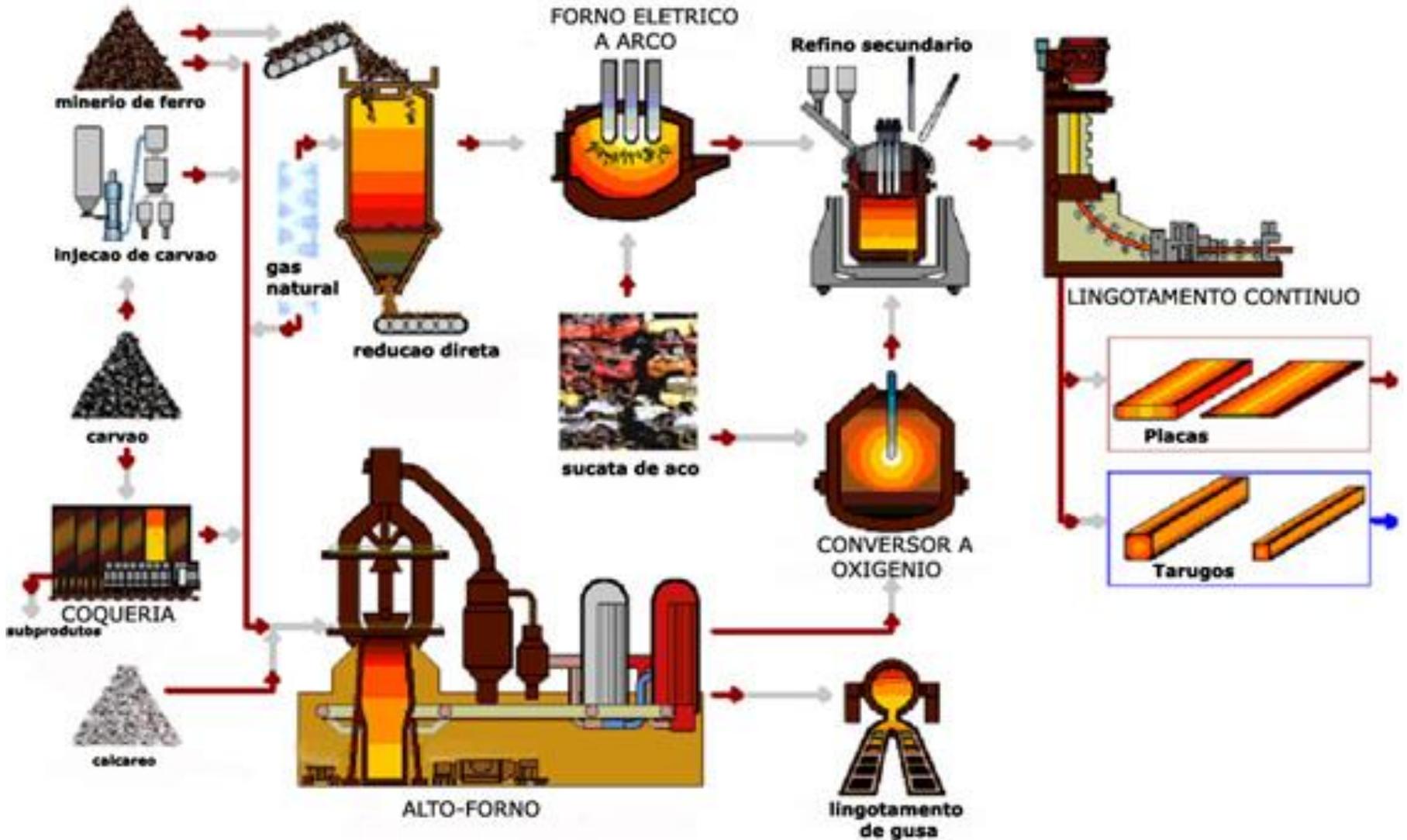
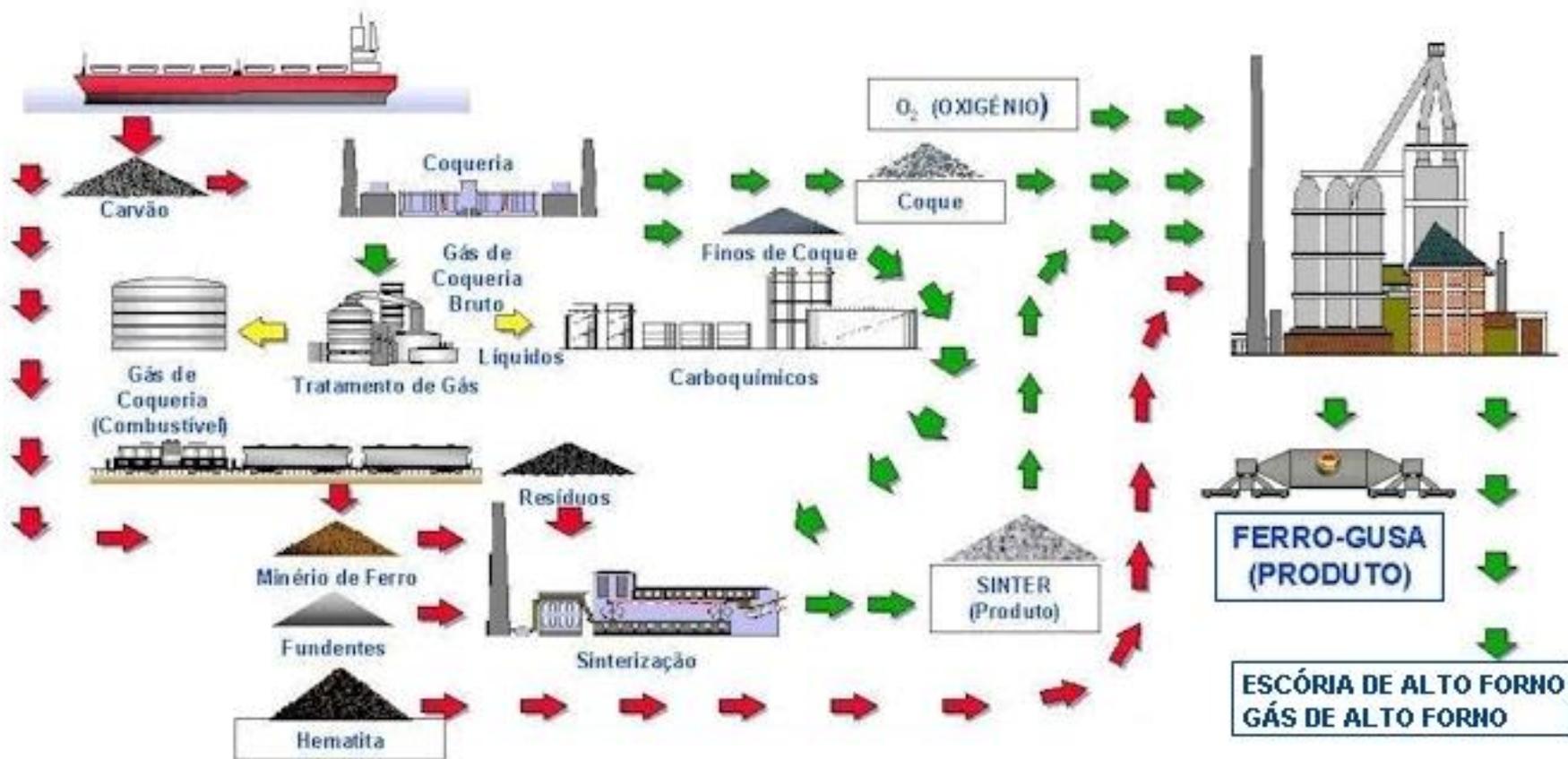


Fluxograma da Metalurgia Primária



Fluxograma parcial de uma usina integrada até o Alto Forno



alto forno: primeiro estágio na produção de aço a partir dos óxidos de ferro

primeiros altos fornos >>século 14 >> 1 tonelada de ferro gusa / dia

atualmente: 13.000 toneladas por dia

alto forno: sistema destinado a produzir ferro gusa em estado líquido a uma temperatura em torno de 1500°C, com a qualidade e em quantidade necessárias para o bom andamento dos processos produtivos subsequentes

matérias primas básicas (carregadas pelo topo do forno):

carga metálica (sinter, pelotas, minério granulado)

combustível sólido (coque ou carvão vegetal)

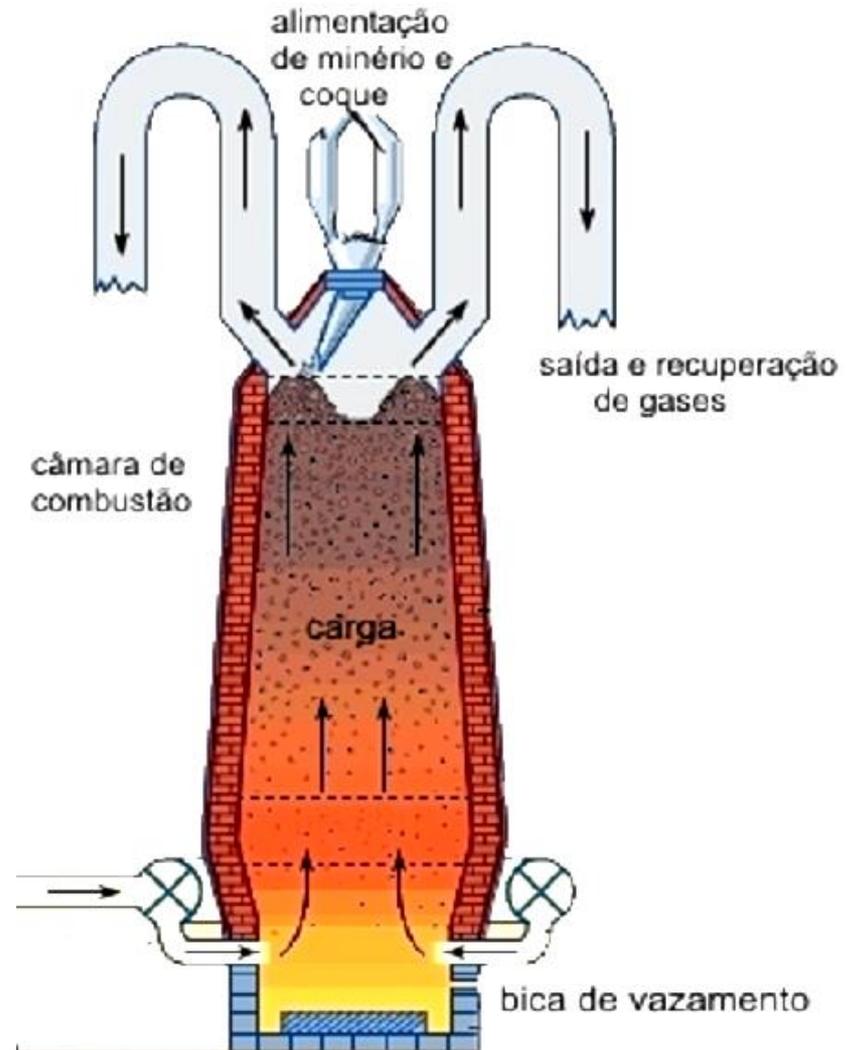
fundentes

reator mais complexo da metalurgia.

centenas de reações

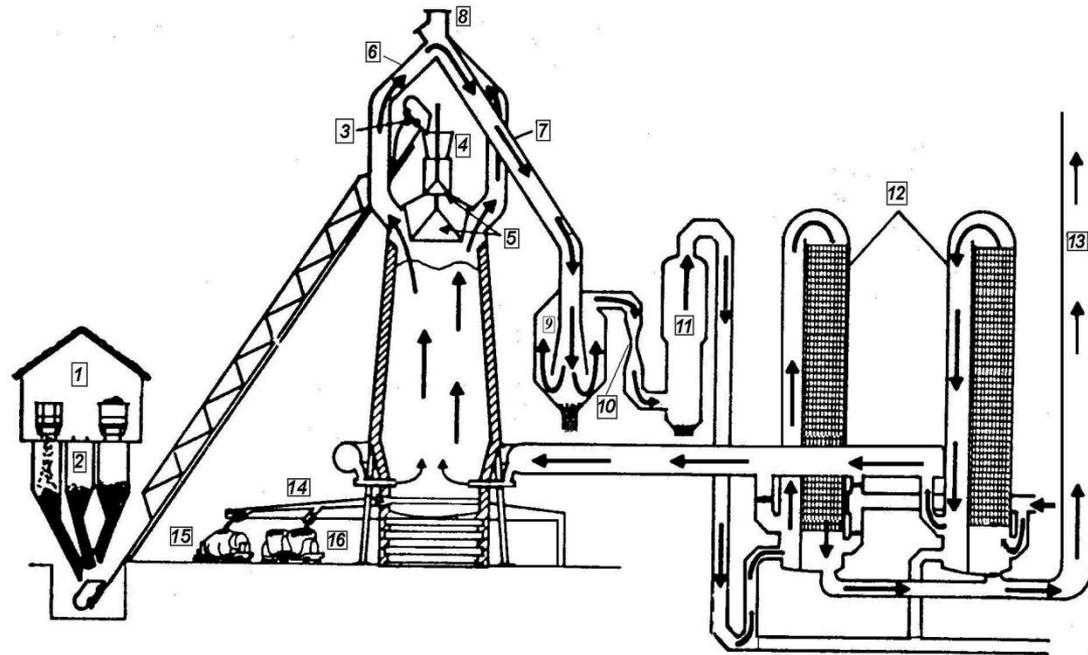
3 estados da matéria:
sólidos, líquidos e gases

grandes gradientes de temperatura, variando de mais de 2000 °C na zona em frente as ventaneiras, até cerca de 150 °C, na região superior onde os gases deixam o forno.



Esquema simplificado do alto forno, indicando os principais equipamentos

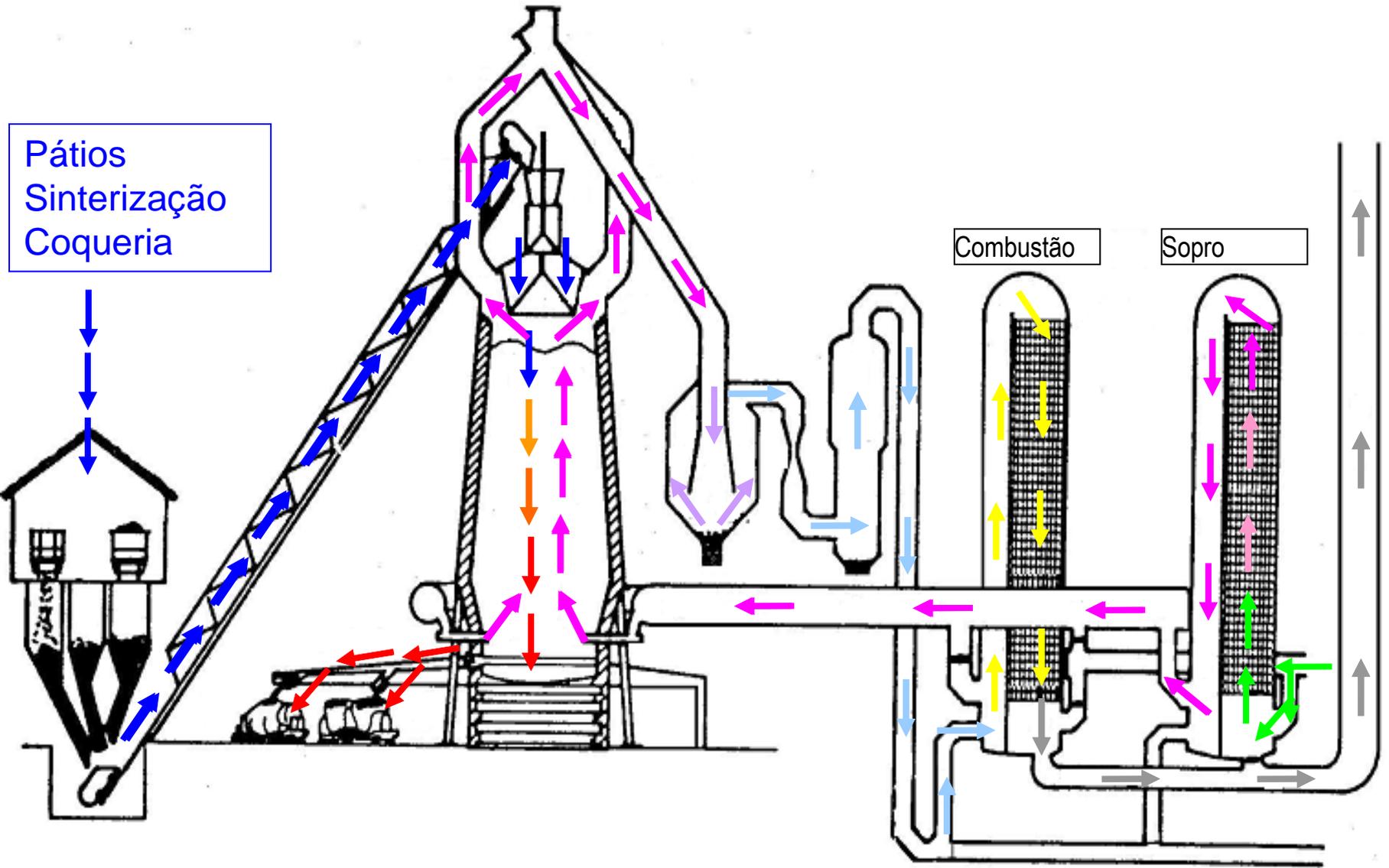
- “casa de silos” (1)
- silos separados (2) equipados com balanças
- carro “skip” (3) ou correia transportadora
- tremonha de recebimento no topo do forno (4)
- cones (5), responsáveis pela selagem dos gases e pela distribuição circunferencial dos materiais na “goela” do forno.
- “uptakes” (6), o gás quente e sujo de pós deixa o forno e flui para cima
- “downcommer” (7)
- válvulas “bleeders” (8) cuja função é permitir a liberação do gás e proteger o topo no caso de uma súbita elevação de pressão do gás
- coletor de pó (9)
- “venturi” (10), onde são removidas as partículas mais finas na forma de lama.
- desumidificador (11) cuja função é reduzir o teor de umidade do gás.
- regeneradores (12)
- chaminé (13).
- o gusa e a escória são separados por diferença de densidade no canal principal (14)
- carros torpedos (15)
- potes de escória (16)



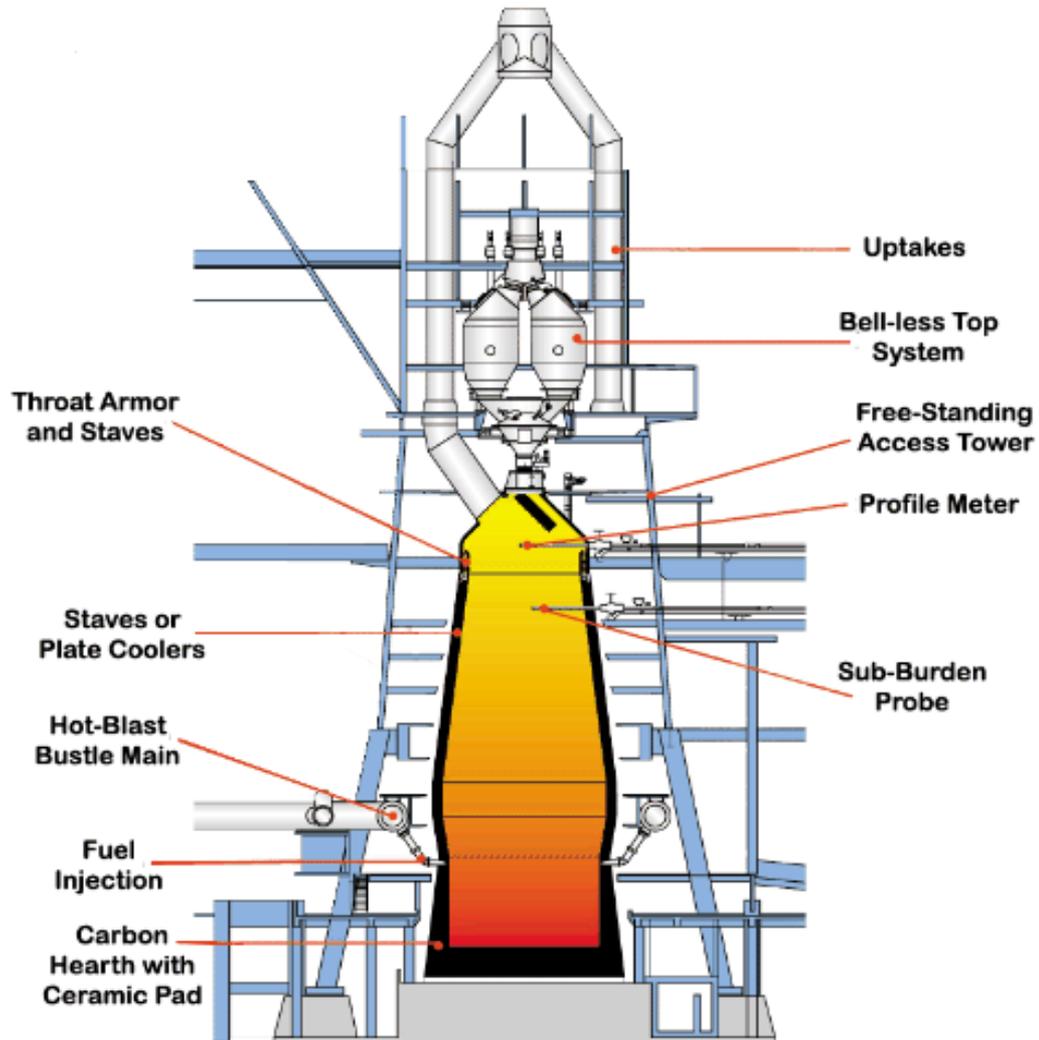
ESQUEMA SIMPLIFICADO DO ALTO FORNO, INDICANDO OS PRINCIPAIS EQUIPAMENTOS

Pátios
Sinterização
Coqueria

Combustão
Sopro



Hoje





Produtos do Alto-Forno

Ferro gusa :

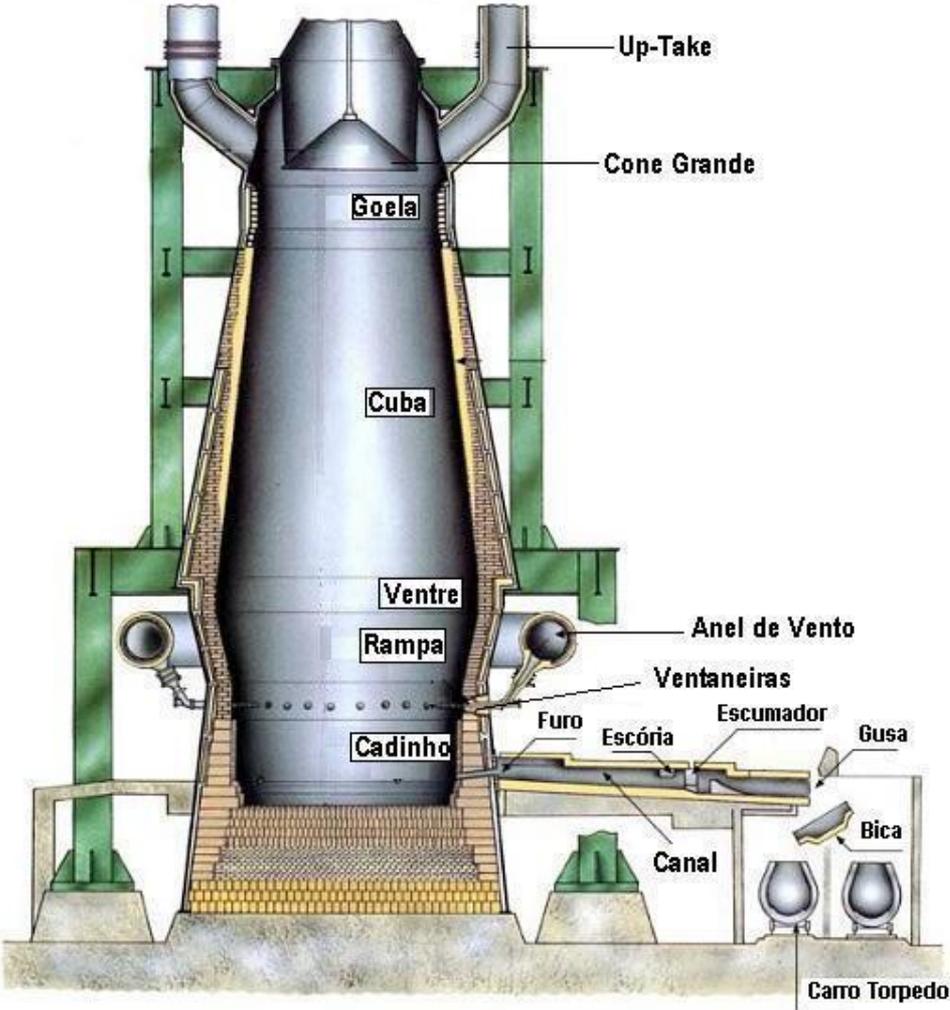
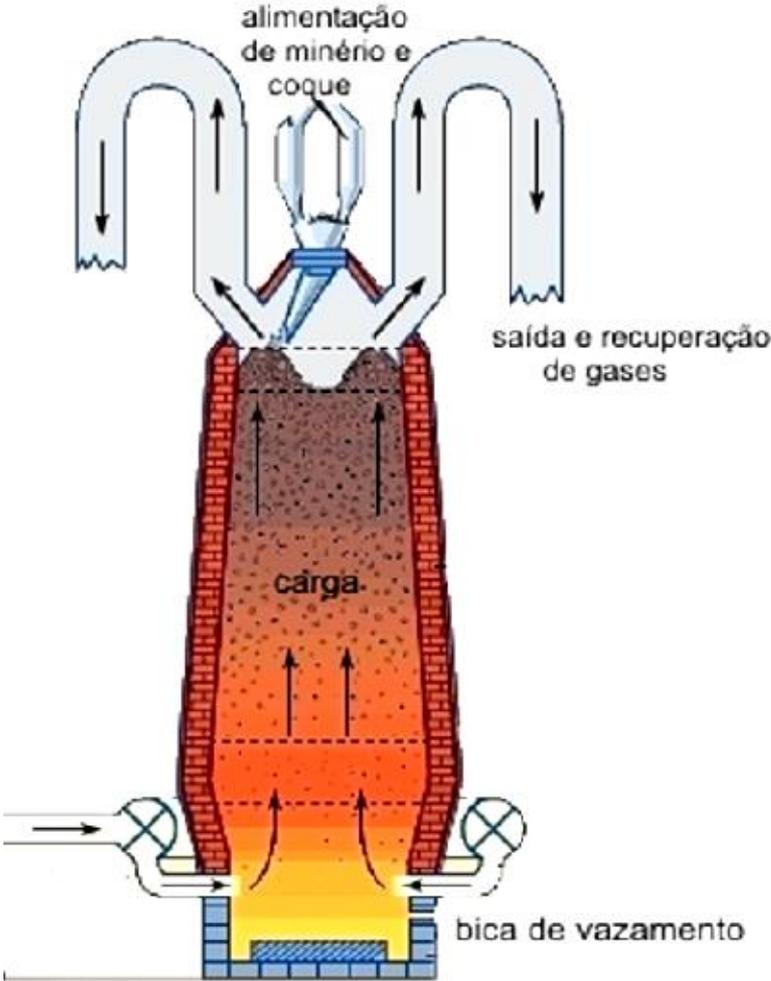
- 4,5 % Carbono
- 0,4% Silício
- 0,3% Manganês
- 0,1 % Fósforo
- 0,03% Enxôfre

Temperatura: 1400-1500 C

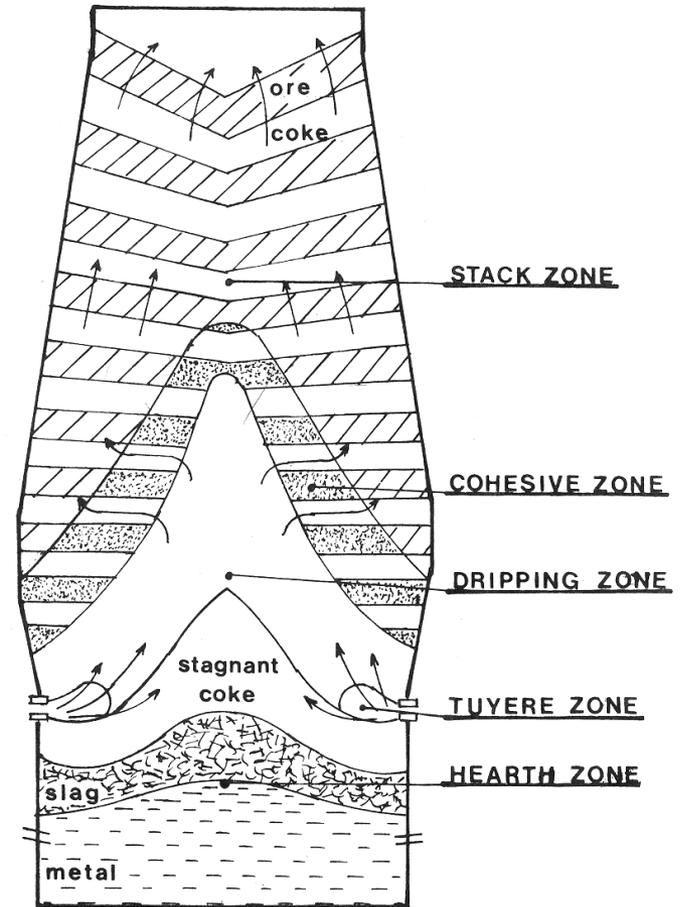
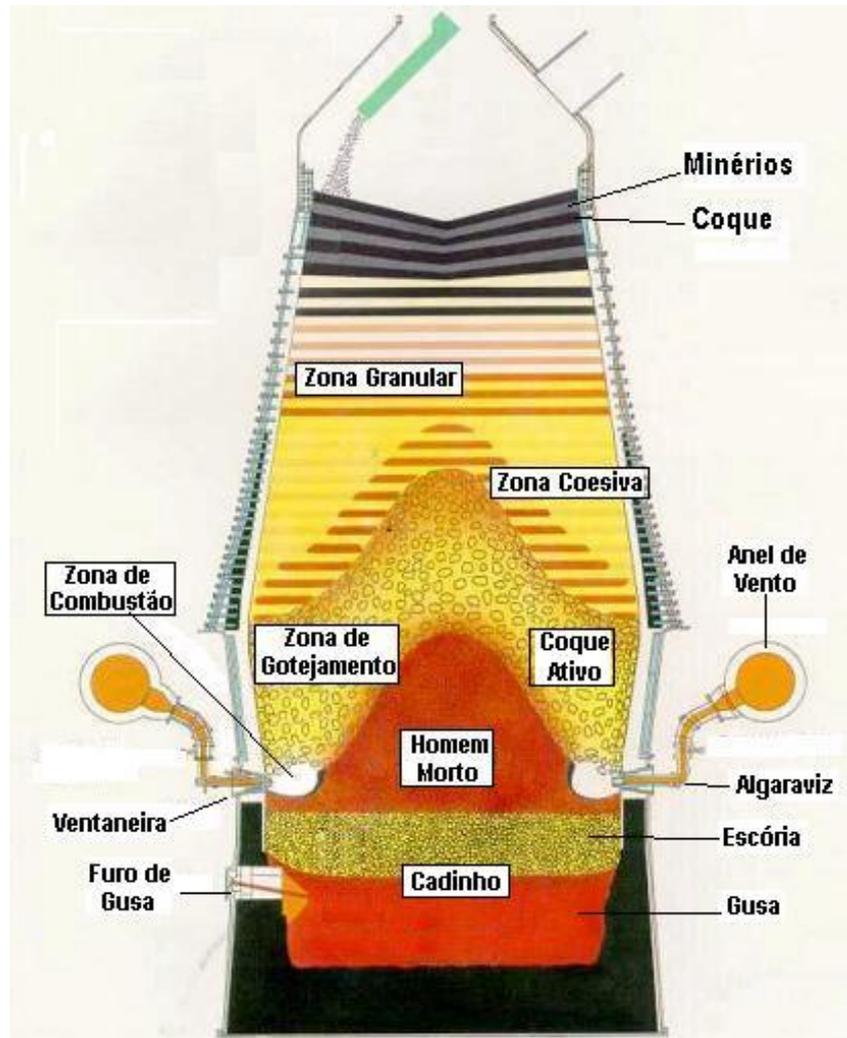
Escória: $\text{SiO}_2\text{-CaO-Al}_2\text{O}_3$

Gás: $\text{CO-CO}_2\text{-N}_2$

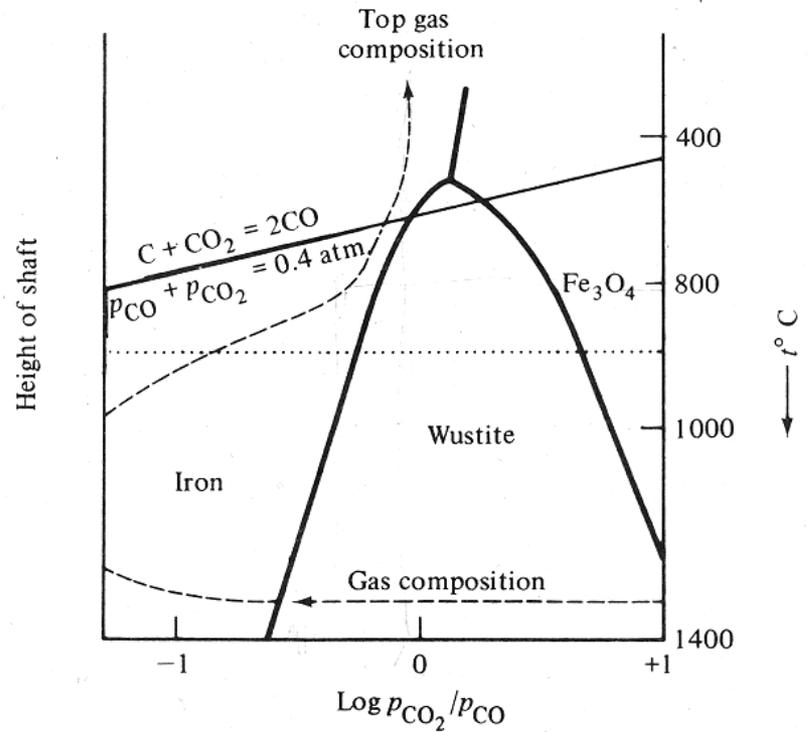
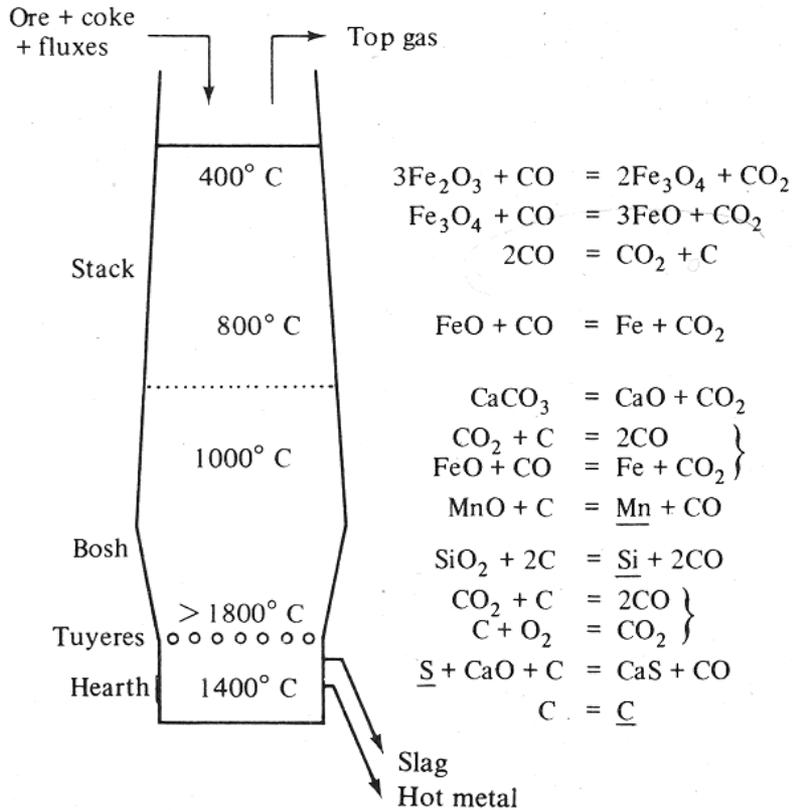
Regiões do AF



Zonas Internas

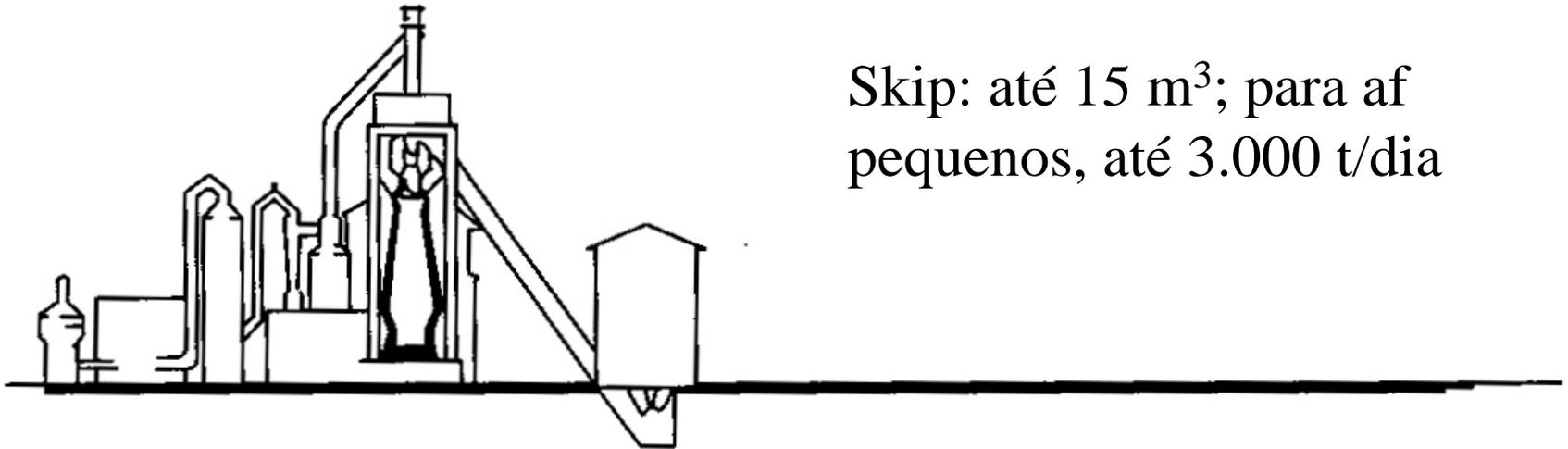


Reações



Carregamento

Skip: até 15 m³; para af
pequenos, até 3.000 t/dia



(a) Skip-fed blast furnace

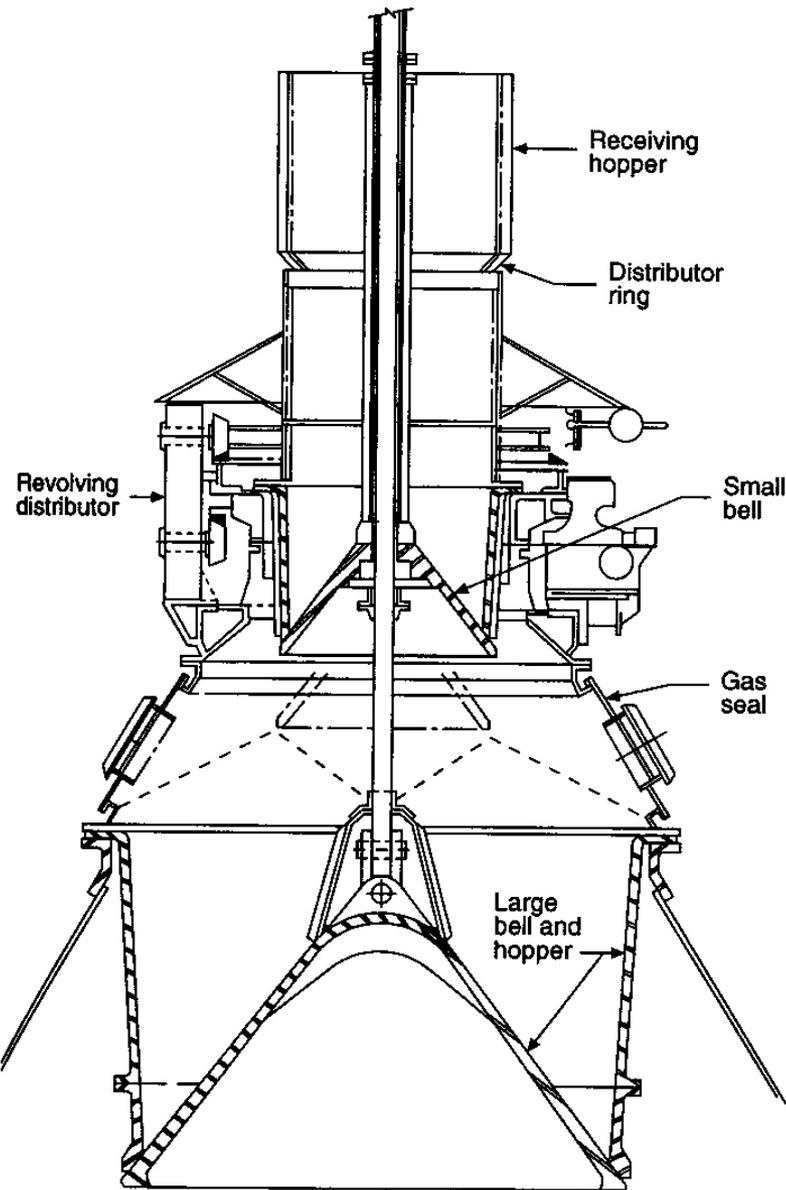
Esteira ou correia; carregamento
contínuo; inclinação máxima de 15';
velocidade 1 a 3 m/s, largura ~1 m.



(b) Conveyor-fed blast furnace

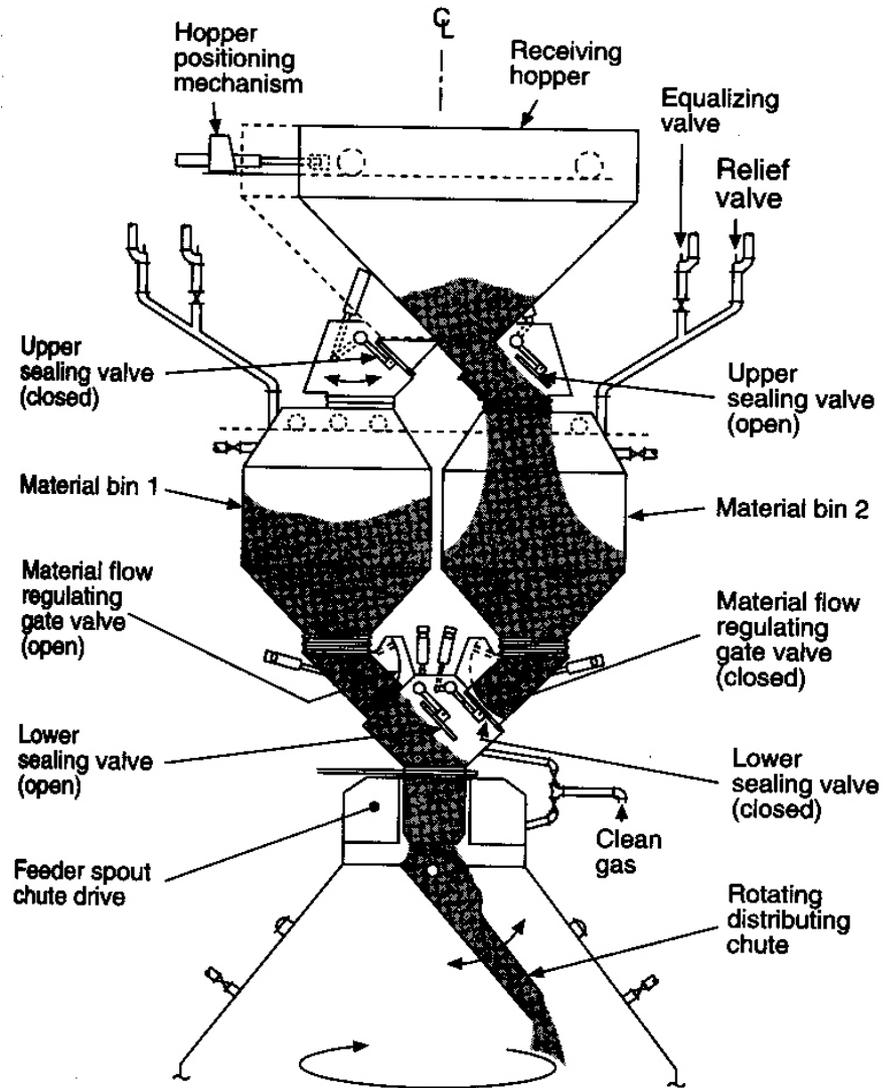
Methods for delivering raw materials to the furnace top.

Topo- Duplo cone



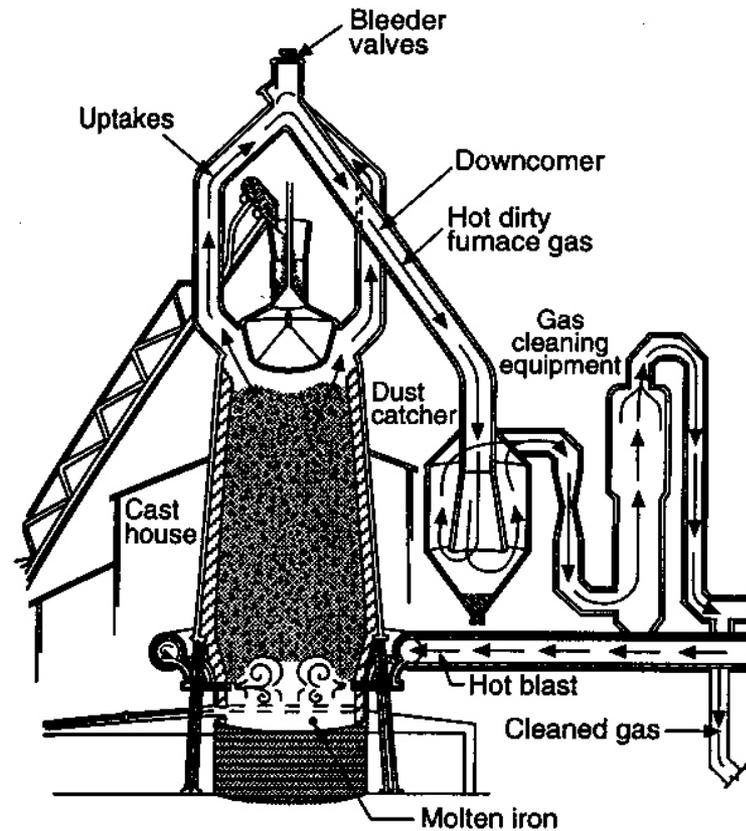
Schematic of a typical two-bell top.

Topo sem cone- calha rotativa-Paul Wurth



Schematic of a bell-less top with pressurized hoppers and a rotating distributing chute.

Sistema de gases



General arrangement of blast furnace gas equip-

Gás de saída do alto forno: 10 a 40 g de partículas finas por Nm^3 , dos quais ~ 35 % pó de coque. Após limpeza, de 6 a 10 mg/Nm^3 .

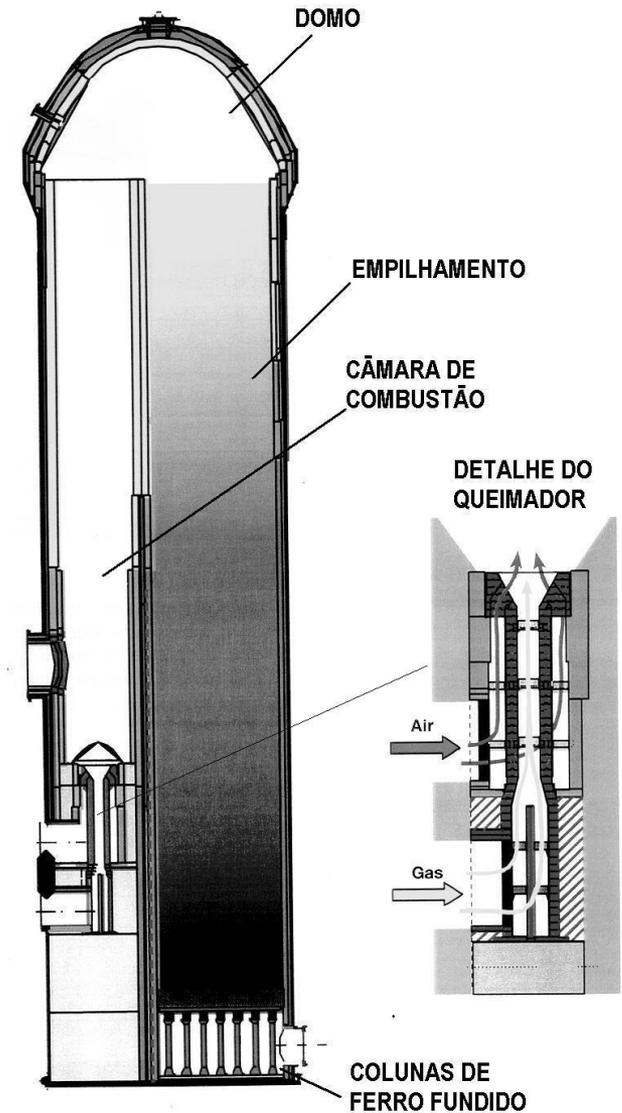
Pré-aquecimento de ar-regeneradores

Têm por função aquecer o ar injetado através das ventaneiras para a combustão do coque. O regenerador recebe o ar na temperatura entre 150 a 200 °C, chamado ar frio, e eleva esta temperatura para a faixa de 1000 a 1250 °C, dependendo de sua capacidade, passando a ser chamado de ar quente.

Combustível utilizado: gás misto, mistura de gases provenientes do próprio alto forno (86 a 94% de GAF) e da coqueria (14 a 6% de GCO).

A câmara de combustão tem grande altura e diâmetro, para evitar o impacto da chama no domo e para alargar mais a chama.

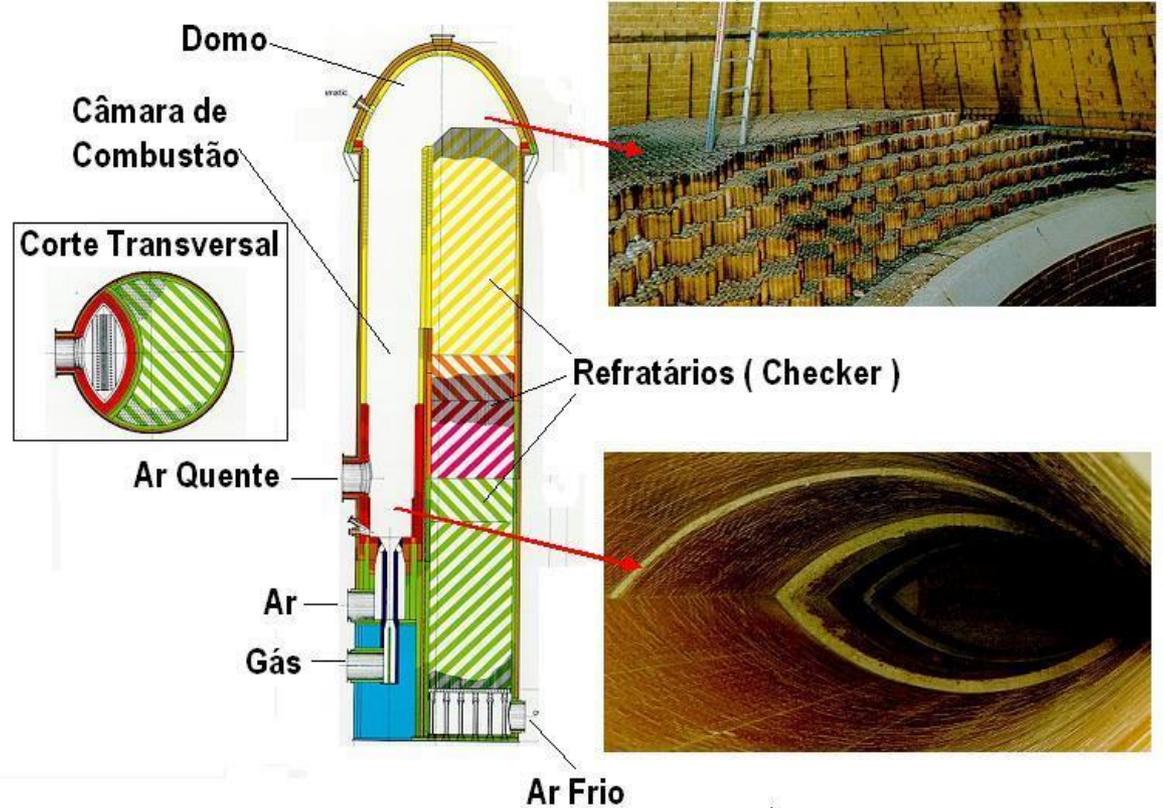
Dimensões típicas: 10,4 m diâmetro, 40 m altura.



Esquema de um regenerador de alto forno

Domo é a parte superior do regenerador e tem por finalidade inverter em 180° o sentido dos gases queimados e distribuir os gases para o empilhamento de tijolos refratários, constituído de tijolos refratários perfurados, dispostos uns sobre os outros e que tem por finalidade absorver o calor na fase de aquecimento, com superfície de aquecimento no empilhamento de um regenerador normalmente excede 40.000 m².

Detalhes construtivos de um regenerador de alto forno



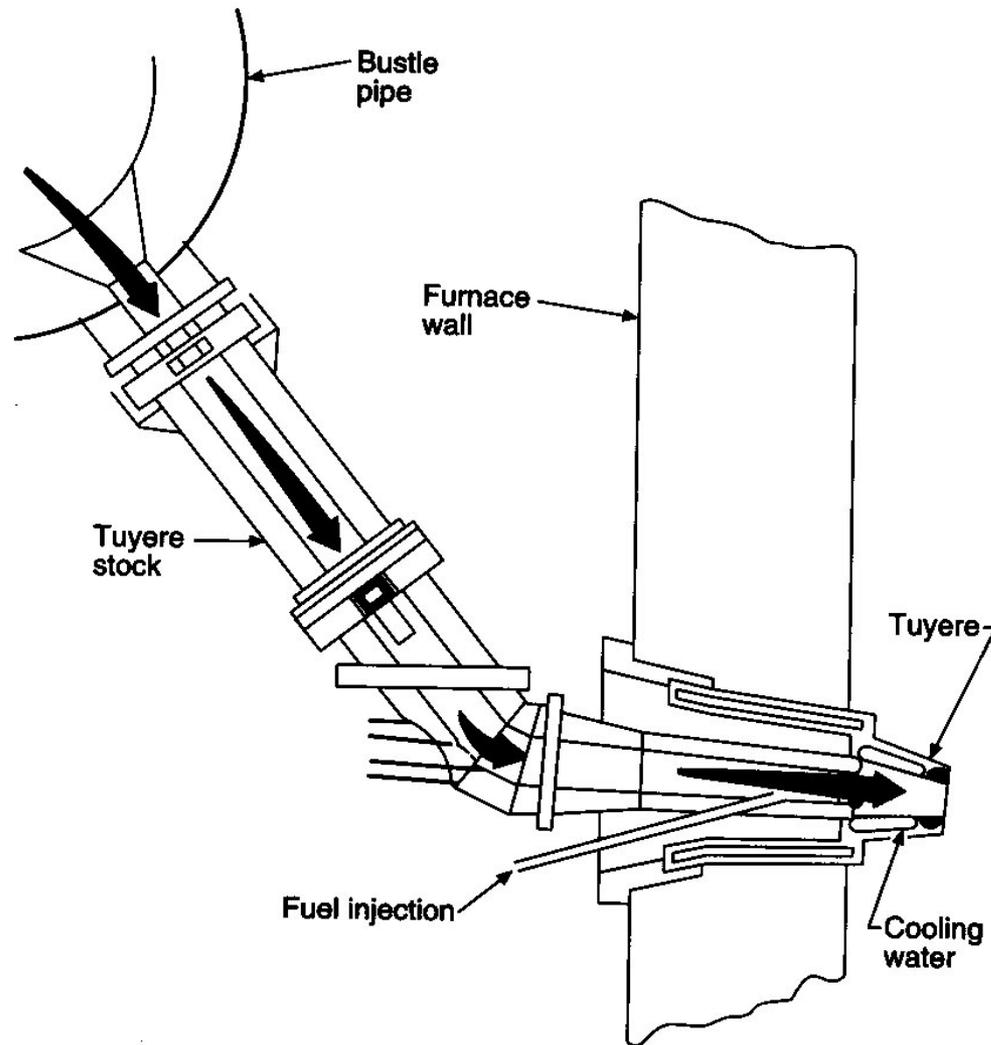
Além da superfície, é necessário que haja espessura de refratário suficiente para armazenar o calor. A relação área/peso varia entre 20 a 24 m²/t e a capacidade de armazenagem térmica/área varia entre 23 a 26,3 kJ/m² (5,5 a 6,3 Kcal/m²).

Os altos fornos possuem conjuntos de 3 ou 4 regeneradores que operam em ciclos.

Regeneradores

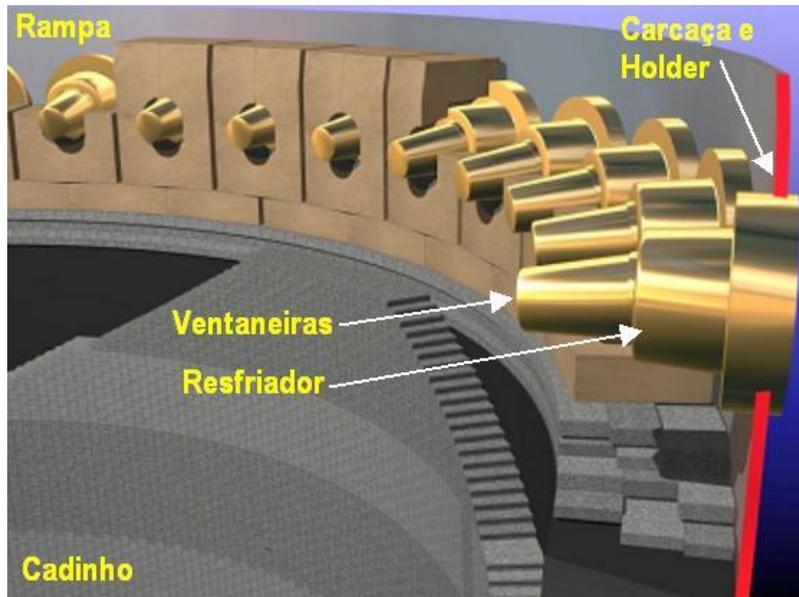


Alimentação das ventaneiras

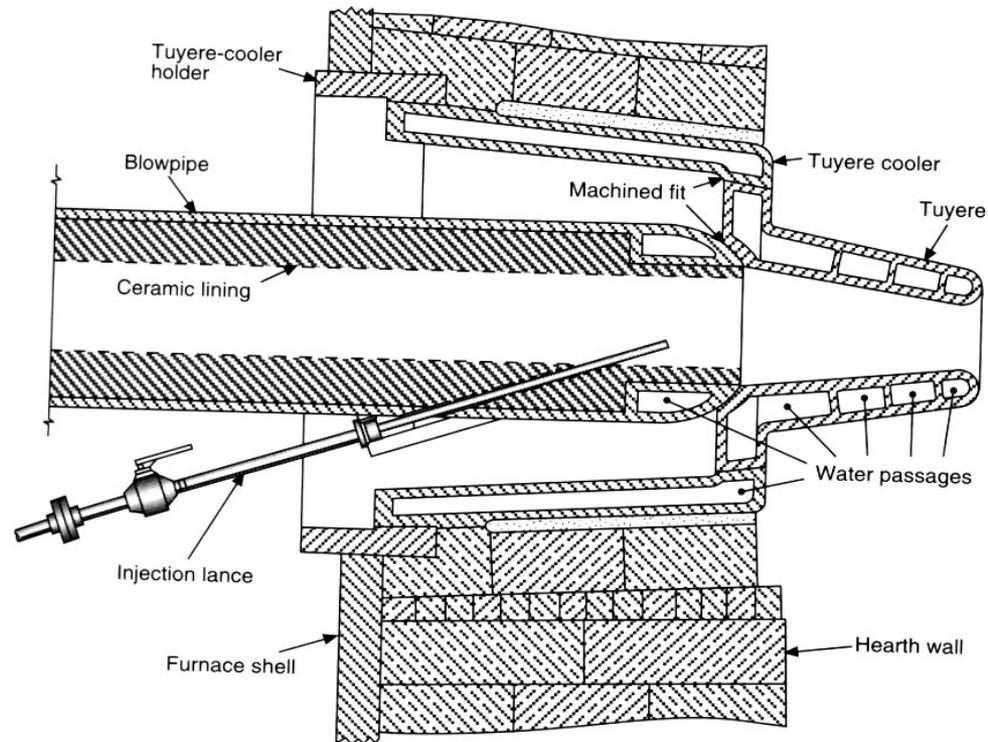


Schematic of a typical tuyere stock arrangement.

Arranjo das ventaneiras no interior do forno e detalhes internos.

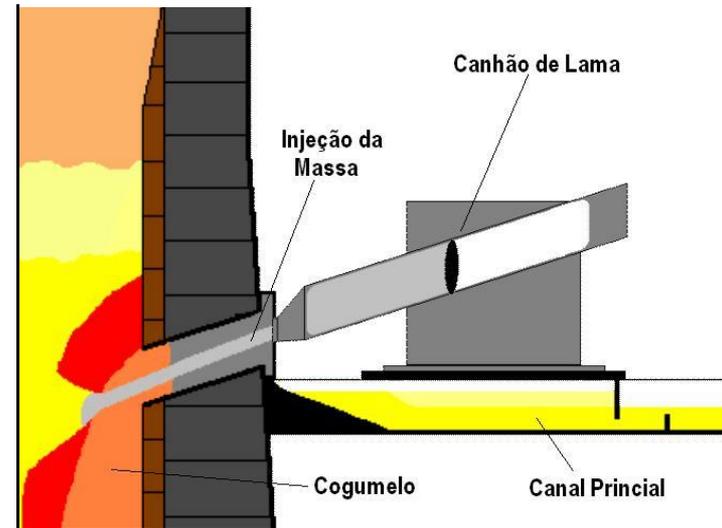
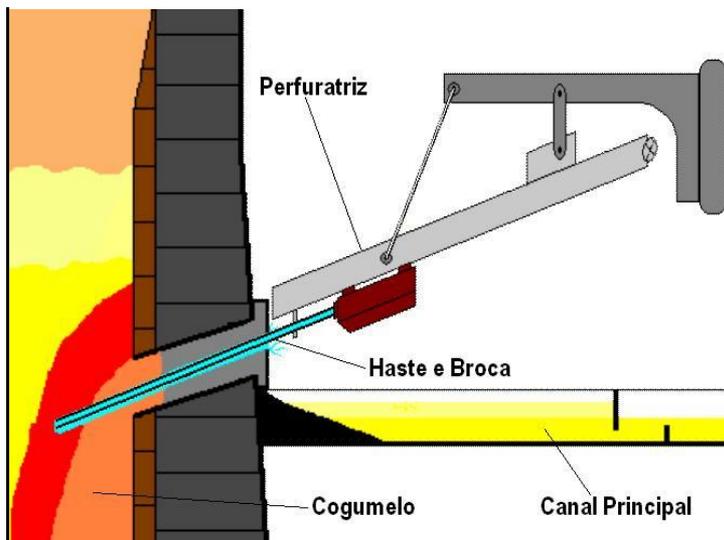


Ventaneira com lança de injeção



Tuyere and blowpipe assembly, with injection lance.

Operação de abertura e fechamento do furo de gusa



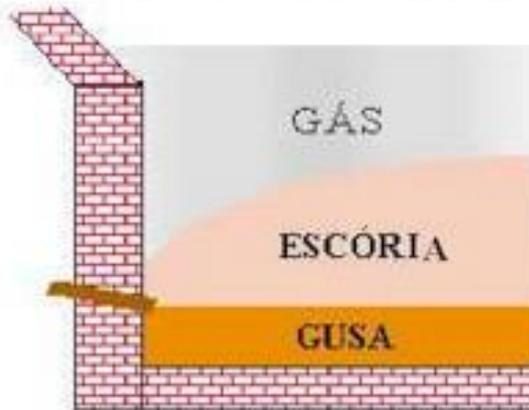
Sequência de eventos durante uma corrida do alto forno

Início de Corrida



NO INÍCIO DA CORRIDA O NÍVEL DO GUSA NORMALMENTE ESTÁ ACIMA DO NÍVEL DO FURO. CONSEQUENTEMENTE, O GUSA GERALMENTE É O PRIMEIRO MATERIAL A SAIR.

Início de Escória



QUANDO O NÍVEL DE GUSA ABAIXA ATÉ O NÍVEL DO FURO INICIA-SE A SAÍDA DA ESCÓRIA. DEVIDO A SUA ALTA VISCOSIDADE A SUPERFÍCIE DA ESCÓRIA TENDE A ABAIXAR NA REGIÃO ACIMA DO FURO

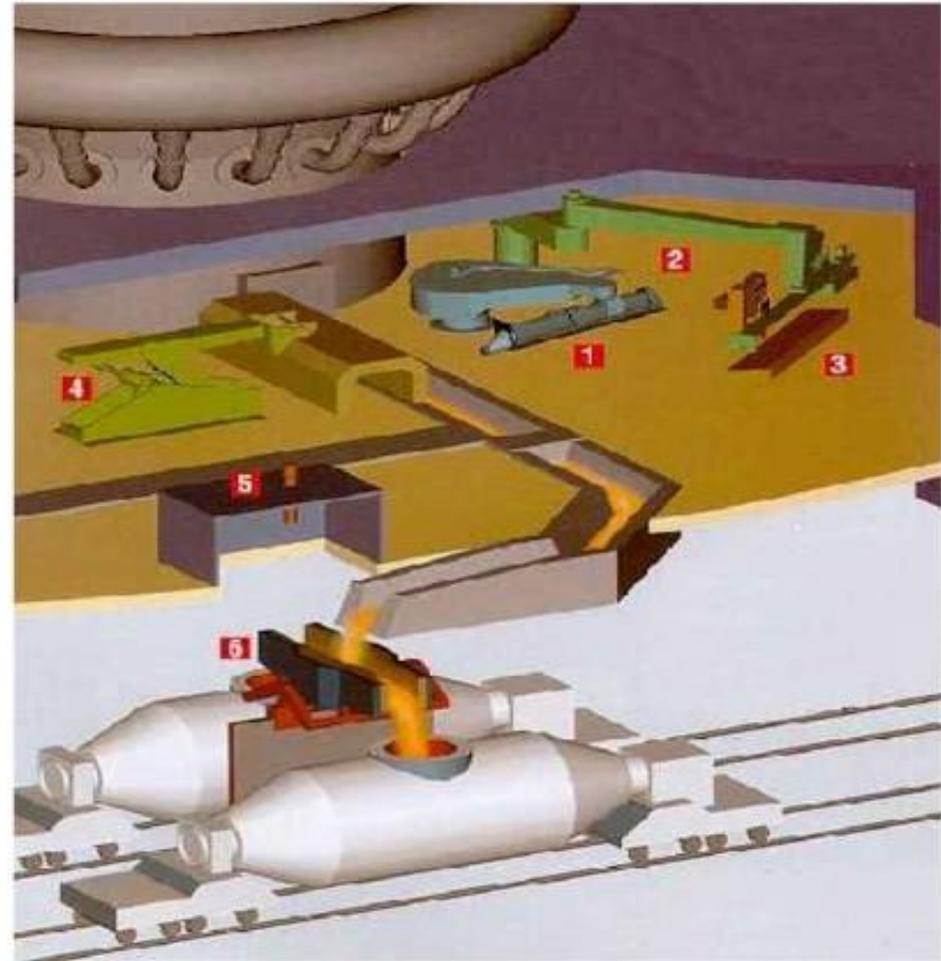
Fim de Corrida



QUANDO A SUPERFÍCIE DA ESCÓRIA ATINGE O FURO O GÁS COMEÇA A SAIR. É O FINAL DA CORRIDA. NESTE INSTANTE, DEVIDO À INCLINAÇÃO DA SUPERFÍCIE, PARTE AINDA FICA DENTRO DO FORNO

Drenagem do gusa para os carros torpedo

O canhão de lama (1) e a perfuratriz (2) são os equipamentos utilizados para fechar e abrir o furo de gusa. O gusa e a escória, após deixarem o furo na forma de um jato de material líquido, são separados por diferença de densidade no canal principal (3). A escória é direcionada para um sistema de granulação através do canal de escória. O gusa após passar também pelo canal secundário (4), é direcionado para carros torpedos posicionados no piso inferior da casa de corrida, por meio da bica basculante (6), cuja função é permitir a troca dos carros torpedos, direcionando o fluxo de gusa para o carro ao lado. O enchimento do carro torpedo pode ser monitorado automaticamente através de um medidor de nível (5).





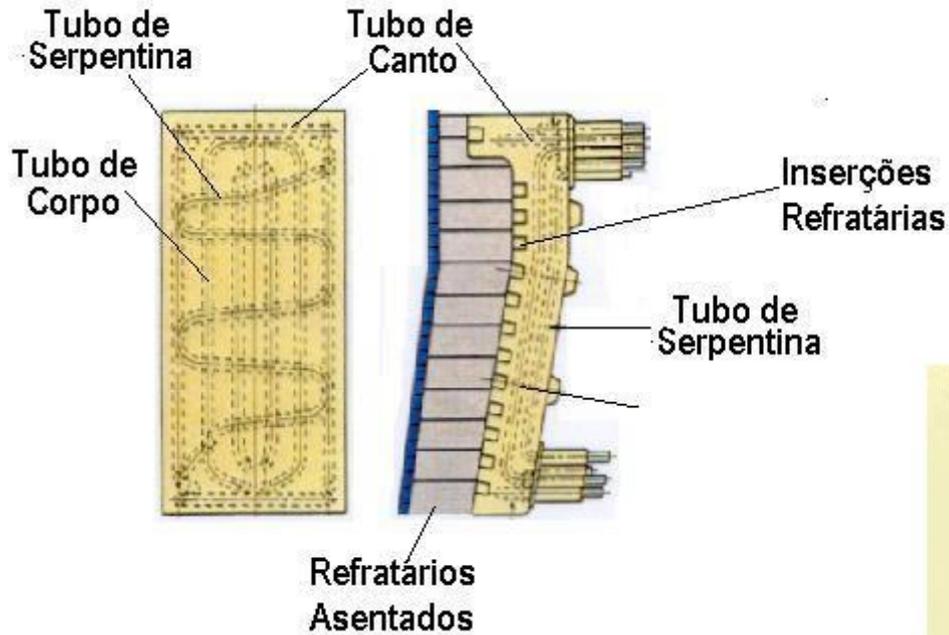


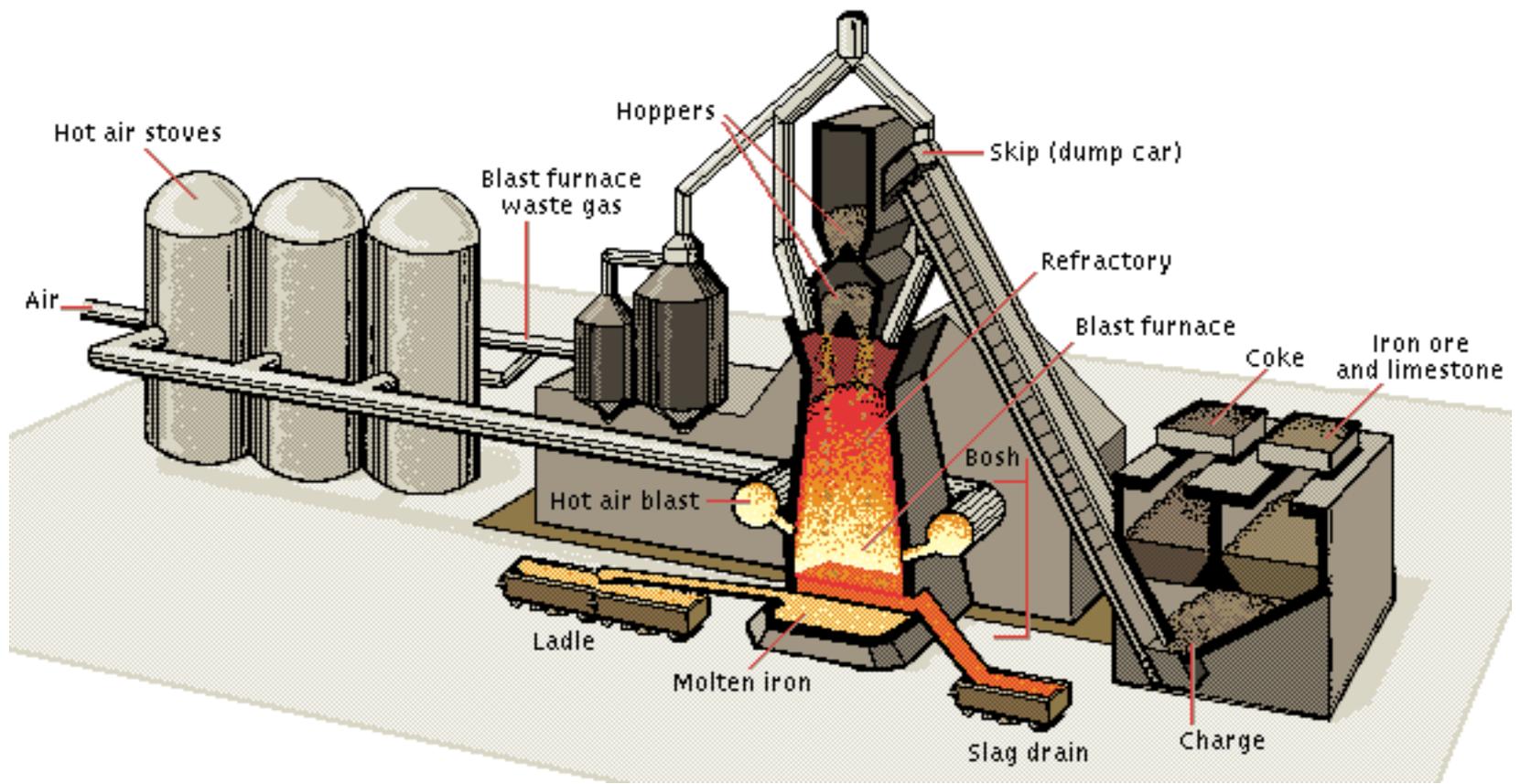
Sistemas de refrigeração por Placas e por “Staves”





Constituição típica de um stove



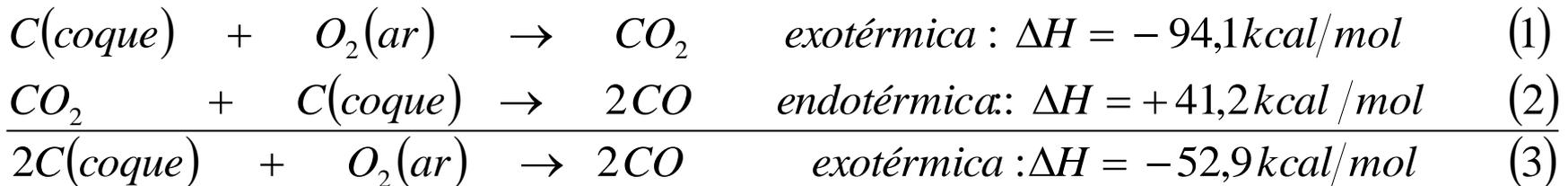
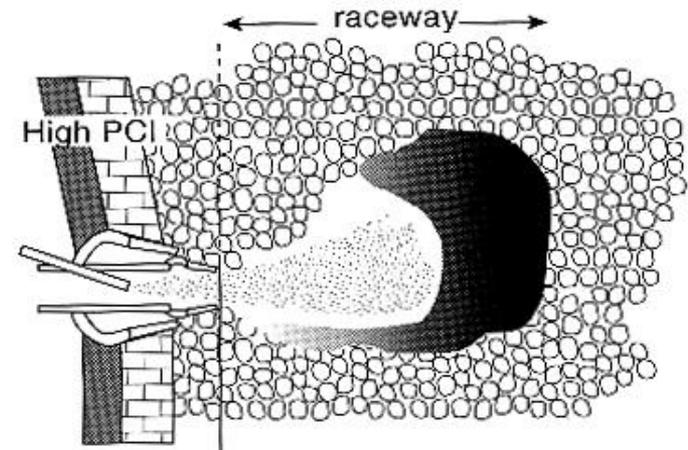


Zonas de Reações

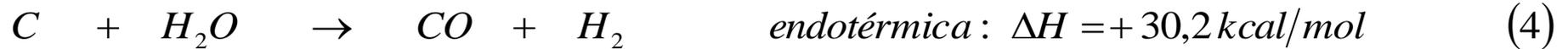
- O alto-forno é um reator químico em contra corrente. A transferência de calor do gases ascendentes para os sólidos que descem é acompanhada da transferência de oxigênio destes sólidos para os gases. Centenas de reações químicas ocorrem no processo de alto-forno, porém algumas são fundamentais para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

Zona de Combustão

- ar aquecido é injetado nas ventaneiras a velocidades de 180 a 280 m/s, formando uma cavidade, que é a “zona de combustão”
- O tamanho da “zona de combustão” varia na faixa de 1,5 a 2,5 m além da ponta das ventaneiras.



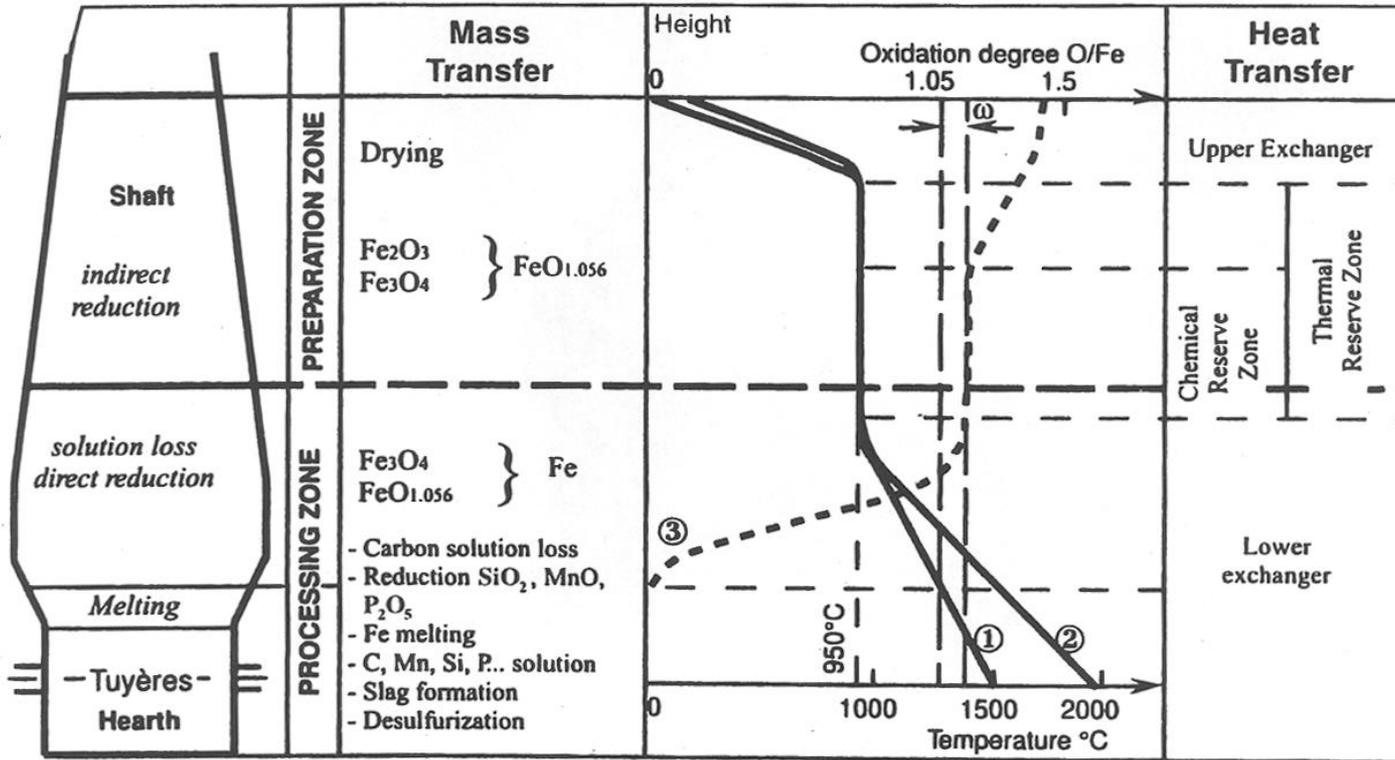
Vapor d'água



- efeito refrigerante sobre a temperatura de chama proporcionado pela umidade do ar soprado. Costuma-se injetar certa quantidade de vapor junto com o ar de modo a manter constante a umidade do ar e exercer melhor controle sobre a temperatura de chama.

Reações de Redução

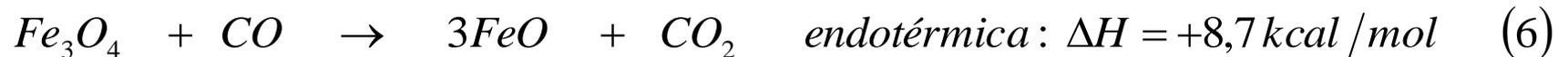
- O regime de trocas térmicas e as condições termodinâmicas e cinéticas impostas pela reação de Boudouard permitem a divisão do forno em duas zonas distintas e pode-se tratá-las como reatores diferentes, a saber:
- Zona de Preparação: onde o carbono do coque praticamente não reage, constituindo um material inerte
- Zona de Elaboração: onde o carbono do coque reage com o CO_2 restituindo o poder redutor do gás através da reação de Boudouard



① - Solid temperature ② - Gas temperature ③ - Oxidation degree of iron

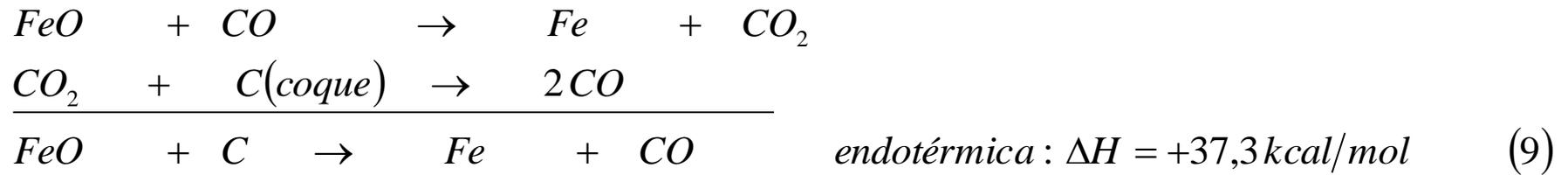
Principles of blast furnace process.

- A Zona de Preparação, na parte superior do forno, pode ser considerada como um reator em contra corrente que tem a finalidade de secagem, pré-aquecimento e pré-redução da carga pelos gases ascendentes.



As equações (5), (6) e (7) são chamadas reações de redução indireta e o produto é o CO₂. Globalmente a redução indireta é levemente exotérmica.

- A Zona de Elaboração é um complexo reator em contracorrente
- Os gases provenientes da combustão do coque deixam a zona de combustão em temperaturas elevadas e trocam calor com o gusa e a escória na zona de gotejamento.
- Prosseguindo o movimento ascendente, os gases penetram na zona de amolecimento e fusão onde há um forte gradiente térmico pois aí ocorre a fusão da carga ferrífera, boa parte da redução final do FeO a Fe e gaseificação do coque pela reação de Boudouard.
- Na estreita faixa da zona granular que pertence a zona de elaboração, logo acima da zona coesiva, ocorre grande parte das reações de redução da carga ferrífera e da gaseificação do coque, sendo portanto uma região de alta endotermicidade, com elevado gradiente de temperatura.



acima da temperatura crítica, em torno de 950 °C para o coque, na entrada da zona de elaboração, passa a ocorrer a gaseificação do coque.

CO₂ produzido pela redução indireta é rapidamente reduzido pelo carbono de acordo com a conhecida reação de Boudouard ou “solution-loss”.

A equação (9) é chamada reação de redução direta e é altamente endotérmica em contraste com a redução indireta e, além disto, consome e degrada o coque

Avaliação da Performance do Alto-Forno

- **1- Vida Útil Elevada:**
- **2 - Alta Produtividade**
- **3 - Baixo Consumo de Combustível:**
- **4 – Qualidade Adequada:**

Vida Útil Elevada

- altíssimo investimento na construção ou reforma de um alto-forno
- grande esforço para prolongar a vida útil média, ou campanha
- atualmente na faixa de 12 a 18 anos

produtividade

- critério de avaliação: razão entre produção média diária e volume interno do alto-forno (toneladas/dia/m³)
- produtividade média dos altos-fornos brasileiros de 1,80 a 2,80 t/dia/m³

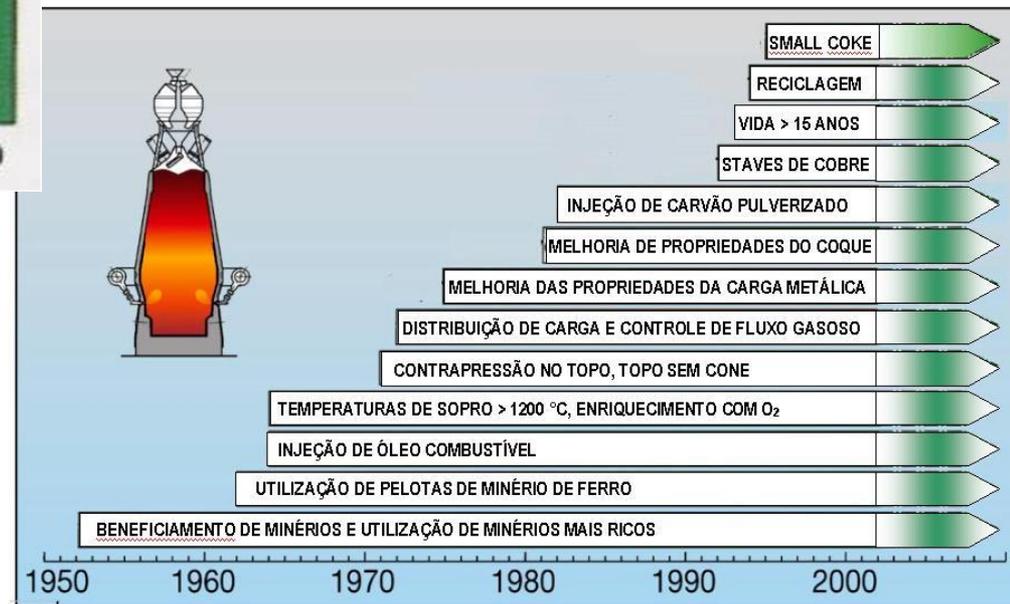
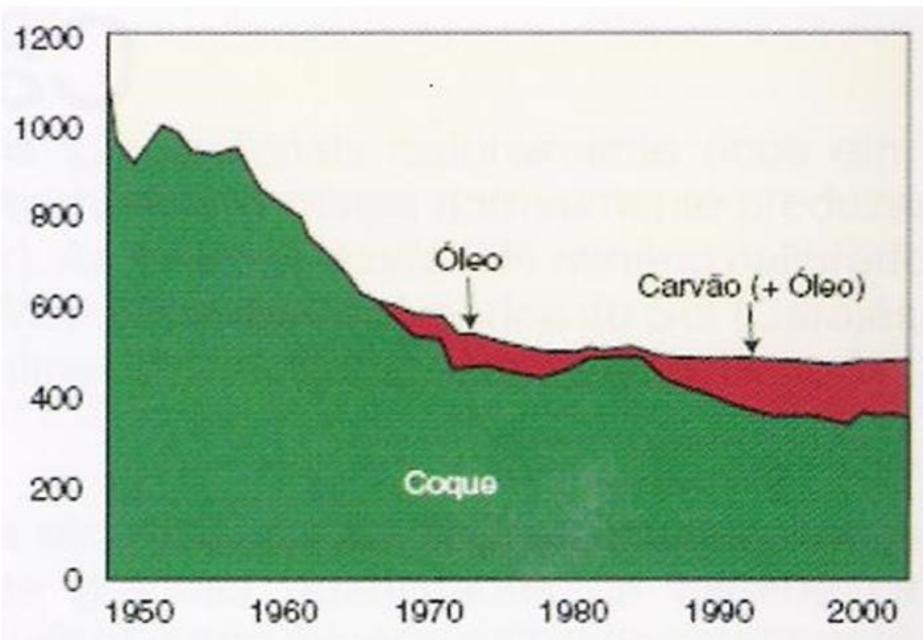
depende de

- idade do forno
- particularidades de cada usina
- condições do mercado de aço
- ocorrência de problemas operacionais
- disponibilidade de oxigênio para enriquecimento do ar soprado
- melhoria da permeabilidade da carga
- redução do “fuel rate

consumo de combustível

- medido em kilogramas combustível consumido para a produção de uma tonelada de ferro gusa.
- elevado custo de combustíveis,
- carvão pulverizado injetado diretamente é de custo mais baixo
- importante atingir altas taxas de injeção, mantendo a estabilidade operacional

Desenvolvimentos na tecnologia de alto-forno nas últimas décadas



Qualidade Adequada

- A qualidade do gusa deve estar dentro dos padrões exigidos pelo processo seguinte (Aciaria)
- Isto implica no atendimento de requisitos de composição química e de temperatura cada vez mais restritivos
- A escória também deve ter uma composição adequada à sua utilização mais freqüente, que é a indústria cimenteira

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

FERRO-GUSA (% em peso)								
Ti	Si	S	Mn	P	C	Fe	Outros	
0,03	0,38	0,026	0,69	0,091	4,82	93,86	0,1	
ESCÓRIA DE ALTO-FORNO (% em peso)								
SiO₂	Al₂O₃	CaO	MgO	S	MnO	TiO₂	FeO	Outros
34,65	11,59	42,8	6,81	1,22	0,83	0,53	0,35	1,22

operação do alto-forno

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

- procedimentos operacionais básicos (carregamento, sopro de ar quente, operação dos regeneradores, etc.) executados sob controle automático,
- Entre temperaturas, pressões, fluxos, valores calculados e outros, mais de 3000 variáveis são tipicamente monitoradas em alto-forno moderno.
- Normalmente existe Sistema Supervisório ou equivalente que permite o acompanhamento destas variáveis ou grupos de variáveis tanto na forma gráfica como na forma de índices operacionais.

principais variáveis operacionais

Taxa de Injeção Auxiliar (Carvão Pulverizado, Gás Natural, etc.):

- uma das principais variáveis de controle térmico e deve ser usada preferencialmente devido ao curto tempo de resposta.
- é limitada na faixa inferior pela mínima taxa de injeção e na faixa superior pela mínima temperatura de chama aceitável.

- **Temperatura de Sopros:** curto tempo de resposta; para minimizar o “coke rate”, procura-se trabalhar com temperaturas mais elevadas,
- **Umidade do Ar:** excelente variável de controle térmico e é também útil no controle da pressão de base; na operação com injeções auxiliares, procura-se trabalhar com umidade mais baixa para não diminuir ainda mais a temperatura de chama

- **Vazão de Oxigênio:** A sua disponibilidade está ligada ao controle da temperatura de chama, que deve ser mantida na faixa de 2000 a 2400 °C.
- **Pressão de Topo:** A sua disponibilidade está ligada ao controle da velocidade de gás na cuba, que deve ser mantida na faixa de 2,6 a 3,2 m/s.
- **Coke Rate:** A disponibilidade do “coke rate” para atuação térmica é limitada pelo tempo de resposta muito longo (em torno de 6 horas para alcançar as regiões inferiores do forno).
- **Vazão de Ar:** Quando o forno estiver termicamente deficiente, mau drenado ou com pressão alta, pequenas reduções de vazão são sempre efetivas e não prejudicam sensivelmente a produção do forno.