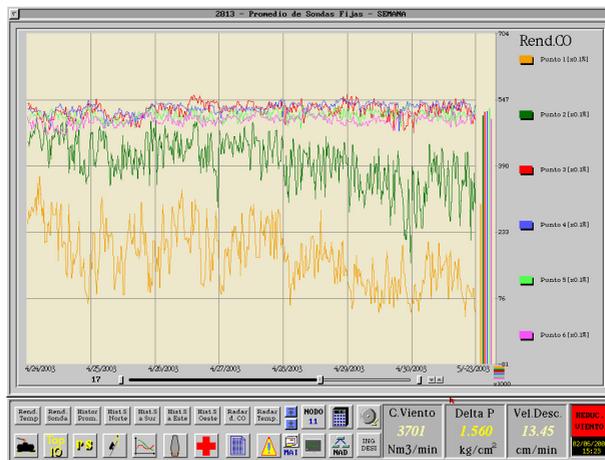


Figura 51: Exemplo de controle do fluxo do gás. A distribuição radial do gás é medida com sondas acima da carga. A utilização reduzida do gás no centro do forno (ponto 1 e 2, laranja e verde) mostra uma marcha central aumentada.

Capítulo 8

Produtividade e eficiência do alto forno

A produção de um alto forno está diretamente correlacionada com a quantidade de coque queimado na frente das ventaneiras numa situação estável, devido ao fato de que, no topo do forno, toda carga de coque traz uma quantidade de materiais da carga de minério. Numa situação estacionária, o metal quente é produzido assim que o coque é consumido. A produtividade do alto forno aumenta à medida que a quantidade de combustível usada por tonelada de metal quente diminui. No presente capítulo os princípios que regem a produtividade do alto forno, as reações químicas e a eficiência são discutidos.

8.1 A zona de combustão

8.1.1 A taxa de produção

Na zona de combustão é formado o gás quente que funde o material da carga e é usado para efetivar as reações químicas no forno. A partir de uma dada quantidade certa de coque e carvão, usada por tonelada de metal quente, a taxa de produção de um alto forno é determinada pela quantidade de oxigênio soprado através das ventaneiras. Quanto mais oxigênio for soprado para dentro do forno, maior será a quantidade de coque e carvão queimados em monóxido de carbono (CO) e mais alta será a taxa de produção. Além disto, quanto mais baixa for a quantidade de combustível necessária por tonelada de metal quente (tMQ), mais alta será a taxa de produção. Um exemplo quantitativo é indicado abaixo. O coque (e o carvão) não apenas entra em combustão na frente das ventaneiras, mas é também usado para a carbonização do ferro (o metal quente contém 4,5% C) e para as reações de redução direta (seção 8.2). A taxa de coque é expressa como coque padrão, ou seja, coque com um teor de C de 87,5%.

8 – Produtividade e eficiência do alto forno

Num alto forno sob operação, o uso dos combustíveis poderá ser conforme a seguir:

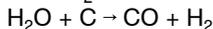
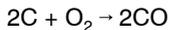
Taxa de coque	300 kg/tMQ		300 kg/tMQ
Injeção de carvão	200 kg/tMQ	taxa de reposição 0,85	170 kg/tMQ
Total			470 kg/tMQ

Necessário para carbonização	50 kg/tMQ
Necessário para redução direta	100 kg/tMQ
Combustão em frente as ventaneiras	320 kg/tMQ

A quantidade de 320 kg/tMQ do coque padrão que queima em frente as ventaneiras se consiste de 170 kg/tMQ equivalente de carvão e, por conseguinte, uma quantidade de 150 kg (320–170) de coque por tonelada de metal quente é queimada. Observe a questão da eficiência: se a mesma quantidade of oxigênio for soprada dentro do forno, desta forma mantendo o mesmo volume de sopro e condições do vento quente, enquanto que a taxa de combustível for 10 kg/tMQ melhor, a taxa de produção irá aumentar. Sob uma taxa de combustível 10 kg/tMQ mais baixa, a produção irá aumentar em $10/320 = 3\%$! E vice-versa, ou seja, se uma quantidade extra de carvão for colocada no forno, por exemplo, porque está frio, a taxa de produção irá cair se as condições do vento quente forem mantidas.

8.1.2 Composição do gás da rampa

O calor do vento quente e o calor gerado pela queima do coque (e carvão/ combustíveis auxiliares) na zona de combustão são usados para fundir a carga. O calor disponível para fundir a carga depende da quantidade de gás produzida e da temperatura da chama, a “temperatura adiabática de chama da zona de combustão” (RAFT). A quantidade e composição do gás da zona de combustão podem ser calculadas considerando as seguintes reações na zona de combustão:



Na zona de combustão e diretamente após ela, todo o oxigênio é convertido em monóxido de carbono e toda a água é convertida em hidrogênio e monóxido de carbono.

Considere o exemplo a seguir. O alto forno na seção 2.3 tem um volume de sopro de 6500 m³ STP vento quente com 25,6% de oxigênio. Ignorando os efeitos da umidade no vento quente e na injeção de carvão, como ficaria o volume e composição do gás na zona de combustão?

Vento quente por minuto no forno:

$$\text{Nitrogênio } (1-0,256) * 6.500 = 4.836 \text{ m}^3 \text{ STP/min}$$

$$\text{Oxigênio } 0,256 * 6.500 = 1.664 \text{ m}^3 \text{ STP/min}$$

O oxigênio gera 2 moléculas de CO por O₂. Assim, o volume de gás é:

$$\text{Volume de gás: } 4836 + 2 * 1.664 = 8.164 \text{ m}^3 \text{ STP/min}$$

Composição do gás: nitrogênio $4.836/8.164 = 59\%$. CO $2 * 1.664/8.164 = 41\%$.

O cálculo pode ser estendido, incluindo a umidade no vento quente e a injeção de carvão (ou outros combustíveis). Isto está feito na seção 5.4.

8.1.3 Temperatura da chama na zona de combustão

A temperatura da chama na zona de combustão é a temperatura que o gás da zona de combustão alcança assim que todo o oxigênio e água tiver sido convertido em CO e H₂. A temperatura da chama é um conceito teórico, uma vez que nem todas as reações são concluídas na zona de combustão. De um ponto de vista teórico, ela deverá ser calculada a partir de um cálculo do balanço térmico pela zona de combustão. Com propósitos práticos, as fórmulas lineares foram derivadas. As temperaturas de chama normalmente estão na faixa de 2.000 a 2.300°C. A temperatura da chama é influenciada pelas condições da zona de combustão. Qualitativamente: a temperatura da chama aumentará se:

- a temperatura do vento quente aumentar,
- o percentual de oxigênio no vento quente aumentar,

A temperatura da chama diminuirá se:

- a umidade aumentar no vento quente,
- a taxa de injeção de combustível aumentar, tendo em vista que os combustíveis frios serão queimados ao invés do coque quente. O efeito preciso dependerá também da composição do combustível auxiliar.

A Tabela 21 fornece algumas regras gerais com relação aos efeitos da temperatura de chama.

Tabela 21: Efeitos da temperatura da chama. Regras gerais

	Unidade	Mudança	Temperatura da chama (°C)	Temperatura do topo (°C)
Temperatura do vento quente	°C	+ 100	+ 65	-15
Carvão	kg/t	+ 10	- 30	+ 9
Oxigênio	%	+ 1	+ 45	- 15
Umidade	g/m ³ STP	+ 10	- 50	+ 9

8.2 Óxidos de carbono e de ferro

Na seção anterior foi descrita a formação de gás na zona de combustão. O que acontece com o gás quando ele sobe pelo forno e se resfria?

Primeiramente, considere o que acontece com o monóxido de carbono.

O carbono pode dar 2 tipos de óxidos:

- $C + 1/2 O_2 \rightarrow CO + \text{calor (111 kJ/mol)}$.

Isto ocorre na zona de combustão,

- $C + O_2 \rightarrow CO_2 + \text{calor (391 kJ/mol)}$.

Isto não ocorre na zona de combustão, e sim, por exemplo, numa planta de geração de energia elétrica.

Note que no segundo passo é gerado muito mais calor do que no primeiro passo. Desta forma, vale a pena converter a maior quantidade possível de CO em CO₂ no processo. A razão CO₂/(CO+CO₂) é chamada de utilização do gás, ou eficiência do gás, e é usada extensivamente na operação do alto forno.

8 – Produtividade e eficiência do alto forno

Na Figura 52, o equilíbrio $\text{CO} \rightleftharpoons \text{C} + \text{CO}_2$ é apresentado para várias temperaturas. A linha traçada indica o equilíbrio das chamadas reações “Boudouard”. Sob temperaturas acima 1100°C todo o CO_2 é convertido em CO. Desta forma, sob as altas temperaturas presentes na rampa e zona de fusão do alto forno, somente o monóxido de carbono está presente.

Sob temperaturas abaixo de 500°C todo CO tem tendência de se decompor em $\text{C} + \text{CO}_2$. O carbono formado desta forma é muito fino e é chamado de carbono “Boudouard”.

Na prática operacional, a decomposição do monóxido de carbono poderá ser observada no material refratário, onde existe uma atmosfera contendo CO na região de temperatura correta.

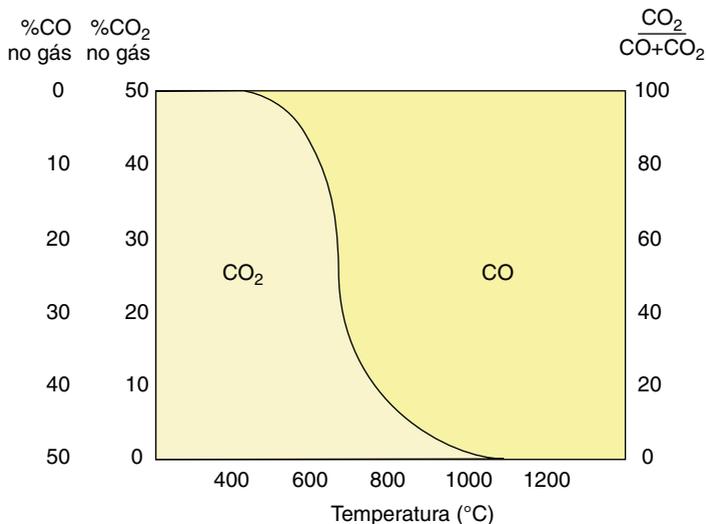


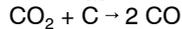
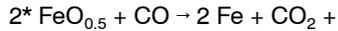
Figura 52: Reação de Boudouard: a linha traçada indica o equilíbrio

8.2.1 Redução direta

À medida que os gases quentes redutores produzidos na zona de combustão sobem pela parte mais baixa do forno eles transferem calor para a carga de minério, fundindo-a no lado mais baixo da zona de fusão. Estes gases também removem oxigênio dos óxidos de ferro, isto é, eles reduzem os óxidos de ferro, os quais contêm aproximadamente um oxigênio para cada dois átomos de ferro. O CO_2 produzido a partir da reação é regenerado diretamente para CO com o carbono do coque. A reação total é conhecida como redução direta, uma vez que no balanço o oxigênio é removido diretamente dos óxidos de ferro com o carbono do coque.

8 – Produtividade e eficiência do alto forno

As reações poderão ser indicadas conforme abaixo:



A reação de redução direta requer uma quantidade enorme de calor, a qual é também fornecida pelo calor específico contido no gás quente da zona de combustão.

A reação de redução direta é muito importante para o entendimento do processo. Num alto forno moderno, a redução direta remove aproximadamente um terço do oxigênio da carga, isto é, o outro mecanismo da redução – redução por gás – toma dois terços. A quantidade de oxigênio a ser removida sob as altas temperaturas, ou seja, assim que a carga começar a se fundir, depende em muito da eficiência do processo de redução na cuba (8.2.2).

Perceba duas observações importantes:

- A reação direta usa carbono (coque) e gera gás CO extra,
- A reação direta custa muita energia.

Na prática operacional, a redução direta poderá ser monitorada. Em muitos altos fornos, a taxa de redução direta (= ao percentual de oxigênio removido da carga pela redução direta) ou a perda de solução (= a quantidade de coque usada para a reação) são calculadas em tempo real. Os operadores experientes estão bem cientes de que assim que a taxa de redução direta ou a perda de solução aumenta, a descida do alto forno começa a ficar mais rápida (devido ao coque extra usado) e se resfriará. Quando apropriadamente observado, o resfriamento poderá ser evitado, por exemplo, pelo uso de uma injeção extra de combustível.

Vale a pena quantificar os efeitos da reação de redução direta. Considere uma razão de O/Fe de 0,5 antes da redução direta. Qual é a quantidade de coque necessária para a redução direta (ou perda de solução)?

Para 1 mol de $\text{FeO}_{0,5}$ é necessário 0,5 mol de carbono, o que corresponde a 6 kg de carbono (o peso atômico do ferro é 55,6, do oxigênio 16 e do carbono 12). Uma tonelada de metal quente contém 945 kg de Fe, o que corresponde a $945/55,6 = 17$ quilomols. Por tonelada de metal quente são necessários $17*12*0,5 = 102$ kg de carbono. A perda de solução é, se o % de C no coque for 87,5 %, $102/0,875 = 116$ kg de coque. Além da perda de solução, o carbono é também dissolvido no metal quente (chamado carbonização do ferro). O metal quente contém 4,5% de C, ou seja, 45 kg/tMQ, o que corresponde a um consumo de coque de $45/0,875 = 51$ kg/tMQ.

8.2.2 Redução pelo gás

Assim que a temperatura do gás se torna menor, o CO_2 se torna estável e as reações de redução poderão ocorrer de acordo com:

Hematita: $6 \text{Fe}_2\text{O}_3 + 2 \text{CO} \rightarrow 4 \text{Fe}_3\text{O}_4 + 2 \text{CO}_2$ gera calor 8 kJ/mol Fe

Magnetita: $4 \text{Fe}_3\text{O}_4 + 4 \text{CO} \rightarrow 12 \text{FeO} + 4 \text{CO}_2$ absorve calor 5 kJ/mol Fe

Wustita: $6 \text{FeO} + 3 \text{CO} \rightarrow 6 \text{FeO}_{0,5} + 3 \text{CO}_2$ absorve calor 6,5 kJ/mol Fe

A redução é chamada de "redução por gás" porque o oxigênio é removido dos materiais da carga com gás CO. O H₂ reage de uma forma similar.

A redução de $\text{FeO}_{0,5}$ ocorre através da redução direta, conforme mencionado na seção anterior.

Em seguida à descida da carga da stock line (linha de nível da carga), a redução de hematita para magnetita começa aproximadamente a 500°C. A redução de magnetita para wustita ocorre numa zona com temperatura de 600 a 900°C, enquanto que a redução de wustita para ferro ocorre numa região com temperatura entre 900 e 1.100°C. No começo da fusão (1.100 a 1.150°C) normalmente $\text{FeO}_{0,5}$ é alcançado. Aqui o FeO é usado como um símbolo para a wustita. A composição mais estável é, contudo, $\text{FeO}_{0,95}$.

As reações estão mostradas na Figura 53.

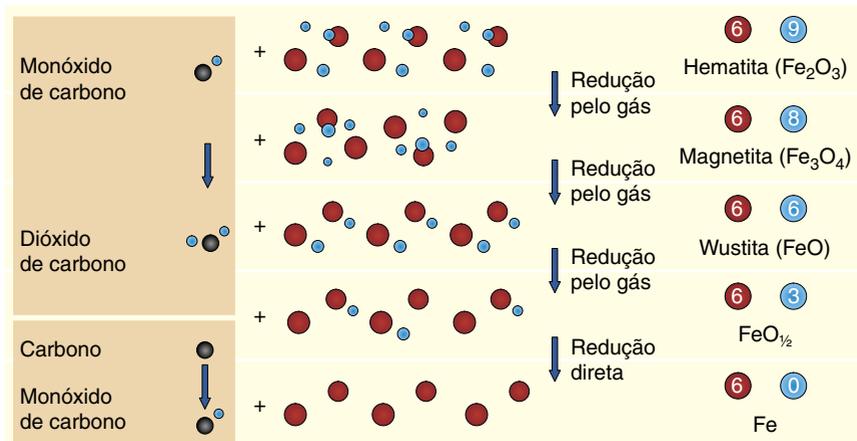


Figura 53: Visão geral da redução de óxidos de ferro

8 – Produtividade e eficiência do alto forno

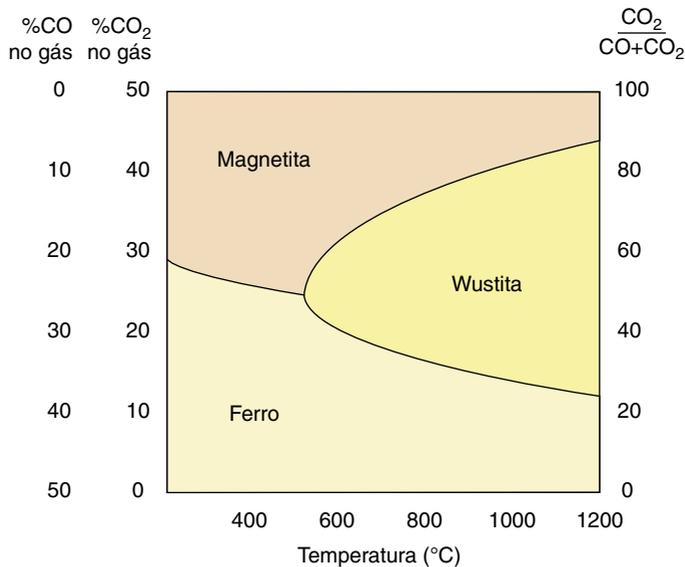


Figura 54: Apresentação esquemática da relação entre temperaturas, composição do gás CO/CO₂ e óxidos de ferro. As linhas traçadas indicam o equilíbrio.

O equilíbrio entre os vários óxidos de ferro e o gás é mostrado na Figura 54. A Figura mostra em quais níveis de temperaturas e composições de gás uma redução adicional do gás da carga não poderá ocorrer.

A redução de wustita para ferro requer a mais alta concentração de CO. Observe, na Figura 54, que a redução de wustita requer um gás com um percentual relativamente alto de CO. A utilização do gás deverá ficar abaixo de 30%. Se o CO₂ ficar mais alto, a wustita não será mais convertida em ferro. A partir das medições na Figura 7.7 fica claro que a redução de wustita para ferro chega próximo do equilíbrio.

O progresso da redução num alto forno pode ser detectado de duas maneiras diferentes:

- Carga: uma visão geral do progresso da redução poderá ser derivada de fornos resfriados. Um exemplo é mostrado na Figura 55.
- Gás: enviando dispositivos de amostragem de gás para dentro do forno, o progresso da temperatura/composição do gás poderão ser derivados. A Figura 56 mostra um exemplo típico de uma amostragem de gás. Os dados poderão ser representados num gráfico de equilíbrio entre o gás e os óxidos de ferro (Figura 56). O gás normalmente mostra uma “zona de reserva térmica”: isto é, uma zona na qual a temperatura não muda rapidamente, e uma “zona de reserva química”: uma zona na qual a composição química não muda. A zona de reserva térmica diminuirá e poderá desaparecer quando o forno for levado a operar com altas produtividades.

8 – Produtividade e eficiência do alto forno

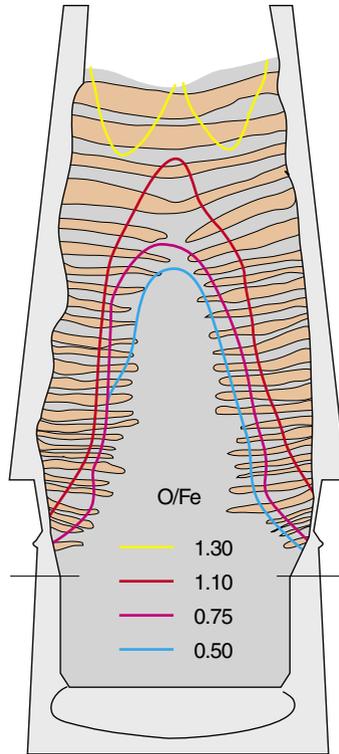


Figura 55: Progresso da redução num forno resfriado (Hirohata, base: Omori, 1987, p. 8)

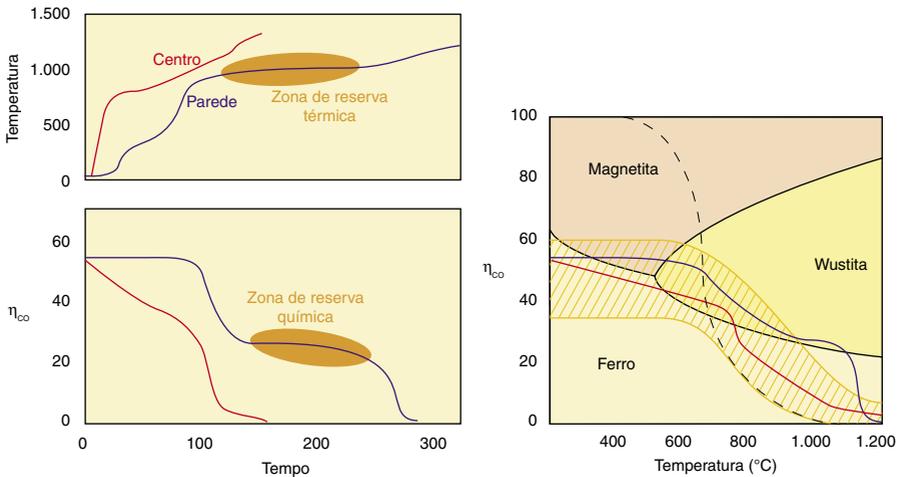


Figura 56: Composição do gás num forno em operação. CO , CO_2 , H_2 e temperatura foram medidos com sondas em descida (Chaigneau e colaboradores, 2001). As medições típicas de vários fornos estão hachuradas. Base: McMaster, 2002.

8.2.3 Redução pelo gás e redução direta

A reação de redução direta e redução pelo gás se convergem num processo muito eficiente. Suponha que todo o oxigênio seja removido por redução direta. Então a reação mostrada a seguir irá ocorrer:

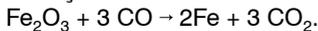


Quanto coque seria necessário para a reação?

O ferro contém aproximadamente 945 kg de Fe por tonelada de metal quente. O coque contém aproximadamente 87,5% de carbono. Os pesos atômicos do Fe e do C são 55,6 e 12 respectivamente. Uma (1) tonelada de ferro contém $945/55,6 = 17$ quilomol. Para cada átomo de ferro nós precisamos de 1,5 átomo de carbono. Assim, o carbono necessário é $1,5 \cdot 17 = 25,5$ quilomol, que é $25,5 \cdot 12 = 306$ kg de carbono. Além disso, um total de aproximadamente 4,5% de carbono é dissolvido no ferro. No total, 351 kg de carbono é usado por tonelada de metal quente, o que corresponde a 401 kg de coque. Esta é uma taxa de coque muito baixa e um alto forno não irá funcionar, devido ao fato do calor gerado nesta reação ser muito baixo.

Agora considere que todas as reações de redução sejam feitas por meios da redução pelo gás. Qual é a taxa de coque necessária nesta situação? Assume-se que a combustão do coque gere o CO necessário.

A reação é:



Do exposto acima nós sabemos, contudo, que para a redução pelo gás a utilização máxima do gás é de 30%. Para se obter 30% de utilização de gás, será necessário mais CO e a reação se torna:



Desta forma, a exigência de coque é calculada conforme acima: cada tonelada de ferro contém 17 moles. Existe uma necessidade de 10 átomos de carbono por 2 átomos de Fe. Assim, a exigência de carbono é de $10/2 \cdot 17 = 85$ moles, o que corresponde a $85 \cdot 12 = 1.020$ kg de carbono. Novamente, os 4,5% extra de carbono no ferro têm que ser adicionados, dando uma taxa de carbono de 1.065 kg/t e uma taxa de coque de $1065/0,875 = 1.217$ kg de coque por tonelada de metal quente. Esta reação possui um alto excesso de calor.

A conclusão das considerações acima é que o caráter de contra-corrente do alto forno funciona eficientemente para reduzir a taxa de combustível, combinando as reações de redução direta e pelo gás. Um percentual de 60 a 65% do oxigênio é removido pelo gás e o oxigênio restante é removido pela redução direta.

Note que estas considerações não levam em conta as variações da proporção minério/ coque pelo raio. Desta forma, a aplicabilidade da abordagem do balanço de massa e calor para o controle operacional diário é bem limitada.

8.2.4 Hidrogênio

O hidrogênio pode reagir como um agente de redução formando água. A reação é comparável com o monóxido de carbono:



As principais diferenças em relação ao monóxido de carbono são as seguintes:

- A Figura 57 mostra o equilíbrio dos óxidos de ferro e hidrogênio. O hidrogênio é mais eficaz para a redução sob temperaturas abaixo de 800°C.
- O átomo de hidrogênio é muito pequeno e se difunde facilmente para o centro do minério. Daí, a redução pelo hidrogênio pode ser importante para os minérios de baixa porosidade, tais como o minério calibrado.
- A utilização de hidrogênio no gás do topo normalmente fica em torno de 40%, enquanto que a utilização de CO fica próxima de 50%.

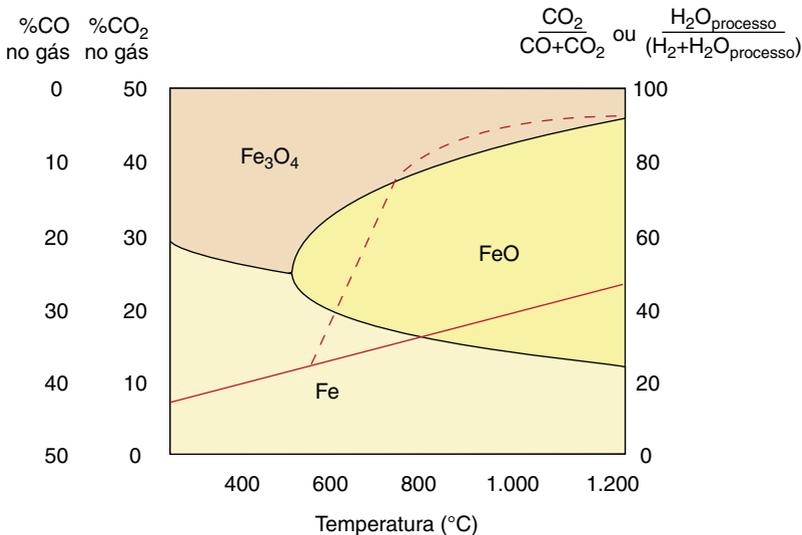


Figura 57: Equilíbrio dos óxidos de ferro com hidrogênio

Perceba que a utilização do hidrogênio não pode ser medida. O H₂O formado no processo não poderá ser discriminado da água colocada no forno com a umidade do coque e da carga.

A utilização de hidrogênio do gás do topo é definida como $\text{H}_2 / (\text{H}_2 + \text{H}_2\text{O}_{\text{processo}})$. Ao operar com um alto hidrogênio no gás do topo, a competição entre as reações de redução irão levar a uma utilização mais baixa do CO₂ do gás do topo. Uma situação simples quantificada para a mesma utilização total do gás do topo está mostrada na Tabela 21. Deve-se manter isto em mente ao comparar a utilização de CO sob níveis baixos e altos de injeção de carvão e gás.

8.3 Perfil da temperatura

O perfil da temperatura e as reações químicas num alto forno estão intimamente relacionados. Isto encontra-se resumido na Figura 58. A redução dos óxidos em wustita ocorre a temperaturas de 800 a 900°C. A partir daí, numa faixa de temperatura de 900 a 1.100°C, a wustita poderá ser ainda mais reduzida, indiretamente, sem interferência da reação de Boudouard. Esta zona de preparação química poderá tomar até 50–60% da altura do forno, possuindo uma temperatura relativamente constante. Desta forma, ela é chamada de zona de reserva térmica.

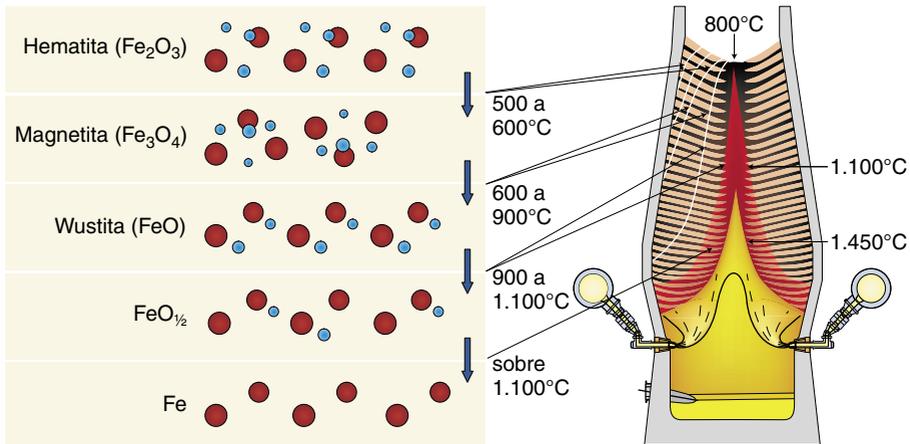


Figura 58: Progresso das reações de redução e temperatura da carga

8.4 Simetria circunferencial e redução direta

Uma operação com alto desempenho do alto forno requer que toda a circunferência do forno contribua igualmente para o processo. O forno poderá ser dividido em setores, sendo que cada ventaneira forme um setor. Veja o exemplo na Figura 29. Se todos os setores não contribuírem igualmente para o processo, irá surgir assimetria na zona de fusão, conforme mostrado na Figura 59. Uma escassez de calor local irá deslocar a zona de fusão para baixo em certos setores e, para cima, em outros setores. Isto poderá resultar num aumento da redução direta em alguns setores. O aumento do nível térmico do forno como um todo, afetando sua eficiência geral, só poderá fazer compensação.

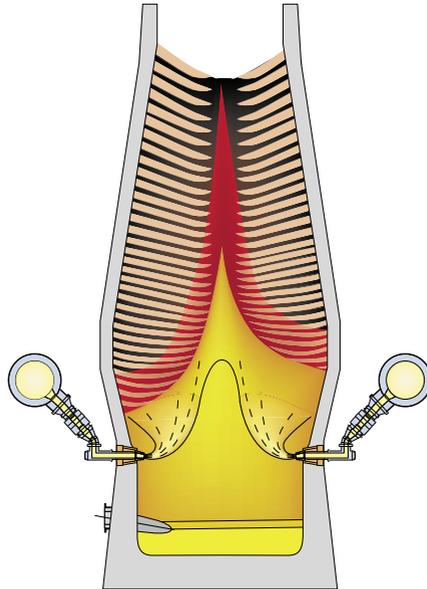


Figura 59: Zona de fusão assimétrica

A assimetria no processo poderá surgir de várias fontes.

- Da injeção de carvão. Especialmente ventaneiras sem ICP (seção 5.2).
- Da distribuição do jato de vento quente: se a velocidade do vento quente for muito baixa (< 100 m/s), as ventaneiras não irão funcionar eficientemente como distribuidoras de jato de vento quente. Isto poderá ser observado especialmente nas ventaneiras opostas à entrada entre a tubulação principal de vento quente e o anel de vento. A distribuição do jato de vento quente poderá também ser afetada por ventaneiras obstruídas (acima do furo de corrida ou pontos quentes no refratário) e os depósitos de escória na ventaneira. A partir do desgaste do refratário ou, especialmente se as placas de desgaste no topo estiverem desgastadas ou tiverem desaparecido.
- Pela assimetria do carregamento. Com um topo sem cone ela poderá ser evitada alternando entre os silos de coque e minério do topo e mudando a direção rotacional da colher. Com um sistema de duplo cone é possível alternar a última caçamba (skip) num descarregamento. Perceba que as mudanças têm que ser feitas numa escala de tempo menor que o processo do alto forno, ou seja, mais freqüentemente do que a cada 6 horas.
- Do desgaste do refratário ou placas da coroa de choque no topo do forno.
- Do desvio da linha de centro do forno da linha vertical. Em particular, em fornos mais antigos.

Existem medidas disponíveis para corrigir desvios de simetria circunferencial, por exemplo, removendo a injeção ICP de ventaneiras específicas. Contudo, é preferível eliminar as causas da assimetria circunferencial, ao invés de corrigi-la.

8 – Produtividade e eficiência do alto forno

A assimetria no fluxo de gás poderá ter origem na distribuição da perda térmica radial. Na figura abaixo, as perdas térmicas são medidas em 8 segmentos do forno por 4 seções verticais. Uma assimetria estendida poderá ser investigada com a ajuda destes tipos de dados e gráficos.

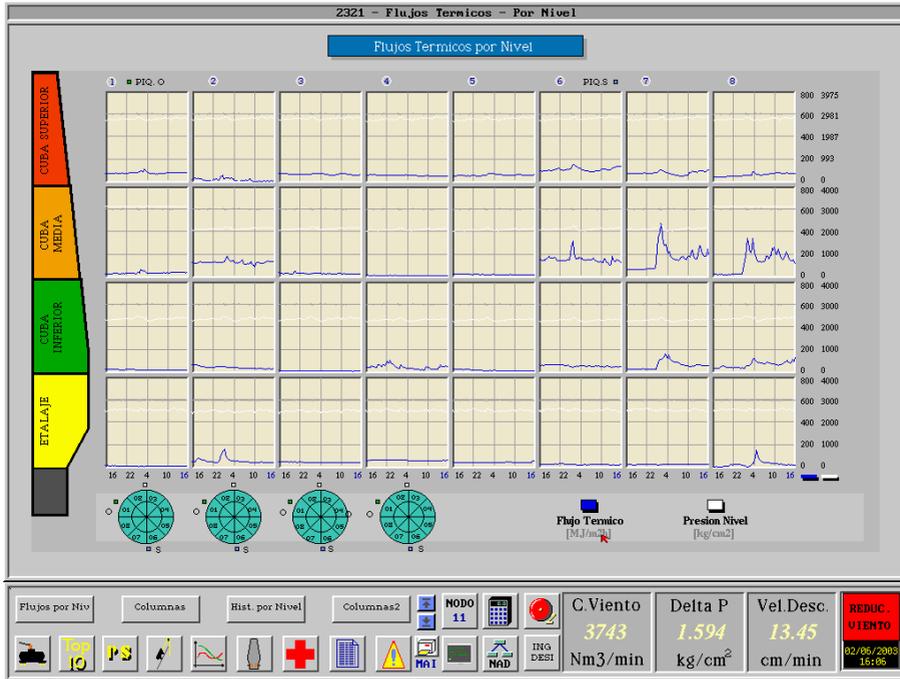


Figura 60: Distribuição da perda térmica em 24 horas (azul). Note uma leve assimetria de processo.



Capítulo 9

Metal quente e escória

As composições típicas do metal quente e da escória estão apresentadas na Tabela 22. O metal quente deixa o forno com uma temperatura típica na faixa de 1.480 a 1.520°C.

Tabela 22: Composição típica do metal quente e da escória

Metal quente		Típico	Escória	Típico	Faixa
Ferro	Fe	94,5%	CaO	40%	34–42%
Carbono	C	4,5%	MgO	10%	6–12%
Silício	Si	0,40%	SiO ₂	36%	28–38%
			Al ₂ O ₃	10%	8–20%
Manganês	Mn	0,30%			
Enxofre	S	0,03%	Soma	96%	
Fósforo	P	0,07%	Enxofre	1%	

9.1 Metal quente e a aciaria

O metal quente é usado para a produção de aço. Na aciaria o metal quente é refinado. A composição (química) é ajustada aos requerimentos metalúrgicos. O processo de refinamento normalmente é alcançado em dois passos:

- Remoção do enxofre do metal quente por meios da dessulfuração. Na maioria dos casos, o enxofre é removido com carbeto e calcário, ou magnésio, de acordo com:
 - $2 \text{CaO} + 2 [\text{S}] + \text{CaC}_2 \rightarrow 2 (\text{CaS}) + \text{CO}$ (gás) ou
 - $\text{Mg} + [\text{S}] \rightarrow (\text{MgS})$
- Os colchetes, ou seja, [S], mostram que o material é dissolvido no metal quente. Os parênteses, ou seja, (CaS), mostram que o material é dissolvido na escória.
- A remoção do carbono, silício, manganês e fósforo. Estes elementos reagem com

9 – Metal quente e escória

o oxigênio soprado no convertedor. A “afinidade” com o oxigênio decresce na seqüência Si>Mn>C>P>Fe. Nesta seqüência, o material é refinado no processo do convertedor. Ao final do processo de refinamento, o ferro poderá ser re-oxidado, o que às vezes é necessário para aquecer o aço antes do lingotamento. Os elementos Si, Mn, P e FeO são removidos com a fase da escória, o C na fase do gás.

As considerações importantes para uma aciaria são:

- Qualidade consistente: o controle do processo do convertedor incorpora “aprendizado”, o que ajusta as configurações de processo com base no resultado esperado versus o resultado encontrado. Quanto mais consistente for a qualidade do ferro, melhores serão os resultados na aciaria.
- O silício, o manganês, o titânio e a temperatura do metal quente são importantes fontes de energia para o processo do convertedor e efetivam a formação da escória.
- O fósforo do metal quente: possui uma grande influência na qualidade do metal quente. No alto forno, 97–98% do fósforo deixa o forno com o metal quente.
- O enxofre do metal quente: o enxofre é difícil de se remover no processo do convertedor. Para tipos de aços superiores, é usado um nível máximo de enxofre de 0,008% (e inferior), enquanto que o alto forno produz metal quente com um teor de enxofre de 0,030% e mais alto. Desta forma, um passo externo de dessulfuração é freqüentemente necessário.

9.2 Composição do metal quente

A composição final do metal quente é o resultado de um processo complexo de interações ferro–escória. Os vários elementos são divididos pela escória e ferro. A dispersão de um elemento pelas duas fases depende da composição da escória e do metal quente, bem como da temperatura, conforme discutido abaixo. Como ilustração, os percentuais típicos dos elementos que entram nas fases da escória e do ferro estão indicados na Tabela 23. Os pontos apresentados a seguir deverão ser observados:

- O Silício, titânio e enxofre ficam concentrados na escória,
- O manganês fica concentrado no metal quente,
- Parte do potássio é eliminada pelo topo,
- Quase todo o fósforo vai para o metal quente.

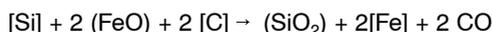
Tabela 23: Distribuições típicas dos elementos pelo ferro e escória

Elemento	Entrada	Saída Ferro		Saída Escória	
	kg/tMQ	kg/tMQ	%	kg/tMQ	%
Silício	46	5	11%	41	89%
Manganês	6	4,5	75%	1,5	25%
Titânio	3	0,7	23%	2,3	77%
Enxofre	3	0,3	10%	2,7	90%
Fósforo	0,5	0,48	96%	0	0%
Potássio	0,15	0	0%	0,11	73%

9.3 Redução do silício

Os óxidos de silício, manganês e fósforo são reduzidos através da reação de redução direta. As reações do silício são de interesse em particular. O silício no metal quente é um indicador sensível do estado térmico do forno, e a variação do silício poderá ser usada para analisar a consistência do processo. Desta forma, as reações do silício são discutidas em melhores detalhes. A redução do silício ocorre através de três passos:

- A formação de SiO gasoso na zona de combustão. O primeiro passo de redução ocorre nas temperaturas de chama muito altas da zona de combustão. O silício vem da cinza do coque (e do carvão). Quanto mais alta for a cinza do coque, mais alto será o silício inicial no metal quente.
- Redução adicional por meios da redução direta com o ferro. O gás do SiO em contato com o ferro pode ser reduzido conforme a seguir:
- $\text{SiO} + [\text{C}] \rightarrow [\text{Si}] + \text{CO}$ os colchetes indicam a solução no ferro.
- Quanto mais intenso for o contato entre o ferro e o gás, mais alto será o silício no metal quente. Quanto maior for o comprimento do gotejamento do ferro, mais intenso será o contato entre os gases quentes e metal líquido, o que leva a temperaturas mais altas do metal quente. O contato mais prolongado permite que mais gás SiO reaja com o carbono no metal quente, o que leva a teores mais altos de silício no metal quente. Desta forma, uma zona de fusão numa posição mais alta está relacionada com uma temperatura alta do metal quente e um silício alto no metal quente.
- O equilíbrio na troca entre escória e ferro. O silício do metal quente está em equilíbrio com a escória. Os aspectos importantes são:
- Quando as gotas de ferro descem e passam pela camada de escória, o silício poderá ser re-oxidado se houver FeO presente na escória, de acordo com:



- Quanto mais básica for a escória (quanto mais baixo for o SiO₂ na escória), mais baixo será o silício no metal quente.
- O metal quente formado no centro possui um alto silício, enquanto que o metal quente formado na parede possui um baixo silício. O resultado no metal vazado é um valor médio.

Ambos o silício e o manganês no metal quente são indicadores do estado térmico do forno. O manganês mostra uma resposta mais rápida quando há mudanças no processo, pelo fato do equilíbrio com a escória restante no forno ser mais rápido para o manganês, devido à fração menor de manganês na escória.

9 – Metal quente e escória

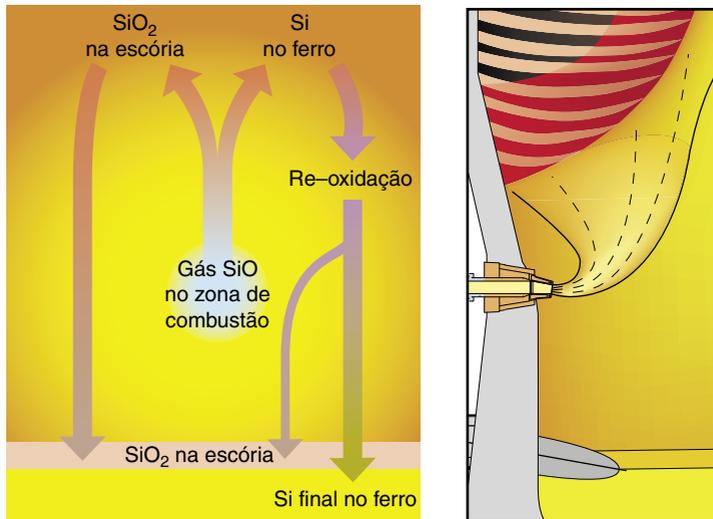


Figura 61: Reações do silício no alto forno

9.4 Enxofre no metal quente

O enxofre no metal quente é regido pela entrada de enxofre, pela composição da escória e pelo estado térmico do forno. Os parâmetros mais importantes são:

- Entrada de enxofre: a entrada de enxofre fica tipicamente entre 2,5 e 3,5 kg/tMQ. As principais fontes sendo o coque e o combustível auxiliar, tais como o carvão ou óleo.
- A divisão do enxofre pelo ferro e escória. Ela é indicada pela razão $(S)/[S]$. Esta razão é muito sensível a basicidade da escória e ao nível térmico do forno (temperatura do metal quente ou silício do metal quente).
- O volume da escória: quanto mais baixo for o volume da escória por tonelada de metal quente, mais alto será o enxofre do metal quente na mesma razão $(S)/[S]$.

A maioria das empresas possui suas próprias correlações entre $(S)/[S]$ e a basicidade da escória e o nível térmico. As correlações são derivadas com base nos dados históricos para um alto forno. Como regra geral: para um percentual 5% mais baixo de enxofre no metal quente numa operação, é necessário:

- percentual 5% mais baixo na entrada ou
- aumento de 0,02 na basicidade (basicidade definida como $\text{CaO}+\text{MgO}/\text{SiO}_2$) ou
- silício 0,06 mais alto no metal quente.

9.5 Escória

9.5.1 Composição da escória e basicidade

A escória é formada a partir do material da ganga da carga e da cinza do coque e combustíveis auxiliares. Durante o processo primário, a escória evolui para a escória final. As faixas de composição são apresentadas na Tabela 25. Quatro componentes principais compõem aproximadamente 96% da escória (SiO_2 , MgO , CaO e Al_2O_3). O balanço vem com componentes tais como o manganês (MnO), enxofre (S), titânio (TiO_2), potássio (K_2O) e fósforo (P).

Estes componentes têm uma tendência a abaixar a temperatura líquida da escória. As definições da basicidade são apresentadas na Tabela 24.

Tabela 24: Definições de basicidade (% de peso)

B2	CaO/SiO_2
B3	$\text{CaO}+\text{MgO}/\text{SiO}_2$
B4	$(\text{CaO}+\text{MgO})/(\text{SiO}_2+\text{Al}_2\text{O}_3)$

Table 25: Composições típicas da escória

	Típica	Faixa
CaO	40%	34–42%
MgO	10%	6–12%
SiO_2	36%	28–38%
Al_2O_3	10%	8–20%
Total	96%	96%

9.5.2 Propriedades da escória

A escória possui temperaturas de fusão muito mais altas do que as do ferro. Na prática, é mais correto pensar em termos de temperaturas líquidas do que em pontos de fusão, tendo em vista que as escórias compostas possuem uma trajetória de fusão, ao invés de um ponto de fusão. A temperatura líquida é a temperatura na qual a escória está completamente fundida. Em temperaturas abaixo da temperatura líquida, cristais sólidos estão presentes. Estes cristais sólidos aumentam a viscosidade da escória. Dentro da nossa experiência, o comportamento das escórias pode ser bem compreendido com base em suas temperaturas líquidas.

As temperaturas líquidas são apresentada em diagramas tipo triângulo, conforme mostrado na Figura 62. Estes diagramas foram desenvolvidos para componentes puros, sendo que, na prática operacional, as temperaturas líquidas ficam um pouco mais baixas. Uma vez que nos diagramas tipo triângulo apenas 3 componentes podem ser indicados, um dos principais componentes da escória é considerado

9 – Metal quente e escória

como fixo, ou seja, $\text{Al}_2\text{O}_3 = 10\%$. Os diagramas com % diferentes de Al_2O_3 estão apresentados na Figura 63. A composição típica de escória para a escória de alto forno está também indicada (tabela 19). Note que a temperatura líquida está acima de 1.400°C e que a temperatura líquida aumenta quando CaO aumenta (isto é, quando a basicidade aumenta).

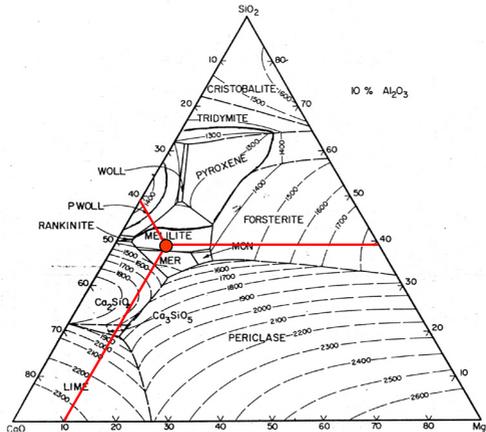


Figure 62: Diagrama de fase das temperaturas líquidas para o sistema de escória do alto forno, considerando 10% de Al_2O_3 . A composição da escória $\text{CaO}=40\%$, $\text{MgO}=10\%$ e $\text{SiO}_2= 36\%$ está também indicada. Para este fim, os componentes têm que ser recalculados de 96% a 100% da escória. (Base: slag atlas, 1981.)

Na Figura 64 a composição da escória da sínter e pelotas contendo fundentes é indicada. As temperaturas líquidas dos componentes “puros” dão temperaturas líquidas altas, bem acima de 1.500°C . Como é possível o material se fundir na zona coesiva?

O segredo por trás da fusão da sínter e das pelotas é que a carga de minério contém muito FeO , o que abaixa a temperatura de fusão ou, conforme mencionado anteriormente, abaixa a temperatura líquida e temperatura sólida. A escória primária, ou seja, a escória formada durante o processo de fusão e antes da solução dos componentes das cinzas do coque na escória, é liquefeita através do FeO dissolvido. A escória final é liquefeita através da solução de SiO_2 conforme indicado na Figura 65.

9 – Metal quente e escória

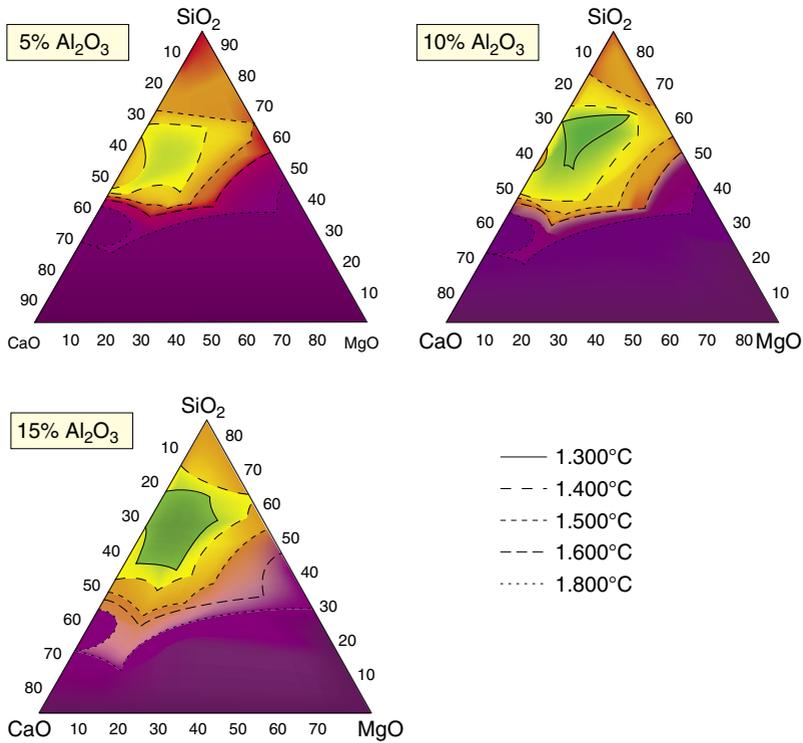


Figure 63: Apresentação das temperaturas líquidas da escória sob vários níveis de Al₂O₃ (Base: slag atlas, 1981.)

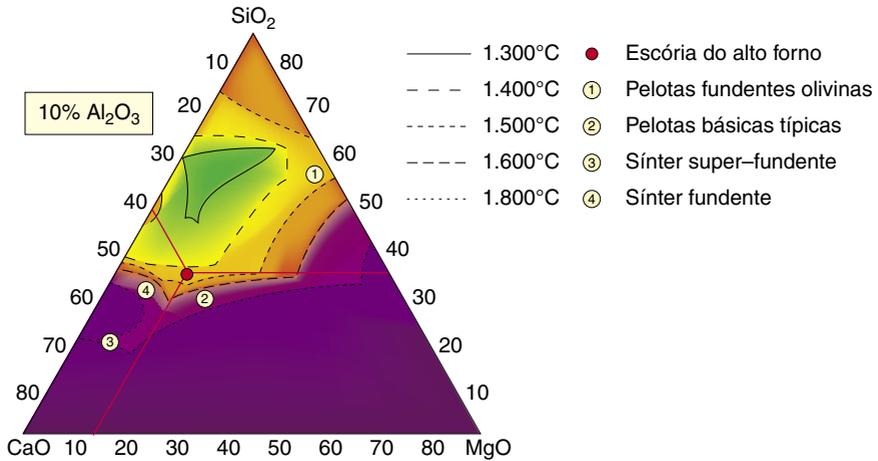


Figura 64: A composição da escória para as qualidades típicas das pelotas e sínter

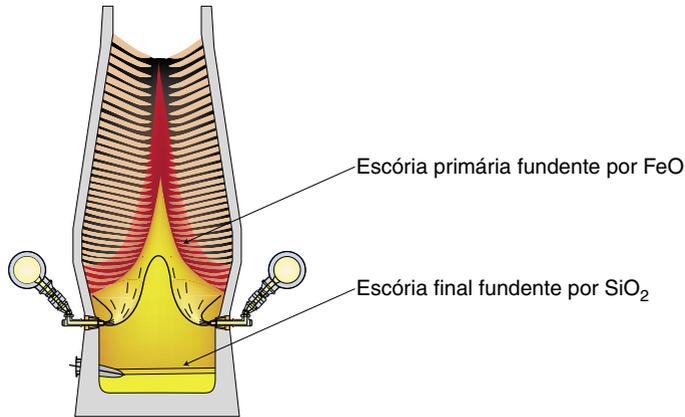


Figura 65: Formação da escória

9.6 Interações do metal quente e escória: propriedades da escória em situações especiais

Durante situações especiais no alto forno, como um acendimento inicial (blow-in) ou um forno muito quente, o silício no metal quente poderá se elevar para valores muito altos. Uma vez que o silício no metal quente é retirado do SiO_2 na escória, a consequência é que a basicidade da escória aumenta. Isto leva a uma alta temperatura líquida da escória. O efeito poderá ser bem grande. Numa situação com uma basicidade muito alta, a escória final já não é mais líquida no forno e não poderá ser vazada. Ela fica no forno, onde poderá formar um anel de escória, especialmente na rampa. A descida da carga e o vazamento sofrerão grande distúrbio.

Desta forma, para situações especiais onde o silício no metal quente possa ser muito alto, a escória deverá ser trabalhada para funcionar com o alto silício do metal. Para este fim, uma quantidade extra de SiO_2 tem que ser trazida para dentro do forno. O método preferido é utilizar um minério calibrado silicioso. Algumas empresas usam quartzito, o qual é adequado para corrigir a basicidade sob operação normal. Entretanto, ele não é adequado para situações de esfriamento, tendo em vista que a temperatura líquida do quartzito em si é muito alta (1.700°C). O efeito do uso de um minério silicioso pode também ser mostrado no diagrama triângulo, na Figura 67: trabalhando-se com uma basicidade mais alta, a temperatura líquida diminui ao longo da linha indicada.

9 – Metal quente e escória

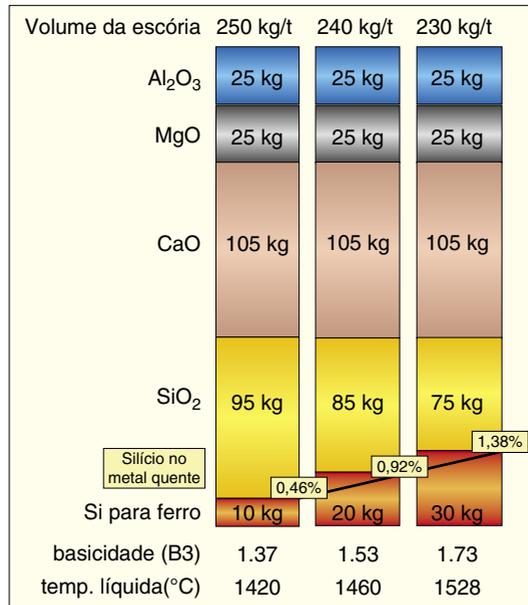


Figura 66: Propriedades da escória sob situações especiais

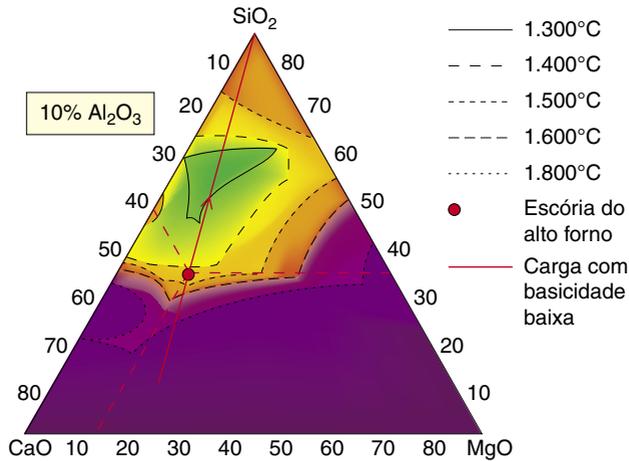


Figura 67: Efeito da carga com baixa basicidade nas temperaturas líquidas da escória



Capítulo 10

Operação da casa de corrida

10.1 Objetivos da operação da casa de corrida

Resultados operacionais excelentes num alto forno só poderão ser alcançados se três condições forem satisfeitas:

- Boa qualidade da carga e do coque,
- Bom controle do fluxo de gás,
- Boa prática de vazamento do forno.

O capítulo presente trata das boas práticas de vazamento do forno.

O ferro e a escória líquidos são recolhidos no cadinho do forno, bem abaixo das ventaneiras. O ferro e a escória não se misturam: a escória possui um peso específico mais baixo ($2,3 \text{ t/m}^3$) do que o ferro ($7,2 \text{ t/m}^3$) e “flutua” no ferro. Isto implica que, as gotas de ferro passam pela camada de escória. O ferro e a escória chegam próximo ao equilíbrio térmico e químico. Uma apresentação esquemática de um cadinho e um furo de corrida é apresentada na Figura 68. O furo de corrida é de construção por refratário. Um “cogumelo” refratário é feito pelo lado de dentro com lama (pasta) solidificada de furo de corrida.

O alto forno é vazado de 8 a 14 vezes por dia através do furo de corrida. A duração média de um vazamento é 1,5 a 3 horas. Neste tempo, o forno produz uma parte considerável do seu volume de trabalho. Conforme mostrado no capítulo 2, o tempo de residência da carga é de 5 a 6 horas. Desta forma, para um vazamento de 2 horas, aproximadamente 1/3 do conteúdo do forno é fundido em ferro e escória. Espirros no vazamento devido ao gás da zona de combustão indicam o final do vazamento.

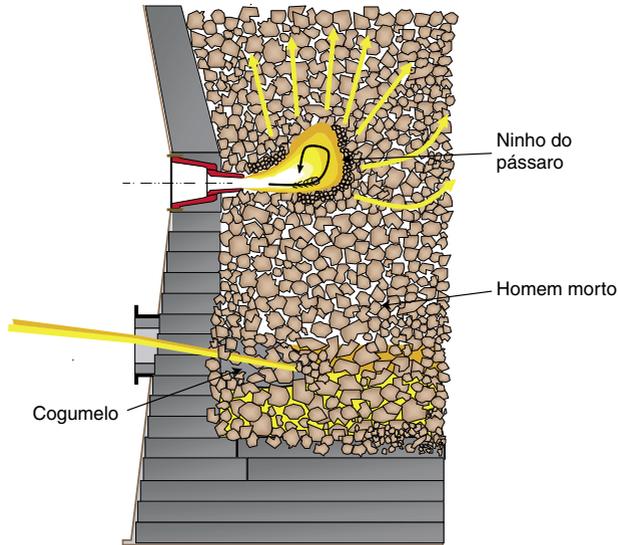


Figura 68: Cadinho

O nível do líquido no cadinho possui dois efeitos principais no processo do alto forno:

- Os líquidos no cadinho afetam a descida da carga: quanto mais alto for o nível do líquido, mais fortemente o coque submerso empurrará a carga em sentido ascendente (Figura 34),
- Se a escória alcançar o nível das ventaneiras e não puder ser drenada para o cadinho, o fluxo de gás será severamente afetado. Isto poderá resultar numa redução deficiente da carga e, desta forma, num forno mais frio.

De forma a prevenir os efeitos, o nível do líquido no cadinho tem que ser mantido sob controle e preferivelmente num nível constante e baixo.

O objetivo da operação da casa de corrida é extrair o líquido do forno sem interferência com o processo do alto forno.

Note que a “capacidade de armazenamento do cadinho depende da fração de vazios do coque no cadinho”. A fração de vazios pode ser muito baixa. Uma fração de vazios de 25% pode ser usada. Num coque estacionário no cadinho, a fração de vazios é, em sua maioria, muito mais baixa.

10.2 Layout da casa de corrida

Um alto forno moderno possui pelo menos 2 furos de corrida. Os fornos grandes, com cadinhos de 14 metros de diâmetro, possuem até mesmo 4 furos de corrida. Um layout esquemático de uma casa de corrida está mostrado na Figura 69. O layout do sistema do canal de corrida é mostrado. O ferro é vazado no canal principal. O ferro e a escória podem ser facilmente separados porque eles não se misturam, e também devido à diferença de peso específico deles (Figura no capítulo 7). A Figura 70 mostra os fluxos do ferro e da escória pelo canal principal e em direção ao skimmer (separador), este último permitindo que o ferro flua, porém desviando a

10 – Operação da casa de corrida

escória para o canal de escória. A escória então é normalmente granulada através de água ou despejada em baias de escória. O ferro é coletado em carros torpedos. 2 torpedos são posicionados próximo a cada canal de corrida e poderão ser enchidos por meios de um canal basculante (inclinável). O canal basculante permite ao operador trocar de carro torpedo durante um vazamento.

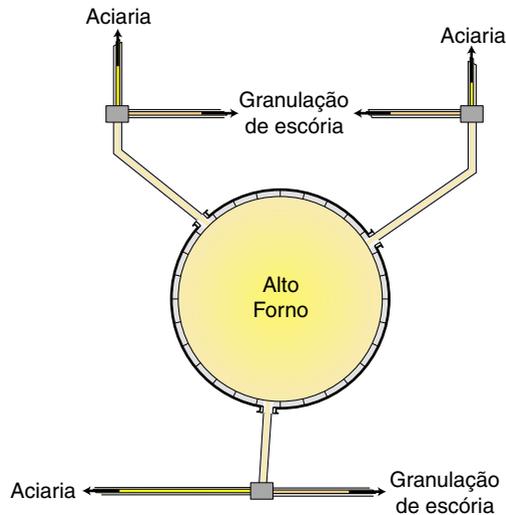


Figura 69: Exemplo de layout de casa de corrida (3 furos de corrida)

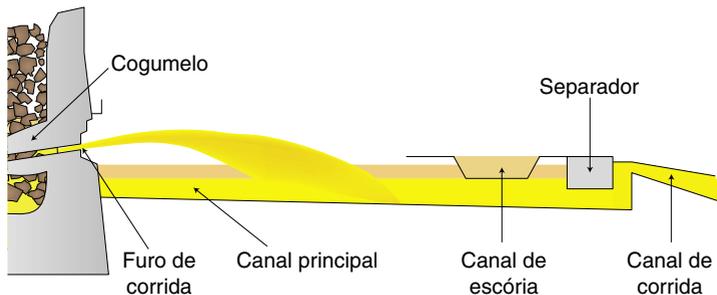


Figura 70: Separação ferro/escória

10.3 Prática com cadinho seco e operação com um furo de corrida

A maioria dos fornos de alta produtividade é vazada de forma alternada, ou seja, quando um furo de corrida é tamponado, o outro é aberto. O intervalo de tempo entre vazamentos pode ser reduzido até mesmo para zero. Um vazamento contínuo é possível. A vantagem do método é que o nível do líquido no cadinho pode ser mantido consistentemente num nível baixo e a interferência com o processo poderá ser evitada. Seja por incidente ou de propósito, às vezes apenas um furo de corrida

10 – Operação da casa de corrida

fica disponível e o líquido é vazado via um furo de corrida. Nesta situação, haverá um intervalo de tempo entre as operações de vazamento de 20 a 45 minutos. O tempo é necessário para limpar a região do furo de corrida e para curar a lama (pasta) do furo de corrida. Como consequência da operação com 1 furo de corrida, o nível do líquido dentro do forno irá variar. O controle do comprimento do furo de corrida é mais difícil. Parece haver uma produção máxima de ferro, o qual poderá ser vazado por operação com 1 furo de corrida. Estima-se como sendo 6000 ton./dia para um forno com cadinho de 11 metros de diâmetro, e 8000 ton./dia para um forno com cadinho de 14 metros de diâmetro.

A operação “ideal” da casa de corrida para um forno grande e de alta produtividade é o vazamento contínuo e de forma alternada, com tempos de vazamentos semelhantes para as corridas (10 corridas/dia) e um fluxo de escória quase contínuo. Cobertura da escória > 95%. Figura 71.

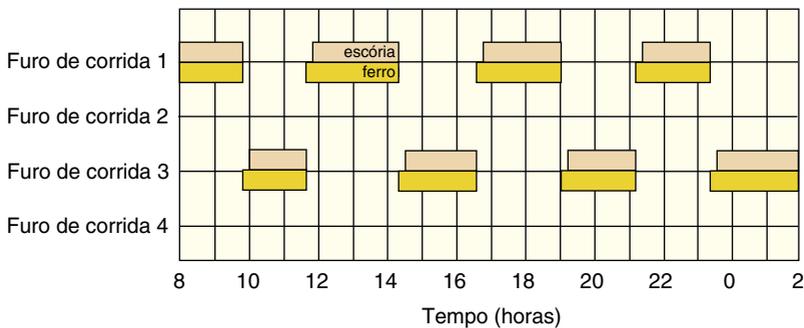


Figura 71: Apresentação do vazamento para um forno de 4 furos de corrida, onde 1 e 3 são operados de forma alternada e sem atrasos.

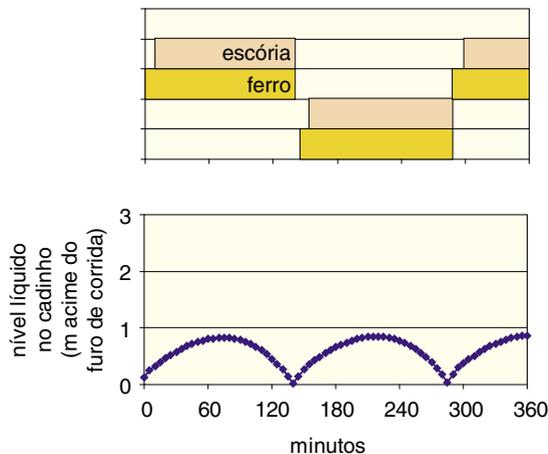


Figura 72: Variação do nível de líquido no cadinho (em metros) para vazamentos alternados.

10.4 Abertura e tamponamento do furo de corrida

10.4.1 Fluxo de ferro e escória

Os fluxos de ferro e escória de um furo de corrida são determinados pelas características do furo de corrida, ou seja:

- O comprimento do furo de corrida, o qual é afetado pela forma de tamponamento e qualidade da lama (pasta),
- O diâmetro do furo de corrida. E, especialmente o desgaste do furo de corrida com o tempo,
- A aspereza da superfície,
- A pressão pelo lado de dentro, se consistindo da pressão do vento quente e a pressão “hidrostática”.

Uma vez que um furo de corrida se desgasta continuamente, especialmente pelo ataque da escória, os fluxos de ferro e escória não são constantes. Além disto, no início de uma operação de vazamento somente o ferro poderá ser vazado. Um padrão típico de fluxo de vazamento de um alto forno está mostrado na Figura 71. Mesmo com uma boa prática de vazamento, existe uma variação no nível líquido do cadinho de até 1 metro dentro do forno. A qualidade da lama (pasta) usada num furo de corrida determina a resistência ao ataque da escória, sendo assim, uma escolha apropriada da lama tem que ser feita. Isto não será discutido aqui.

10.4.2 Abertura do furo de corrida

Dois métodos são aplicados para a abertura do furo de corrida: abertura por perfuração (broca) e cravamento de barra. Com a prática por cravamento de barra, uma barra é colocada na massa de tamponamento imediatamente após o tamponamento, sendo que a barra é extraída para abrir o furo de corrida. A vantagem é que a abertura do furo de corrida se torna muito rápida e é tida como confiável. Esta prática é especialmente adequada para operações com 1 furo de corrida. Muitas empresas têm experimentado a técnica da barra cravada, porém, a maioria delas usa o método da perfuração. A prática por cravamento de barra tem um grande impacto nos tijolos e blocos do furo de corrida.

Uma boa perfuração tem que atender aos seguintes requerimentos:

- A posição da broca terá que ser reproduzível e na mesma posição: o centro do furo de corrida. Para este fim, a broca usada deverá ser automaticamente presa ao forno,
- Diâmetro da broca: uma seleção de diâmetros de broca deverá estar disponível (40 – 60 mm). O diâmetro do furo deverá ser constante por todo seu comprimento. Para este fim, a broca deverá ser guiada e a força de avanço, a velocidade de rotação e o martelamento (impacto) deverão ser apropriadamente controlados. O desgaste da seção de trabalho da broca deverá ser prevenido, o que poderá ser conseguido pelo uso do nitrogênio ou nitrogênio/água para a purga e refrigeração durante a perfuração,

10 – Operação da casa de corrida

- O comprimento do furo de corrida: a perfuração diretamente para dentro do banho de metal quente deverá abrir o forno. É contraproducente tentar economizar uma broca e haste através da interrupção antecipada da perfuração.

Em algumas situações a perfuração não poderá abrir o furo de corrida. Então o uso manual de lanças de oxigênio é aplicado. O uso de lanças deverá ser o último dos recursos, tendo em vista que a reprodutibilidade é pobre e existem riscos de danos e ruptura para o furo de corrida.

10.4.3 Tamponamento do furo de corrida e comprimento do furo de corrida

A qualidade da lama (ou pasta) e o tamponamento apropriado são muito importantes para o comprimento do furo de corrida e para as taxas de vazão de ferro e escória. O tamponamento tem que atender aos requerimentos apresentados a seguir:

- O tamponamento tem que ser feito na mesma posição que a broca de forma a evitar o derramamento da lama. O derramamento da lama poderá levar a um fluxo “secundário” de vazamento. Ele poderá ser observado quando a abertura do furo de corrida não for suave.
- A velocidade do pistão e a pressão da lama têm um efeito direto na injeção apropriada da lama no furo.
- Ao usar uma pasta ligada com alcatrão o tempo de cura deverá ser suficientemente longo para assegurar um condicionamento adequado da pasta. Para este fim, o canhão de lama tem que ser posicionado e pressurizado em frente ao furo de corrida por 15 a 30 minutos.
- O comprimento do furo de corrida é determinado pela quantidade da injeção de lama. Desta forma, uma quantidade de pasta além da suficiente é injetada para encher o furo de corrida. O excesso de pasta é usado para formar o cogumelo no lado de dentro do furo de corrida. Quanto maior for o forno, mais comprido será o furo de corrida, ou seja, 2,5 metros de comprimento de furo de corrida para um forno com diâmetro de cadinho de 11 metros e 3 metros para um forno com diâmetro de cadinho de 14 metros. O comprimento maior do furo de corrida é necessário para manter o fluxo de metal afastado da parede do forno de forma a prevenir o desgaste do refratário.
- Estanqueidade ao gás. Após a perfuração do furo, a pasta do furo de corrida deverá ficar suficientemente estanque ao gás para prevenir a ocorrência de spray no material vazado. A re-pressurização da pasta do furo de corrida imediatamente após o tamponamento poderá ajudar a melhorar a estanqueidade ao gás.

10.5 Nível líquido do cadinho e operação da casa de corrida

10.5.1 O efeito do vazamento em um único lado e comparação com vazamentos alternados

Na Figura 73, o efeito da operação da casa de corrida no nível líquido do cadinho é comparado entre vazamentos alternados e vazamento em um único lado. Tendo em vista que no caso do vazamento em um único lado existe uma lacuna de tempo de 30 a 40 minutos entre vazamentos, o nível líquido do cadinho sobe muito mais do que numa situação com vazamentos alternados. O cálculo feito para o vazamento em um único lado mostra que o nível líquido do cadinho poderá alcançar de 2 a 3 metros acima do furo de gusa. Isto também tem um efeito na velocidade de descida da carga: não é incomum no final do vazamento que a descida da carga, e por conseguinte a taxa de carregamento, aumentem. A razão é que a força em sentido ascendente, a partir do metal líquido no cadinho, diminui. Veja a Figura 35.

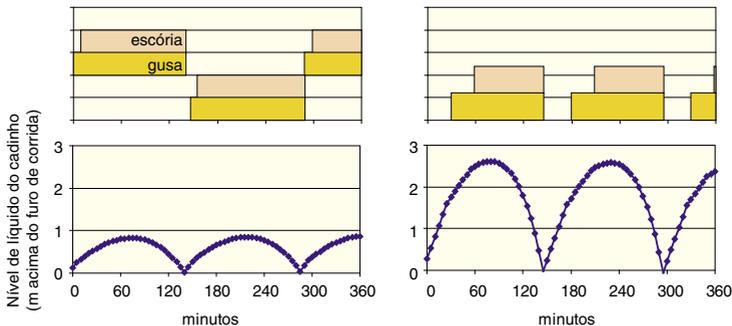


Figure 73: Nível do metal líquido no cadinho comparado para vazamento alternados (esquerda) e vazamento em um único lado (direita)

10.5.2 Atrasos na casa de corrida

As conseqüências dos atrasos na casa de corrida podem ser bem severas. Primeiramente, se a corrida sofrer um pequeno atraso – digamos, tempos de atrasos de 45 a 75 minutos – a descida da carga será afetada: a força mais alta em sentido ascendente impedirá que a carga desça conforme mostrado na Figura (capítulo 6). A descida mais lenta da carga será seguida de um período com descida mais forte, no qual haverá menos calor disponível para fundir a carga e a conseqüência será que a temperatura do metal quente e do silício irá diminuir. Do ponto de vista operacional, é importante ter condições de manter a casa de corrida sempre sob controle. É recomendado diminuir o nível de produção num estágio inicial para prevenir efeitos mais severos.

Em segundo lugar, se a corrida for atrasada além do momento, num ponto em que a escória alcance o nível das ventaneiras, a escória será empurrada para dentro e irá bloquear parte do fluxo de gás. Como conseqüência, se o forno estava sendo

10 – Operação da casa de corrida

operado com marcha central, o padrão do fluxo do gás será redistribuído em direção a parede. O momento quando a escória alcança as ventaneiras é visível a partir de um aumento gradual da pressão do vento quente / resistência da carga ou diminuição do índice de permeabilidade (fator K). Nesta situação o esfriamento do forno será mais severo do que no cenário acima.

A situação muito ruim poderá surgir, na qual até o ferro alcança o nível da ventaneira. Se for este o caso, o ferro irá fluir pelas ventaneiras e para dentro dos algaravizes, sendo que um algaraviz irá se queimar causando uma parada de emergência do forno.

10.6 Exercício

Calcule o tempo necessário para encher o cadinho, do furo de corrida até as ventaneiras. Use os dados mostrados a seguir:

O forno produz ferro (6,7 t/min ou 400 t/hr) e escória (100 t/hr). O metal quente pesa 7,2 t/m³. A escória pesa 2,3 t/m³. O vazio é de 20%. O diâmetro do cadinho: 14 m. Distância furo de corrida–ventaneiras: 4,2 m.

Capítulo 11

Situações especiais

11.1 Paradas e partidas

Quando um alto forno que está sob plena operação é paralisado, alguns dos processos continuam. Enquanto o vento quente é cortado, as reações de redução direta dentro do forno continuam, bem como as perdas térmicas na parede. A consequência é que a temperatura do material na zona de fusão é reduzida para aproximadamente 1.050 a 1.100°C, o início da reação de perda solução do carbono, a qual requer muita energia (Capítulo 6). A temperatura em decréscimo re-solidifica os materiais sob fusão. Desta forma, após uma parada, leva um tempo para a carga começar a descer. A descida da carga começa novamente assim que a zona de fusão “antiga” é fundida (Figura 74). A falta de calor para a parada de um forno operando com ICP é ainda pior: durante o procedimento de parada a injeção de carvão é cortada do forno e, durante a partida, leva um tempo para partir novamente a ICP. Como resultado, há uma falta adicional de combustível.

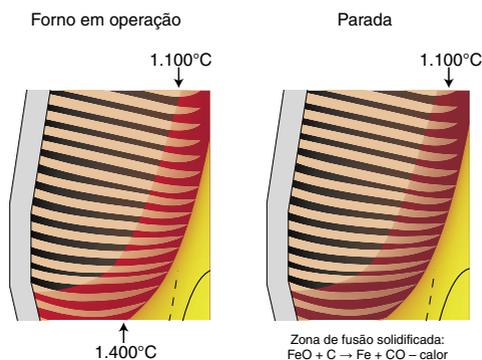


Figura 74: Zona de fusão solidificada como consequência de uma parada

11 – Situações especiais

Além disto, após uma parada, o silício do metal quente às vezes sobe para valores muito altos, especialmente se durante o procedimento de parada/partida o forno estiver operando sob um baixo volume do jato de vento quente. Conforme mostrado na Figura 65, a basicidade da escória será afetada pelo alto silício do metal quente e a escória poderá até mesmo solidificar dentro do forno. Isto resulta numa descida perturbada da carga. O aquecimento da escória é a única solução, por exemplo, entrando com uma carga especial de coque dentro do forno.

Assim, de forma a compensar as perdas térmicas durante uma parada, e o risco de um alto silício no metal quente, as medidas a seguir terão que ser aplicadas:

- Combustível extra no forno. É possível o uso do coque, assim como os combustíveis auxiliares. O combustível adicional é necessário para o período no qual o forno não é operado com a ICP,
- Desenvolva uma composição de escória para um alto silício no metal quente. O uso de um minério calibrado silicioso é recomendado,

Mesmo se uma parada não for planejada, vale a pena tomar as medidas mencionadas após a parada.

Para uma entrada em marcha após uma parada, as maiores armadilhas são:

- Uma entrada em marcha rápida demais. A zona de fusão solidificada irá levar tempo para fundir durante a partida. Se o tempo for insuficiente, a diferença de pressão sobre a carga poderá aumentar demasiadamente, levando a um escape do gás pela parede (perdas térmicas altas) e a uma descida deficiente da carga.
- Uma reentrada rápida demais da ICP. Uma vez que a zona de fusão estará solidificada, existe um risco dos aglomerados sólidos bloquearem o jato de vento quente saindo pelas ventaneira. Se isto acontecer, o carvão continuará sendo soprado para dentro do algaraviz, onde ele poderá causar a falha deste. Desta forma, recomenda-se entrar novamente com a injeção de carvão apenas quando a carga começar a descer.
- Uma basicidade muito alta da escória.

11.2 Abaixamento de carga

Abaixar a carga de um alto forno é operar o forno sem o seu carregamento simultâneo. Desta forma, todo o material carregado no forno é exposto às mesmas temperaturas e processos de redução, como se o forno estivesse completamente carregado.

Todavia, uma vez que a temperatura do gás da cuba não é transferida para a carga fria, as temperaturas do gás de saída aumentam e a composição do gás se altera. Uma vez que o equipamento não foi projetado para suportar altas temperaturas de gás de topo, as temperaturas do gás do topo são mantidas sob controle através de spray d'água. A água de spray acima da carga deverá ser impedida de alcançar a superfície da carga, diretamente via descida no topo da carga ou indiretamente via a parede. Bicos especiais de atomização são necessários e o sucesso do abaixamento da carga depende em muito de um spray adequado. O progresso do processo do abaixamento de carga poderá ser medido a partir do nível da carga, da

11 – Situações especiais

mesma forma que a partir da análise da composição do gás do topo. Tendo em vista que cada vez menos oxigênio é removido do minério, o percentual de CO_2 decresce e o percentual de CO aumenta (Figura 75).

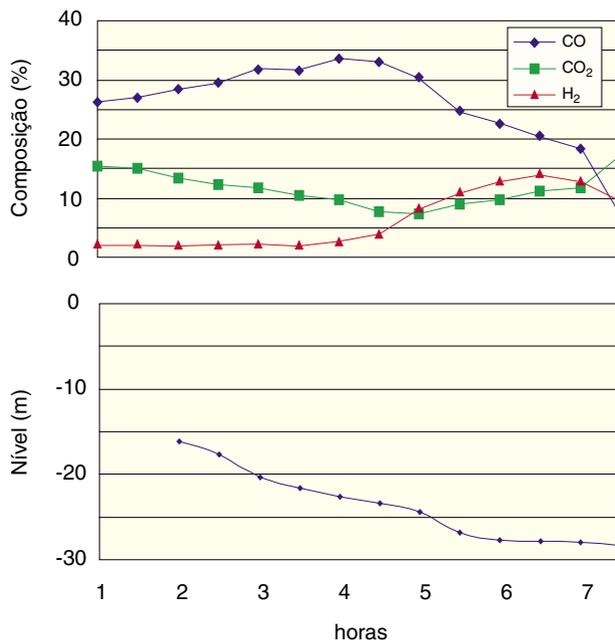


Figura 75: Progresso típico de um abaixamento de carga

Não obstante, o H_2 geralmente aumenta como uma consequência do (inevitável) contato da água de spray com o coque quente. Ao final do abaixamento da carga, quando o nível do coque estiver chegando próximo das ventaneiras, o CO_2 formado nas ventaneiras tem pouca chance de ser transformado em CO e o percentual de CO_2 no gás do topo aumenta. Assim que a metade do oxigênio estiver em CO_2 (% de $\text{CO}_2 = 0,5 \text{ CO}\%$), o forno deverá ser tirado do sistema de gás.

Normalmente um abaixamento de carga leva de 10 a 12 horas, após uma parada de preparação, para chegar ao nível das ventaneiras. Antes do abaixamento da carga, o forno contém coque na zona ativa de coque e homem morto e camadas alternadas de coque e minério na zona de fusão e zona de empilhamento. Uma vez que, durante o abaixamento da carga, o coque da zona ativa de coque e homem morto serão queimados, existe um excesso de coque no alto forno. Durante os estágios posteriores do abaixamento da carga as reações de redução foram largamente paralisadas. Desta forma, se for usada uma injeção de combustível auxiliar (carvão, óleo, gás), ela poderá ser interrompida durante os estágios iniciais do abaixamento da carga. O momento é indicado pela análise do gás: assim que o percentual de CO_2 começar a decrescer abaixo de 10%, indicando que existe pouco ferro para reduzir.

11 – Situações especiais

O nível da carga no forno é difícil de ser medido com as clássicas sondas de nível da carga (stock rods). As sondas de nível da carga precisam estar equipadas com correntes alongadas e têm que ser re-calibradas para este propósito. As sondas de nível da carga deverão ser usadas somente em intervalos, uma vez que as altas temperaturas acima da carga poderão causar ruptura da corrente. Poderão ser usados indicadores de nível tipo radar, se forem confiáveis. As indicações de nível da carga poderão também ser obtidas:

- das tomadas de pressão,
- da operação da casa de corrida, ou seja, da qualidade do ferro vazado,
- dos cálculos de queima e uso do coque (um modelo simples foi desenvolvido).

A condição exigida para o forno após o abaixamento da carga dependerá do objetivo do abaixamento da carga e do reparo que se seguirá. Normalmente as paredes têm que ser limpas. A limpeza do cadinho é um outro tópico importante. Caso seja esperada a existência de bodes e cascões sólidos no cadinho, tendo estes que serem removidos antes do abaixamento da carga, o forno terá que ser operado por um período prolongado de tempo num alto nível térmico, numa baixa taxa de injeção de carvão pulverizado (ICP) e sem adição de titânio.

11.3 Acendimento inicial (blow-in) de forno novo

O acendimento inicial de um forno novo poderá ser considerado em duas fases:

Fase 1: Aquecimento do cadinho.

Fase 2: Início dos processos de redução e produção de ferro.

As duas fases são discutidas separadamente abaixo.

11.3.1 Aquecendo o cadinho

O calor é gerado através da queima do coque em CO. A queima de coque gera 55 kJ/mols C, o que corresponde a 3,9 MJ/tonelada de coque.

O calor exigido nos estágios iniciais do acendimento inicial é necessário para o seguinte:

- Aquecimento do coque no cadinho, homem morto e zona ativa do coque para 1.500°C,
- O aquecimento necessário para a evaporação da umidade da carga de coque,
- O calor necessário para compensação da reação de mudança água-gás da umidade no vento quente ($H_2O + C \rightarrow CO + H_2$),
- O calor para compensação dos fluxos térmicos pela parede.

Uma análise detalhada do requerimento de calor para encher o cadinho, homem morto e zona ativa de coque, com coque numa temperatura de 1.500°C, indica o seguinte:

- A umidade no coque poderá ser desprezada,
- O calor necessário para encher o cadinho, homem morto e zona ativa de coque,

11 – Situações especiais

com coque quente numa temperatura de 1.500°C, requer uma quantidade de coque queimado em CO de aproximadamente 2/3 do volume estimado do cadinho, homem morto e zona ativa de coque,

- As exigências de calor adicional surgem da reação de mudança água-gás e das perdas térmicas pela parede. Isto quer dizer que uma quantidade adicional de 1/3 do volume é necessária para compensar os efeitos mencionados. Por exemplo, se forem necessárias 300 ton de coque para encher o cadinho, homem morto e zona ativa de coque, será necessária uma carga especial de coque com um peso total de 600 toneladas: 300 toneladas para encher o cadinho, homem morto e zona ativa de coque com coque e 300 toneladas para a geração de calor para levar o coque a uma temperatura de 1.500°C,
- Nos estágios iniciais de um acendimento inicial, a temperatura do jato de vento quente deverá ser maximizada e a umidade do vento quente minimizada,
- A queima do coque para o aquecimento do cadinho requer aproximadamente 7 a 8 horas após o acendimento inicial.

11.3.2 Iniciando os processos de redução

O ponto de partida é que o cadinho esteja aquecido. Durante os estágios iniciais da entrada em marcha, a redução dos óxidos de ferro não terá acontecido, devido às temperaturas serem baixas demais. Desta forma, terá que se considerar a quantidade de redução direta. A situação poderá se tornar difícil se a redução direta for alta demais, (e a redução do gás for baixa). Esta situação se manifesta:

- Da utilização do gás,
- Da redução direta, como se manifesta do $\text{CO}+\text{CO}_2$ excedendo valores “normais”.

A utilização do gás é uma indicação da quantidade de redução de gás ocorrendo, enquanto que o percentual de $\text{CO}+\text{CO}_2$ é uma indicação para a redução direta.

11.3.3 Formação da escória

Em geral, a escória durante uma entrada em marcha tem que ser desenvolvida para um silício alto. Todavia, com o método proposto, o silício do metal quente deverá estar sob controle.

Se nós continuarmos a seguir esta abordagem de entrada em marcha de “duas fases”, durante a primeira fase da entrada em marcha aproximadamente 350 toneladas de coque serão queimadas em 8 horas e a escória formada virá apenas das cinzas de coque. Assumindo 10% de cinzas e 30% de cinzas como sendo Al_2O_3 , nós obteremos durante as 8 primeiras horas, 35 toneladas de uma escória de alta Al_2O_3 . Isto não causará um problema no forno devido ao pequeno volume. As cinzas de coque poderão ser diluídas, por exemplo, usando um minério de alto silício na carga especial de coque. De forma a diluir para 20% de Al_2O_3 , umas 30 toneladas de um minério silicioso terão que ser adicionadas à carga especial de coque de 350 toneladas.

11.3.4 Qualidade do metal líquido durante o acendimento inicial

Assim que o cadinho estiver aquecido, a temperatura do metal líquido excederá 1.400°C. Assim que a temperatura do topo exceder o ponto de orvalho, todo o excesso de umidade terá sido removido do forno e o processo terá começado. Existe apenas um calor limitado necessário ao aquecimento e secagem dos refratários, se comparado com as exigências de calor do processo em si. Desta forma, assim que a temperatura do metal líquido alcançar 1.400 °C e a temperatura do topo exceder 90 °C, o processo terá que ser trazido de volta às condições de operação normal.

Entretanto, nesta situação, a taxa de coque (coke rate) no forno ainda continua muito alta e o silício no metal líquido irá subir para 4 a 5%. O silício no metal líquido poderá ser reduzido colocando-se uma taxa de coque normal no forno. A taxa de coque “normal” numa operação totalmente com coque é de aproximadamente 520 kg/ton de metal líquido. Ao se fazer assim, contudo, leva-se um tempo considerável para consumir todo o excesso de coque que se encontra presente no forno. Uma diminuição mais rápida do silício no metal líquido poderá ser alcançada, se uma taxa de coque mais baixa for carregada e se a injeção auxiliar for usada assim que necessária. A injeção sendo ligada assim que o silício no metal líquido cair abaixo de 1%.

Um exemplo de tal acendimento inicial (blow-in) rápido de um forno está apresentado na Figura 76. No acendimento inicial o forno foi partido com oito ventaneiras (de um total de 36). Após a abertura de todas as ventaneiras, uma carga “pesada” (taxa de coque de 450 kg/ton de metal líquido) foi colocada no forno 50 horas após o acendimento inicial e entrou-se com a injeção de finos de carvão no forno 58 horas após o acendimento inicial. O silício no metal alcançou a marca de 1% 60 horas após o acendimento inicial. No 4º dia após o acendimento inicial, o silício médio no metal líquido estava em 0,95% e a produtividade em 2,1 t/m³ WV/d.

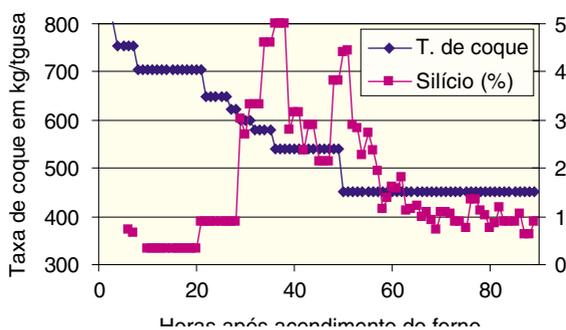


Figura 76: Taxa de coque carregado e silício no metal líquido após o acendimento inicial

Anexos

Anexo I Leitura adicional

1. Biswas, A.K.: Principles of Blast Furnace Ironmaking, Cootha Publishing House, Brisbane, Australia, 1981.
2. Committee on Reaction within Blast Furnace, Omori, Y. (chairman): Blast furnace phenomena and modelling, Elsevier, London, 1987.
3. IISI website: worldsteel.org.
4. McMaster University: Blast Furnace Ironmaking Course (every 2 years), Hamilton, Ontario, Canada, 2002.
5. Meyer, K.: Pelletizing of iron ores, Springer Verlag, Berlin, 1980.
6. Peacy, J.G. and Davenport, W.G.: The iron blast furnace, Pergamon Press, Oxford, UK, 1979.
7. Rist, A. and Meysson, N.: A dual graphic representation of the blast-furnace mass and heat balances, Ironmaking proceedings (1966), 88-98.
8. Rosenqvist, T.: Principles of extractive metallurgy, McGrawHill, Singapore, 1983.
9. Schoppa, H.: Was der Hochofner von seiner arbeit wissen muss, Verlag Stahleisen, Düsseldorf, Germany, 1992.
10. Turkdogan, E.T. (1984), Physicochemical aspects of reactions in ironmaking and steelmaking processes, Transactions ISIJ, 24, 591-611.
11. Wakelin, D.H.: The making, shaping and treating of steel, 11th edition, AISE Steel Foundation, 1999.
12. Walker, R.D.: Modern Ironmaking Methods, Institute of Metals, London, UK, 1986.

Anexo II Referências

1. Biswas, A.K.: Principles of Blast Furnace Ironmaking, Cootha Publishing House, Brisbane, Australia, 1981.
2. Bonnekamp, H., Engel, K., Fix, W., Grebe, K. and Winzer, G.: The freezing with nitrogen and dissection of Mannesmann's no 5 blast furnace. Ironmaking proceedings, 1984, Chicago, USA, 139-150.
3. Chaigneau, R., Bakker, T., Steeghs, A. and Bergstrand, R.: Quality assessment of ferrous burden: Utopian dream? 60th Ironmaking Conference Proceedings, 2000, Baltimore, 689-703.
4. Committee for Fundamental Metallurgy of the Verein Deutscher Eisenhüttenleute: Slag atlas, Verlag Stahleisen, Düsseldorf, Germany, 1981.
5. Exter, P. den, Steeghs, A., Toxopeus, H. Godijn, R., Van der Vliet, C., Chaigneau, R. and Timmer, R.: The formation of an ore free blast furnace center by bell charging, 56th Ironmaking Conference Proceedings, 1997, Vol 56, 531-537.
6. Geerdes, M., Van der Vliet, C., Driessen, J. and Toxopeus, H.: Control of high productivity blast furnace by material distribution, 50th Ironmaking Conference Proceedings, 1991, Vol 50, 367-378.
7. Geerdes, M., Toxopeus, H., Tjihuis, G. and Veltman, P.: Blast Furnace Operations for Long Hearth Campaigns, 3rd IAS Ironmaking conference, Buenos Aires, Argentina, 2001, 97-105.
8. Grebe, K., Keddeinis, H. and Stricker, K.: Untersuchungen über den Niedrigtemperaturzerfall von Sinter, Stahl und Eisen, 100, (1980), 973-982.
9. Hartig, W., Langner, K., Lüngen, H.B. and Stricker, K.P.: Measures for increasing the productivity of blast furnace, 59th Ironmaking Conference Proceedings, Pittsburgh, USA, 2000, vol 59, 3-16.
10. Kolijn, C.: International Cokemaking issues, 3rd McMaster Cokemaking Course, McMaster University, Hamilton, Canada, 2001.
11. Pagter, J. de and Molenaar, R.: Taphole experience at BF6 and BF7 of Corus Strip Products IJmuiden, McMaster Ironmaking Conference 2001, Hamilton, Canada.
12. Schoone, E.E., Toxopeus, H. and Vos, D.: Trials with a 100% pellet burden, 54th Ironmaking Conference Proceedings, Nashville, USA, 1995, vol 54, 465-470.
13. Toxopeus, H., Steeghs, A. and Van den Boer, J.: PCI at the start of the 21st century, 60th Ironmaking Conference Proceedings, Baltimore, USA, 2001, vol 60, 736-742.
14. Vander, T., Alvarez, R., Ferraro, M., Fohl, J., Hofherr, K., Huart, J., Mattila, E., Propson, R., Willmers, R. and Van der Velden, B.: Coke quality improvement possibilities and limitations, Proceedings of 3rd International Cokemaking Congress, Gent, Belgium, 1996, vol 3, 28-37.

Anexo III Respostas aos exercícios

1.4 Fluxos de matéria prima

10.000 t/d fornecem cerca de 3,5 milhões de toneladas por ano (a uma disponibilidade de 96%). Logo, a produção total mundial de 575,7 milhões de toneladas pode ser produzidas em 165 fornos. Com três destes fornos operando por planta, o mundo teria a necessidade de 55 destas grandes usinas siderúrgicas, sendo cada uma produzindo 10,5 milhões de toneladas. O fluxo anual resultante dos materiais seria:

- Produção de aço: $0,9 \times 10,5 = 9,45$ milhões de toneladas de produtos de aço por ano.
- Pelotas necessária: $1,6 \times 10,5 = 16,8$ milhões de toneladas.
- Carvão necessário:
Para coqueria: $10,5 \times 0,3 / 0,75 = 4,2$ milhões de toneladas
Para ICP: $10,5 \times 0,2 = 2,1$ milhões de toneladas

2.3.1 Quanto de oxigênio no vento quente é usado por tonelada de metal quente?

O oxigênio do volume do vento quente é $0,256 \times 6500 \text{ m}^3 \text{ STP/min} = 1.664 \text{ m}^3 \text{ STP}$ oxigênio/min. Taxa de produção = $10.000 / (24 \times 60) = 6,94 \text{ ton MQ/min}$.
Oxigênio usado $1664 / 6.94 = 240 \text{ m}^3 \text{ STP oxigênio/ton MQ}$.

2.3.2 Com que frequência o conteúdo do forno é substituído?

Para produzir uma tonelada de MQ o forno é carregado com:

300 kg coque = $0,6 \text{ m}^3$
1570 kg sínter / pelotas = $0,78 \text{ m}^3$
Total por tonelada de MQ = $1,38 \text{ m}^3$

A produção é de 10.000 toneladas/dia. O que é $10.000 \times 1,38 \text{ m}^3 = 13.800 \text{ m}^3$ por dia. O conteúdo do forno é $13.800 / (3800 - 500) = 4,2x$ renovado por dia.

A carga entrada no topo chega as ventaneiras em 5,7 horas. Verifique que, durante o abaixamento de carga do forno, 1.800 toneladas de ferro são vazadas, se operado com uma carga composta de apenas coque, com uma taxa de coque de 520 kg/ton MQ.

2.3.3 Quantas camadas de minério existem no forno a qualquer dado momento?

O número de camadas de minério depende da “espessura da camada” ou do peso de 1 camada na carga. Ele pode variar de forno para forno e depende do tipo de carga usado, assim, existe uma grande variedade de espessuras apropriadas de

carga. Uma faixa típica vai de 90 a 95 toneladas de carga por camada. Se uma camada contém 94 toneladas, ela contém aproximadamente 60 toneladas de metal quente. Em 5,7 horas o forno produz 2.400 ton, o que corresponde a 40 camadas de minério. Em nosso exemplo, tomando um diâmetro da goela de 10 metros: uma camada de minério é de 60 cm e uma camada de coque 46 cm, em média, na goela.

2.3.4 O que acontece com o coque e o carvão?

Uma tonelada de MQ requer:

300 kg de coque, teor de C de 87%	= 261 kg C
200 kg de carvão, teor de C de 78%	= 160 kg C
Total de carbono	417 kg C

Aproximadamente 45 kg de carbono se dissolvem no MQ. O balanço deixa o forno em excesso, ou seja, $421 - 45 = 372$ kg. Ele deixa o forno como CO e CO₂.

2.3.5 Quanto gás de topo se obtém?

O nitrogênio soprado no forno deixa o forno sem reações químicas. A entrada de nitrogênio é:

$$6500 \text{ m}^3 \text{ STP vento/min} \times (100 - 25,6) = 4836 \text{ m}^3 \text{ STP/min.}$$

O nitrogênio no gás do topo é 48,5% (Tabela 2.1).

O volume total do gás de topo é $4836/0.485 = 9970 \text{ m}^3 \text{ STP/min}$. Correspondendo a 153% do volume de vento quente.

O cálculo pode também ser feito com base nos pesos.

A produção é por minuto $10.000/(24 \times 60) = 6,94$ tonelada de MQ/min

Para 1 tonelada de metal quente $6500/6,94 = 936 \text{ m}^3 \text{ STP}$ de vento quente são usados, o que pesa 1.218 kg (Tabela 2.1). O balanço é apresentado na Tabela 26. O peso do gás de topo corresponde às admissões conhecidas menos a produção de ferro e escória. O peso total do gás do topo é duas vezes o peso do ferro!

Tabela 26: Exemplo de balanço com base no peso

Admissões	em kg/tMQ	Produção	em kg/tMQ
Vento quente	1.218	Ferro	1.000
Coque	300	Escória	240
Carvão	200	Gás de topo	2.058
Carga	1.580		
	3.298		3.298

O volume de gás na zona de combustão é $8.164 \text{ m}^3 \text{ STP/min}$ ($6.500 \times (1 + 0,256)$), e o volume de gás do topo é $9.987 \text{ m}^3 \text{ STP/min}$ ($2.058/1,43 = 1.439 \text{ m}^3/\text{tMQ}$). Logo, o volume de gás das reações de redução direta é aproximadamente $1.800 \text{ m}^3 \text{ STP/min}$ ($9.987 - 8.164$).

2.3.6 Estimativa de quanto tempo o gás permanece no forno

Sob um volume de vento quente de 6500 m³ STP/min, com 25,6% de oxigênio, a produção por minuto de gás na rampa é $6500 \cdot (1 + 0,256) = 8164$ m³ STP. Este gás possui uma temperatura mais alta (decrecendo de 2.200°C para uma temperatura de gás de topo de 125°C), o forno é operado sob uma pressão mais alta (digamos 4,8 bar nas ventaneiras e 3 bar no topo) e há a formação de gás extra pela reação de redução direta. Se todos estes efeitos forem desprezados, o exercício fica bem simples:

Suponha que a fração de vazios na carga seja de 30%, assim, o volume no forno é $(3800 - 100) \cdot 0,30 = 1.100$ m³, através do qual 8.164 m³ STP de gás é soprado por minuto. Desta forma o tempo de residência do gás é $1.100 / 8.164 \cdot 60 = 8$ segundos. É possível fazer as correções mencionadas acima. Tome uma temperatura média do gás de 900°C e uma pressão média de 4 bar, e então os efeitos serão:

- O aumento do tempo de residência pela alta pressão do topo é $4/1 =$ um tempo de residência 4 vezes mais alto.
- Diminuição do tempo de residência pela temperatura mais alta do gás $273 / (273 + 900) =$ um tempo de residência 0,23 vez mais curto.
- A diminuição do tempo de residência devido ao gás extra da redução direta é de $8.164 / 9.970 =$ um tempo de residência 0,89 vez mais curto (veja 2.3.1.5).
- No total $4 \cdot 0,23 \cdot 0,89 =$ um tempo de residência 0,82 mais curto. Assim, o tempo de residência correto é $8 \cdot 0,82 = 6$ segundos.

2.3.7 Se você obtiver uma grande quantidade de gás de topo, existe um forte vento quente no forno?

Não. Nas ventaneiras existem ventos em alta velocidade (> 200 m/seg.), mas o volume do gás de topo é de aproximadamente 9.970 m³ STP/min. Pelo diâmetro da goela, sob uma temperatura do gás de 120 °C e uma pressão de topo de 2 bar, a velocidade do gás de topo é de 1,0 m/seg.: na escala de Beaufort, trata-se de uma velocidade de vento 1.

10.6 Nível de líquido no cadinho

A produção de líquido é:

- Gusa: $6,7 \text{ t/min} = 400 \text{ t/h} = 400 / 7,2 \text{ m}^3/\text{h} = 89 \text{ m}^3/\text{h}$
 - Escória: $0,25 \times 6,7 \text{ t/min} = 100 \text{ t/h} = 100 / 2,4 \text{ m}^3/\text{h} = 42 \text{ m}^3/\text{h}$
- Logo, no total, o líquido formado por hora (sem corrida) é de 131 m³/h.

Quantidade de líquido que pode ser colocada no cadinho:

- A área do cadinho é $3,14 / 4 \times 14 \times 14 = 154 \text{ m}^2$.
- Os vazios correspondem a 20% e a altura, 4,2 metros. Entre o furo de corrida e as ventaneiras, podemos colocar $0,2 \times 4,2 \times 154 = 129 \text{ m}^3$ STP de líquido, os quais são suficientes para 1 hora de produção sem corrida!

Anexo IV Regras gerais

Tabela 27: Regras gerais para a operação diária do processo do alto forno

	Unidade	Mudança	Ajuste da Taxa de Coque (kg/t)
Teor de Si	%	+ 0.1	+ 4
Umidade	g/m ³ STP	+ 10	+ 6
Pressão de topo	bar	+ 0.1	- 1.2
Carvão	kg/t	+ 10	- 9
Óleo	kg/t	+ 10	- 11
Oxigênio	%	+ 1	+ 1
Temperatura do vento quente	°C	+100	- 9
Escória	kg/t	+ 10	+ 0.5
Perdas por refrigeração	GJ/hr	+ 10	+ 1.2
Utilização do gás	%	+ 1	- 7

Tabela 28: Regras gerais para a operação diária do processo do alto forno
(volume constante do vento quente)

	Unidade	Mudança	Temperatura da chama (°C)	Temperatura do topo (°C)
Temperatura do vento quente	°C	+100	+ 65	- 15
Carvão	kg/t	+ 10	- 30	+ 9
Oxigênio	%	+ 1	+ 45	- 15
Umidade	g/m ³ STP	+ 10	- 50	+ 9

Index

Abaixamento de carga	110	Distribuição da carga	66
Acendimento após „reline“	112	Distribuição da carga (finos)	65
Acendimento após uma parada	109	Distribuição dos elementos pelo ferro e escória	92
Álcali	48	Dolomite	27
Ângulos de repouso	67	Engaiolamento	57
Arriamento	57	Enxofre no metal quente	94
Balanço de massa	49	Escória, basicidade, definição	95
Cálculo da carga	47	Escória, basicidade, situações especiais	98, 112
Camada mista	68	Escória, propriedades	95
Canalização	66	Fayalite	27
Carburisation	34	Fluidização	66
Casa de corrida, prática com 1 furo de corrida	107	Fluxos térmicos pela parede	60
Casa de corrida, prática com cadinho seco	103	Forças verticais	58
Char	42	Forças verticais, de coque no cadinho	58
Composição do gás de rampa	78	Fornos refriados	2
Compressão de pelotas	30	Furo de corrida	105
Construção de alto forno	7	Hematita	14
Coque, degradação	37	I10	35
Coque, produção	36	I40	35
Coque, qualidade	35	Índice de Abrasividade de Sulco	41
Coque, testes	36	Injeção de carvão, enriquecimento com oxigênio	44
CRI	35	Injeção de carvão, equipamento	40
CSR	35	Injeção de carvão, gaseificação	42
Decrepitation	24	Injeção de carvão, lanças	42
Descida da carga	55, 71		
Dessulfuração do metal quente	91		

Index

Injeção de carvão, seleção de carvão	41	Redutibilidade	24, 30
Injeção de carvão, taxa de reposição	41	Regras gerais para a operação	
Instrumentação	74	diária	120
Layout da casa de corrida	103	Resistência a frio, minério	20
Limestone decarbonisation	27	Silício no metal quente	94, 99
Lintel	7	Simetria circunferencial	46, 87
M10	35	Sínter, efeito de basicidade	
M40	35	para estrutura	25
Magnetita	14	Sínter, produção	21
Minério calibrado	32	Sínter, qualidade	24
Paradas	109	Sínter, tipos	25
Pelotas, qualidade	31	Spinel	27
Perfil de temperatura	5, 87	Taxa de produção	77
Permeabilidade	18, 59	Temperatura líquida	95
Pressão de eixo	74	Temperatura sólida	95
Produção de pelotas	29	Temperature, chama	79
Qualidade de metal quente	92	Tempo de residência, gás	118
Reações de Boudouard	80	Tempo de residência, minério	117
Redução de óxides de ferro	79	Utilização de gás	15
Redução de óxides de ferro, com hidrogênio	79	Utilização de gás, cálculo	53
Redução de óxides de ferro, redução direta	79	Wustita	14
Redução de óxides de ferro, redução direta e pelo gás	79	Zinco	48
Redução-degradação	24	Zona de combustão	77
		Zona de fusão, tipos de	61
		Zona de fusão, veda: zona coesiva	