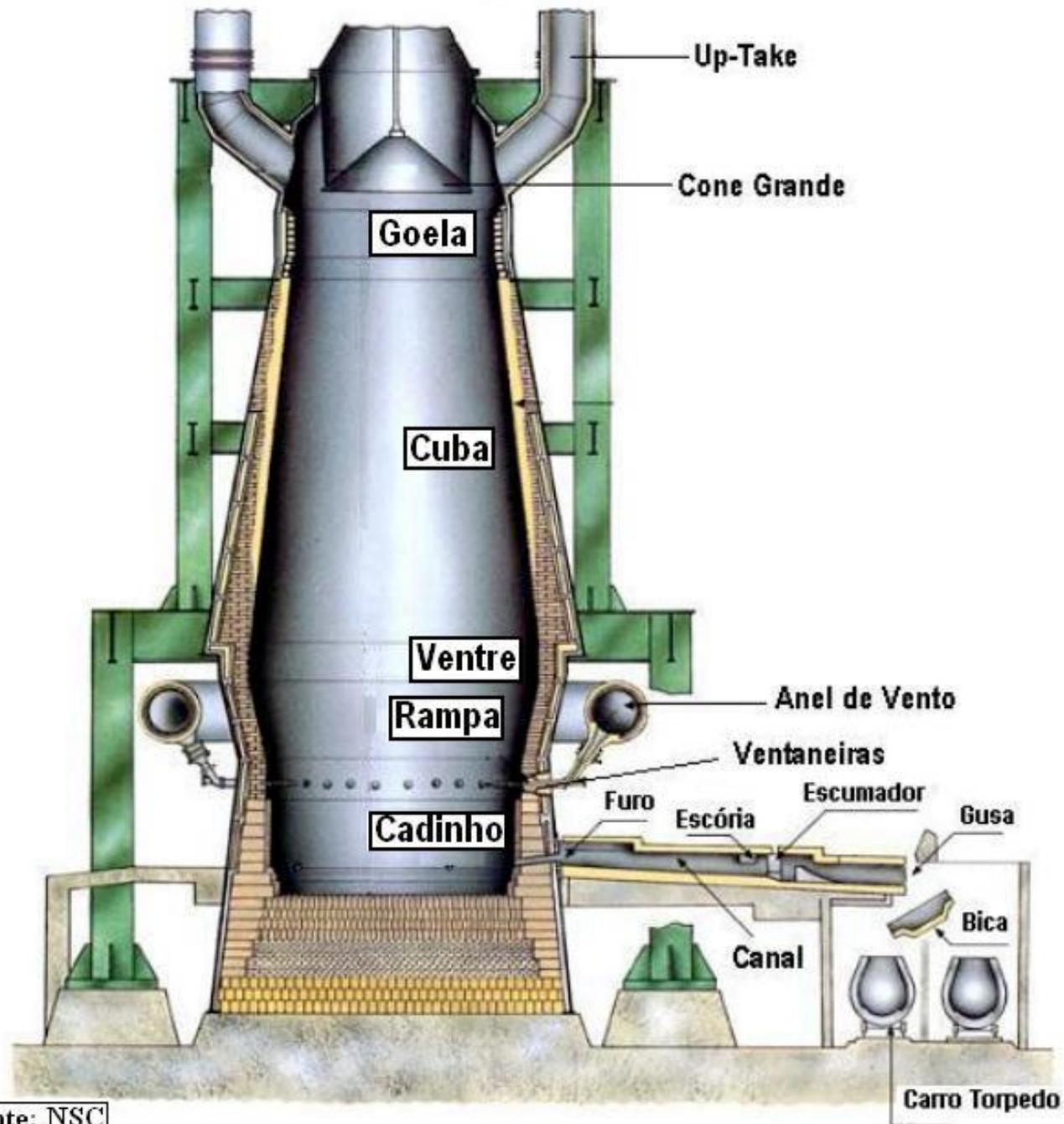


Alto Forno

Parte 2

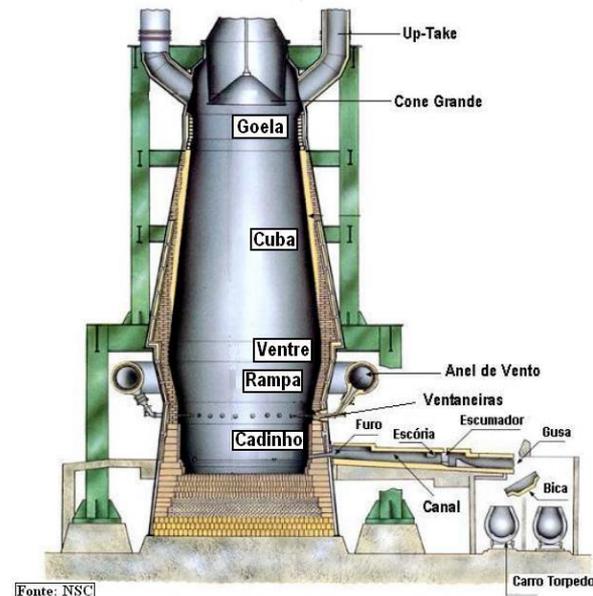
Zonas do AF

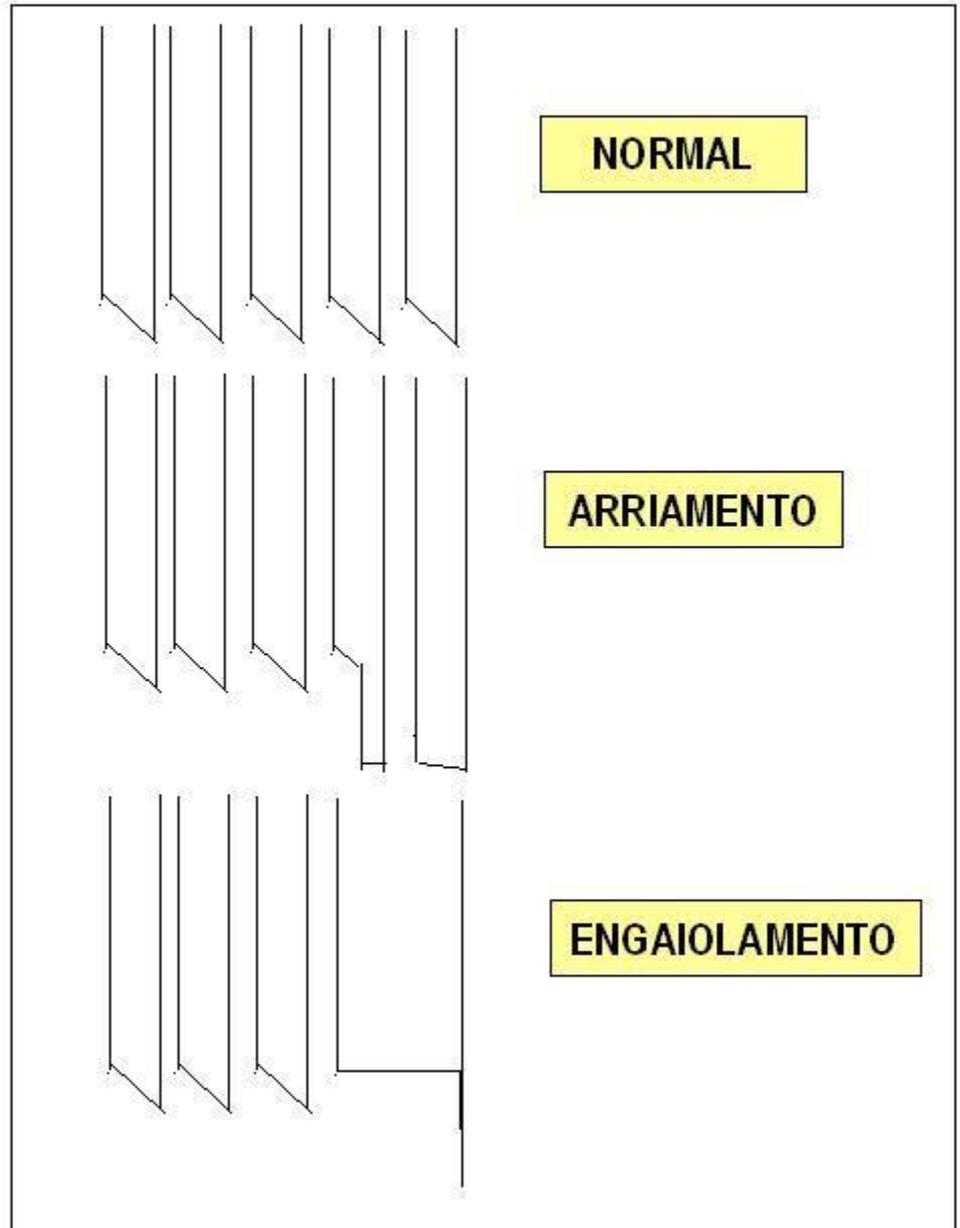
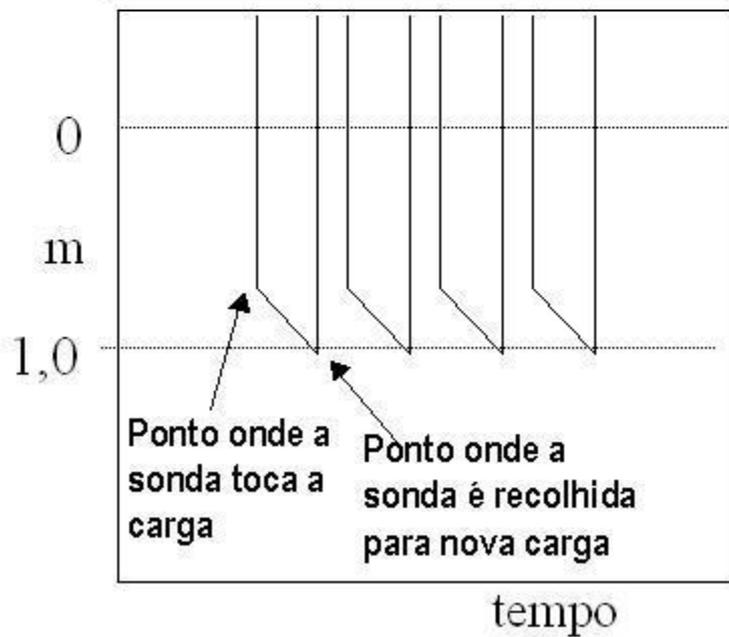
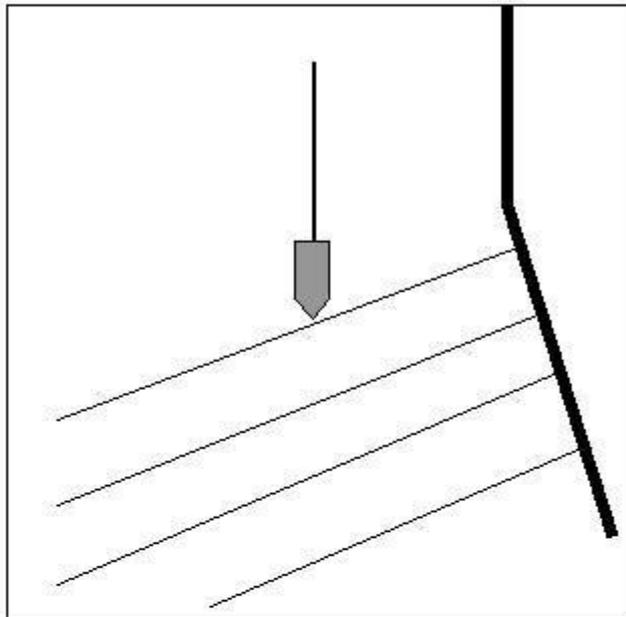


Fonte: NSC

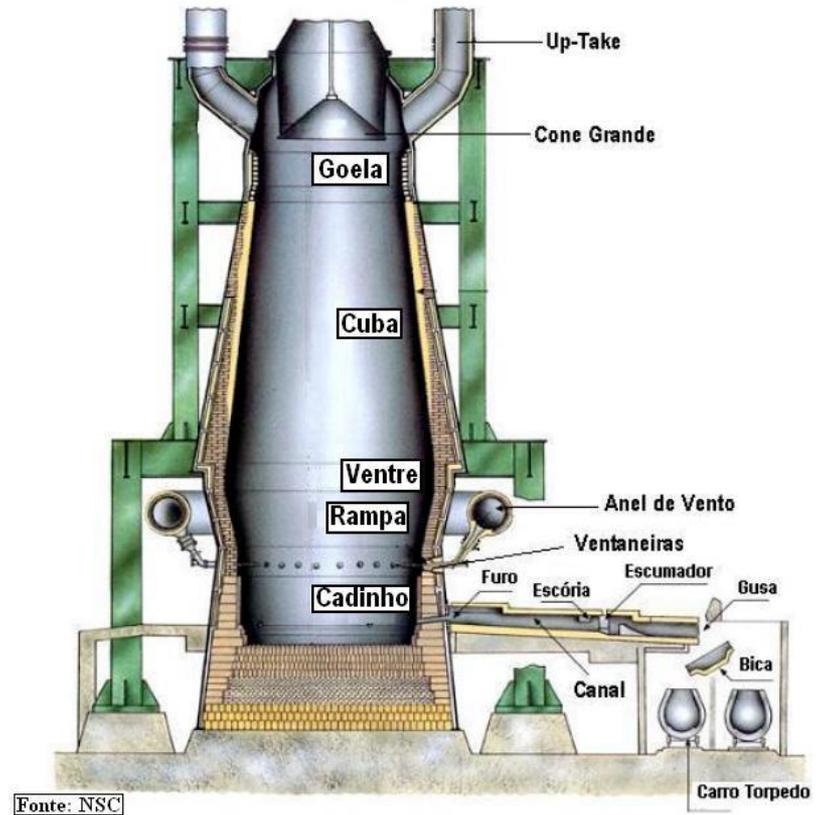
- Goela:** Parte cilíndrica superior do onde é feito o carregamento do alto-forno. Contém equipamentos de distribuição da carga, e sensores que medem o nível da carga, o perfil da carga, a temperatura e a composição dos gases produzidos, etc.

- O nível normal da carga fica em torno de 1,0 m abaixo de um referencial denominado “stockline”. Sempre que o nível da carga, no ponto de medição, desce e atinge este valor pré-definido uma nova batelada de carga é carregada no interior do forno.





- **Cuba:** Compreende a maior parte volumétrica do alto-forno, sendo de formato tronco-cônico, com o maior diâmetro na parte inferior. Este formato se deve em parte à necessidade de compensar o aumento de volume da carga devido a elevação da temperatura e em parte para possibilitar uma descida de carga suave, sem a agregação de cascões de material semi-fundido nas paredes.

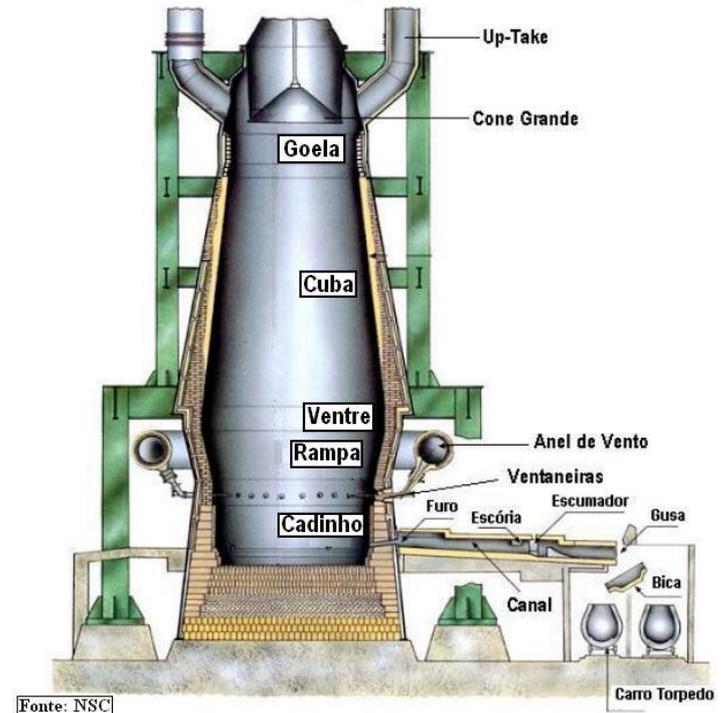


Ventre

- Parte cilíndrica de união entre a cuba e a rampa.
- É das partes mais solicitadas do forno devido à intensa oscilação de temperatura em função da variação de posição da zona coesiva.

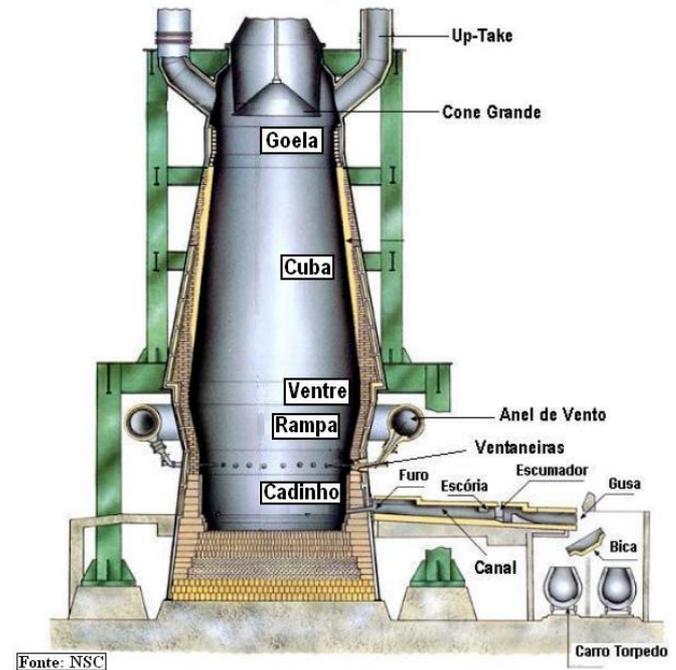
Rampa

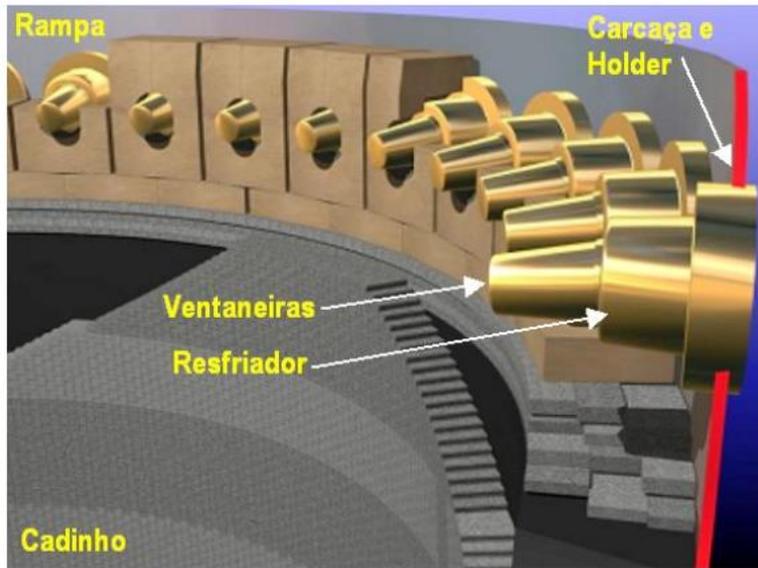
- Região de formato tronco-cônico, com o maior diâmetro na parte superior, sendo que este formato ajuda a sustentação da carga e o gotejamento de gusa e escória para o cadinho através dos interstícios das partículas de coque



Cadinho

- Região cilíndrica que compõe a parte inferior do alto-forno e que tem como uma de suas finalidades armazenar por tempo controlado o gusa e a escória produzidos. Na parte inferior do cadinho ficam as regiões denominadas furos de gusa, onde são feitas perfurações periódicas para a drenagem do gusa e da escória. Na parte superior do cadinho ficam posicionadas as ventaneiras, onde é feita a injeção do ar soprado e de combustíveis auxiliares.





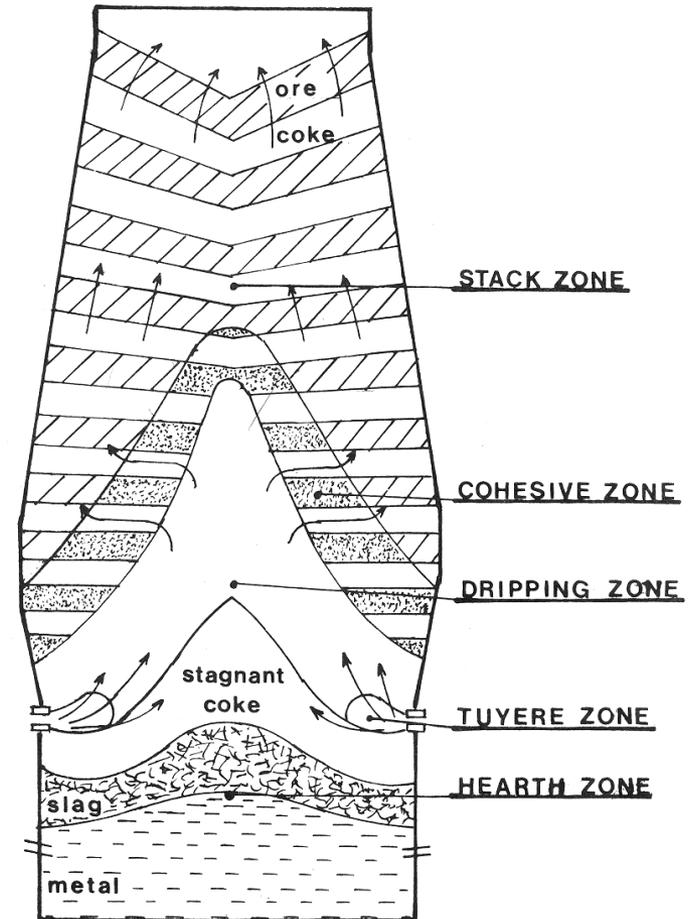
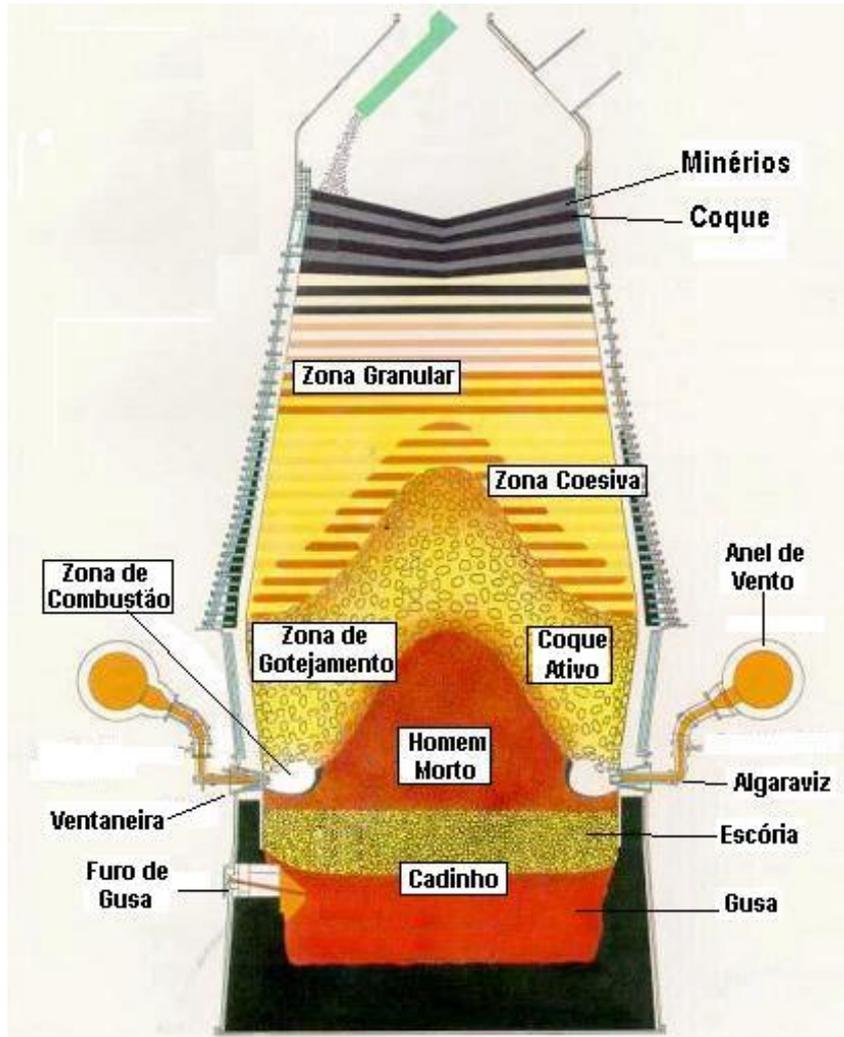
Saint Gobain

(a)



(b)

Zonas Internas do AF



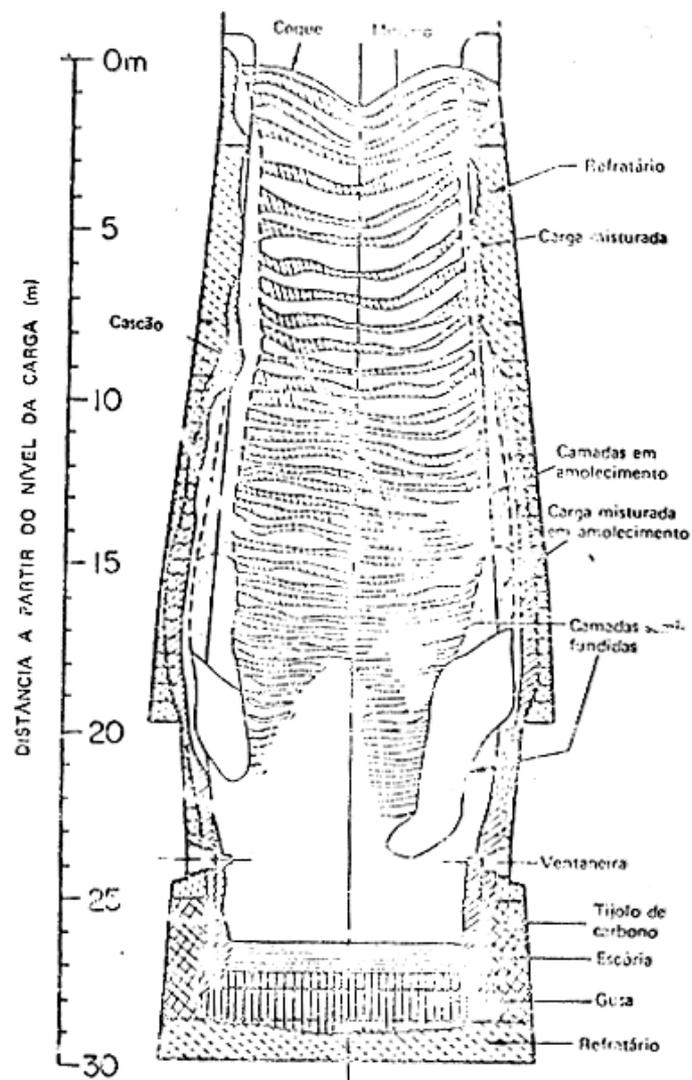
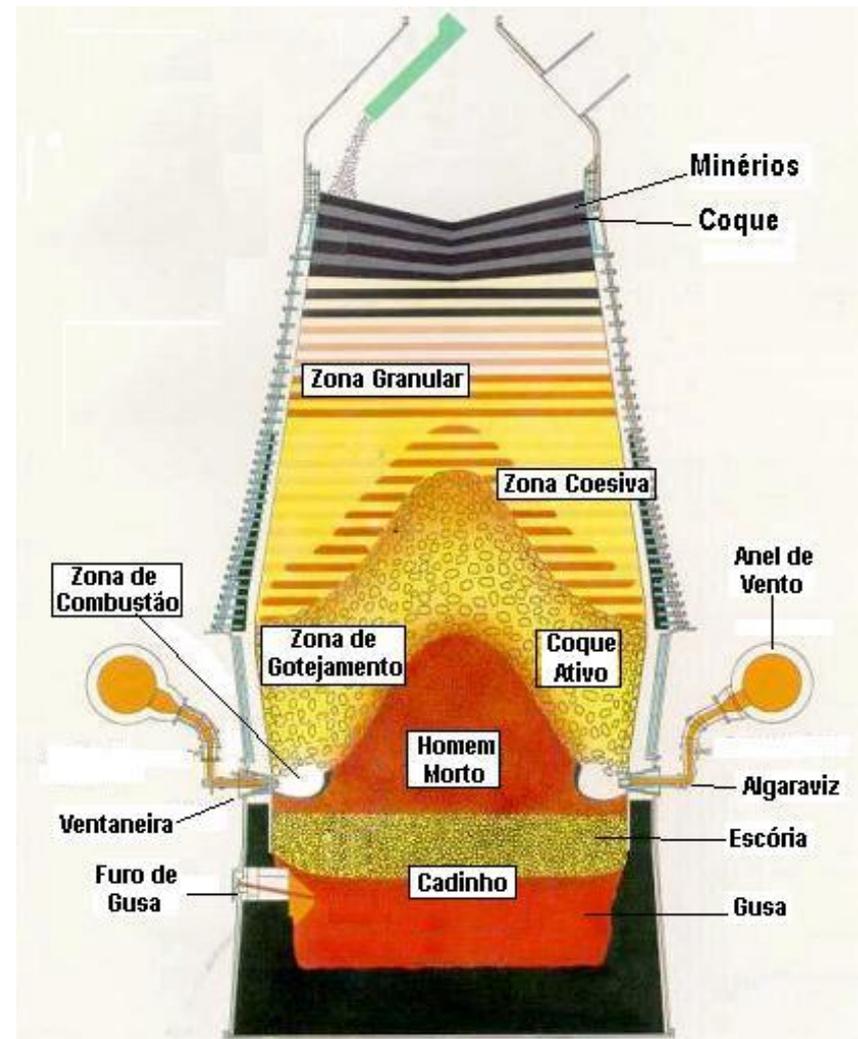


FIGURA 1.2 - ESTADO DAS CAMADAS DE CARGA NO ALTO FORNO Nº 4 DE KUKIOKA, SEGUNDO KANBARA ET ALII [2].

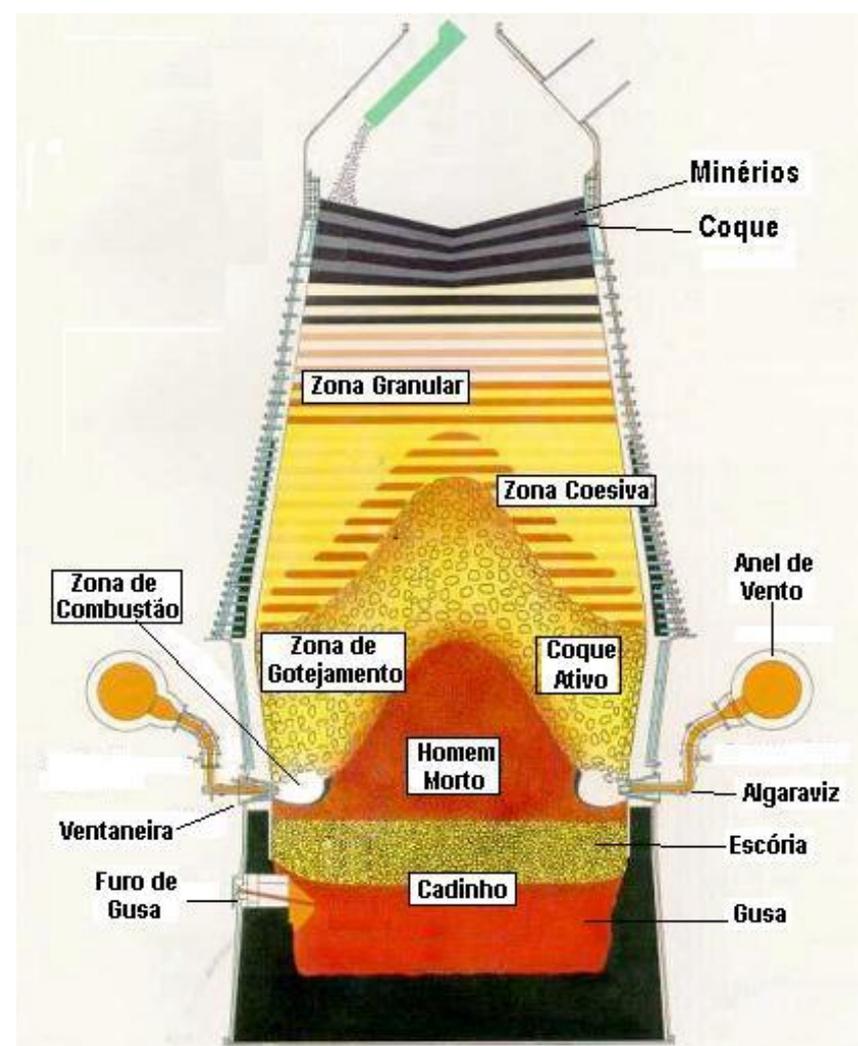
•1 - Zona Granular:

Nesta zona o minério e o coque mantêm a sua configuração em camadas tais como foram carregados, ou seja, camadas alternadas de coque e de minérios.

•Nesta região existem apenas duas fases (gases e sólidos), portanto a redução dos óxidos de ferro ocorre apenas no estado sólido.



- **2 - Zona Coesiva:** É constituída de camadas de coque e camadas coesivas alternadas.
- camadas coesivas são formadas de massas semifundidas de partículas de minério de ferro, praticamente impermeáveis ao fluxo gasoso, que passa preferencialmente através das camadas de coque.



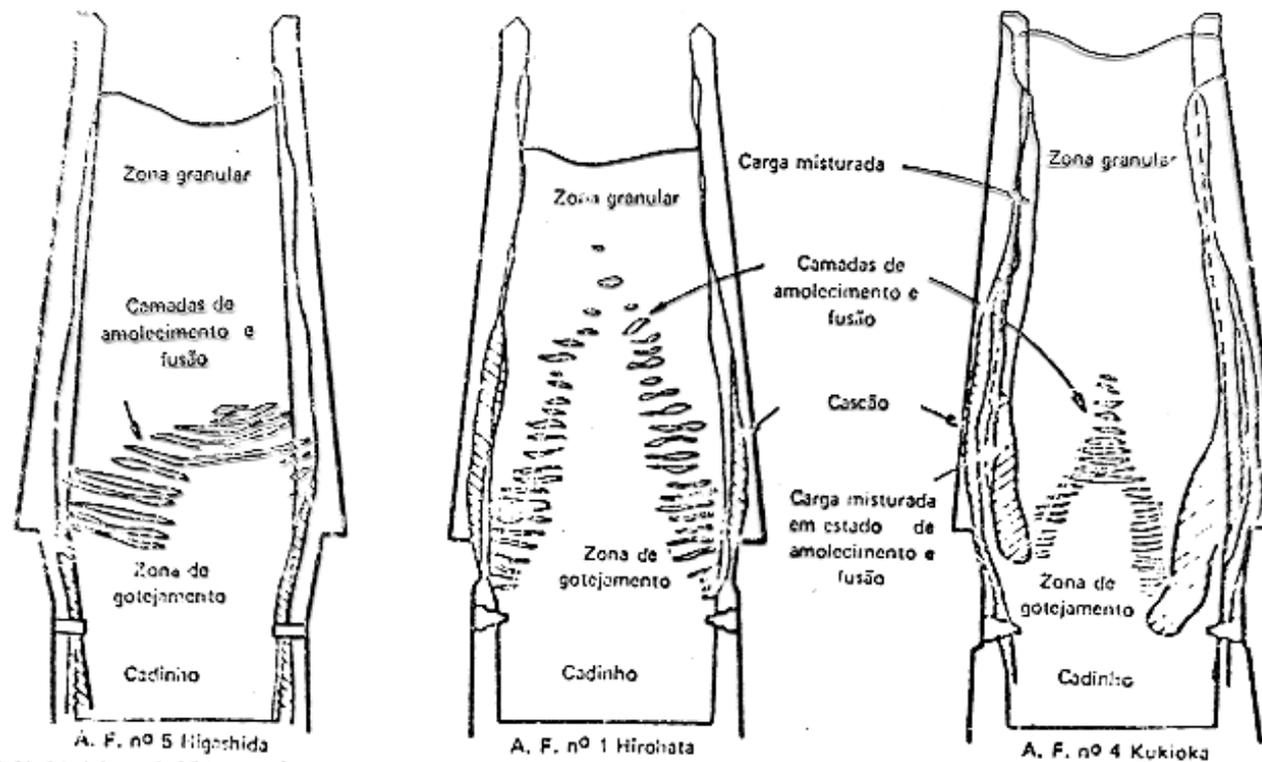
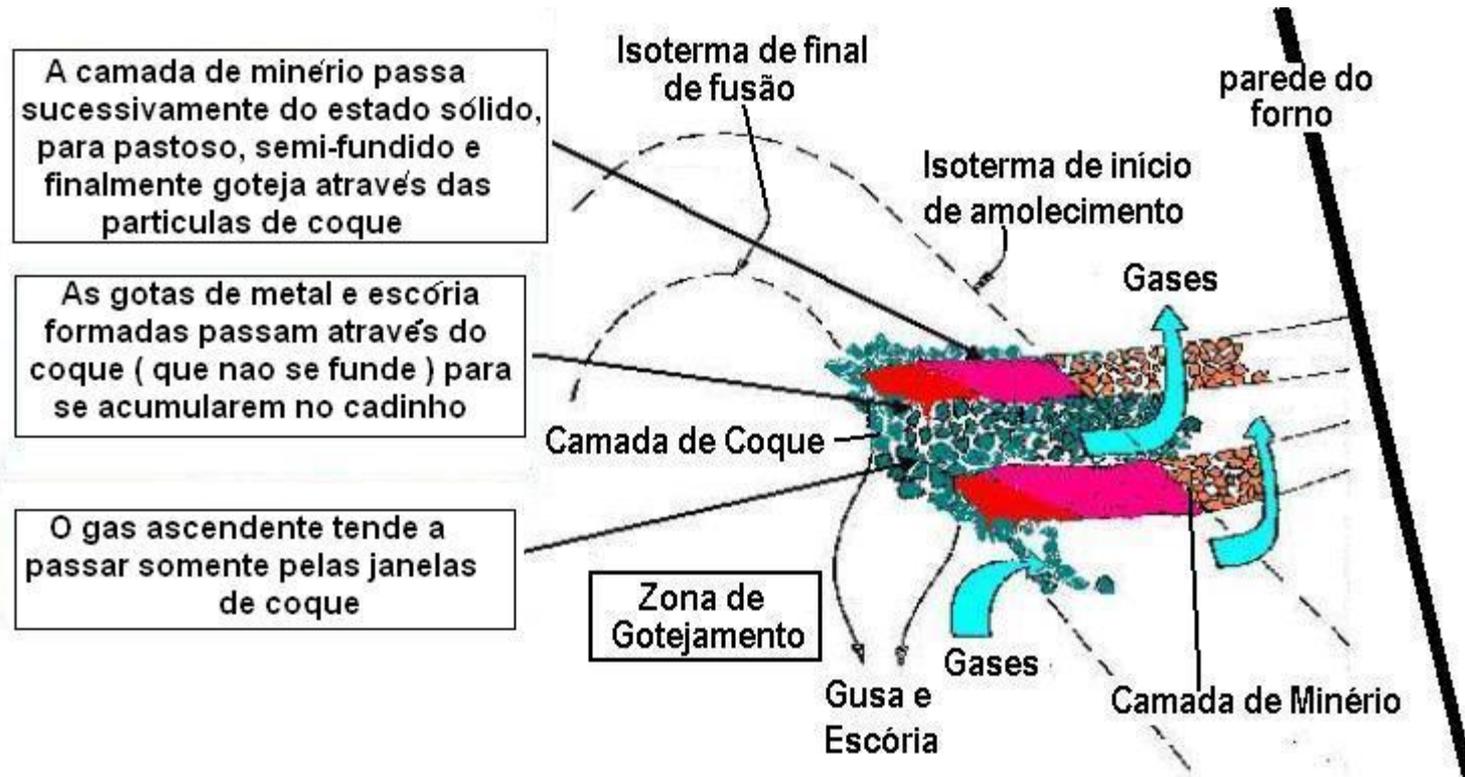


FIGURA 1.3 — DISTRIBUIÇÃO DAS CAMADAS DE AMOLECIMENTO E FUSÃO NOS ALTOS-FORNOS DISSECADOS, SEGUNDO KANBARA ET ALII(3).

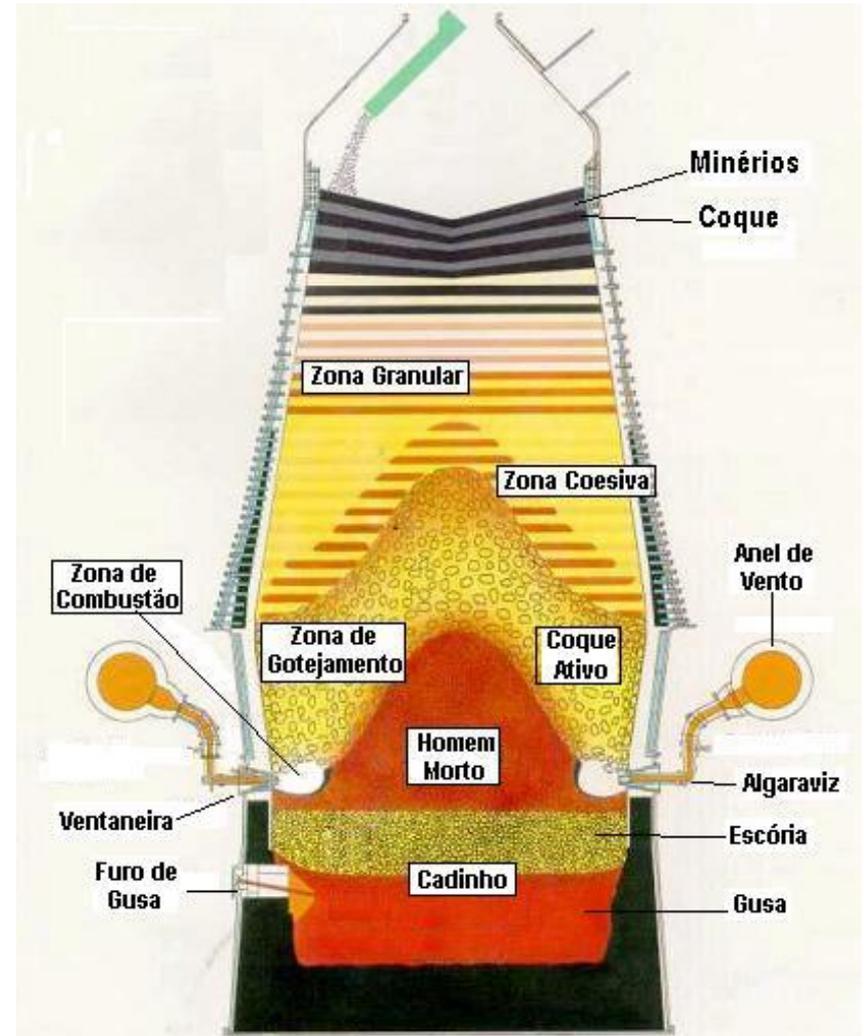
Zona coesiva

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

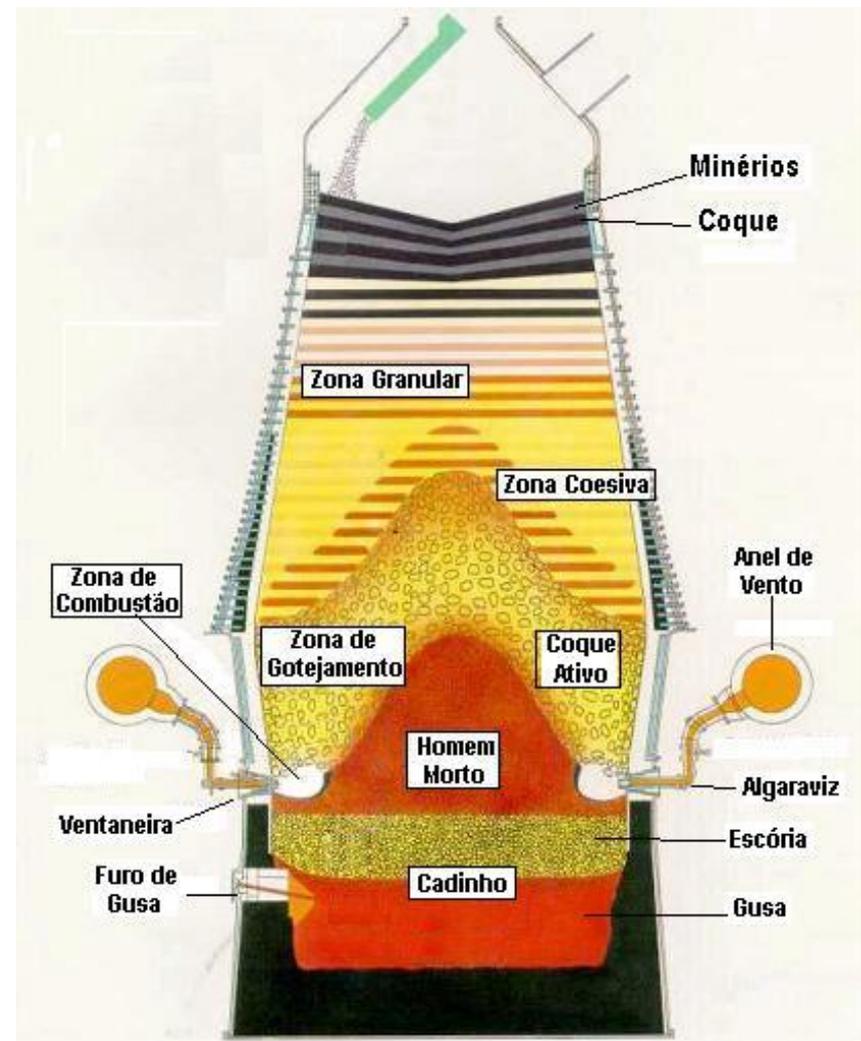


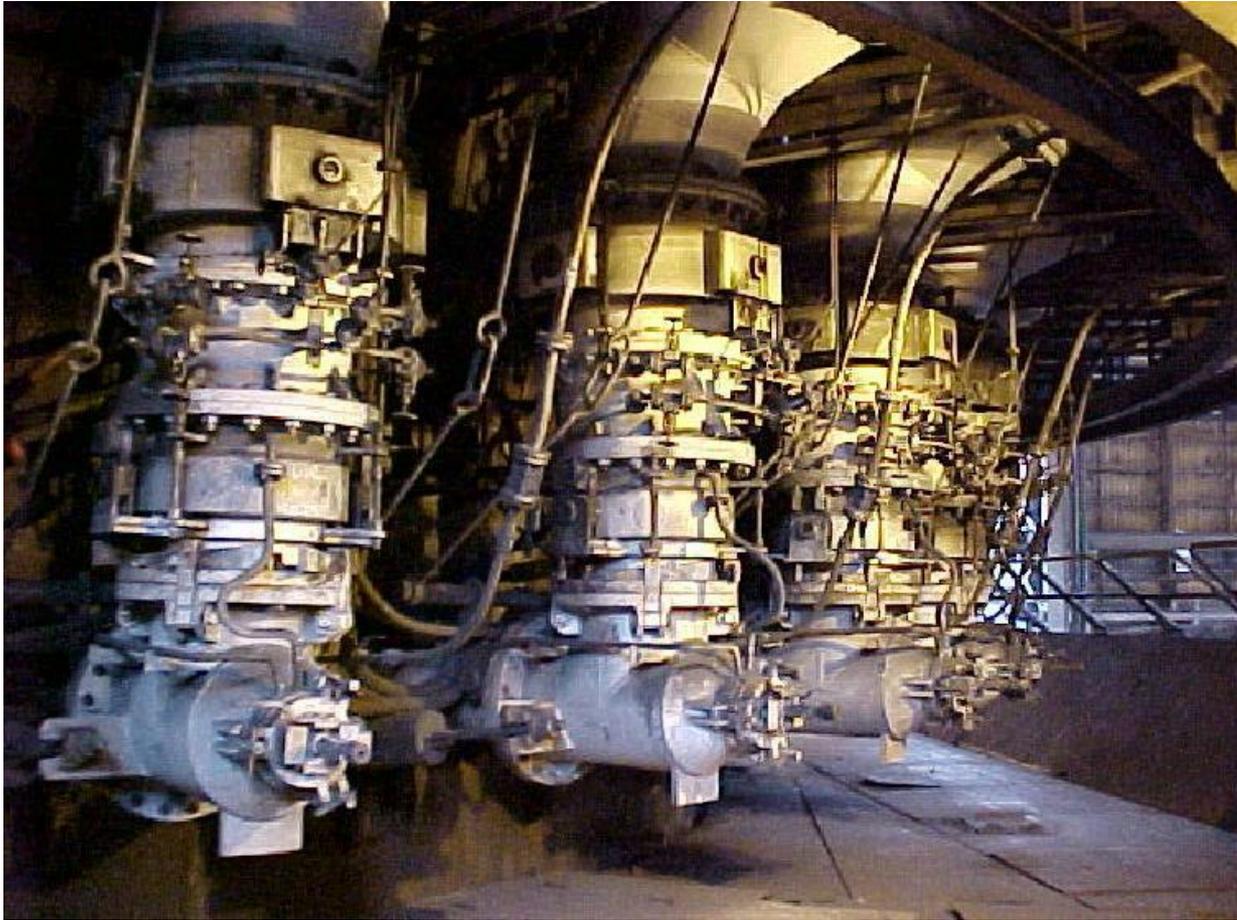
• 3 - Zona de Gotejamento

- Esta região contém coque na forma sólida, em cujos interstícios gotejam o gusa e a escória. Esta zona é dividida em duas sub-zonas: a região de coque ativo e o “homem morto”. Durante a descida das gotas de gusa para o cadinho acontecem importantes reações que incorporam os elementos de liga ao gusa.

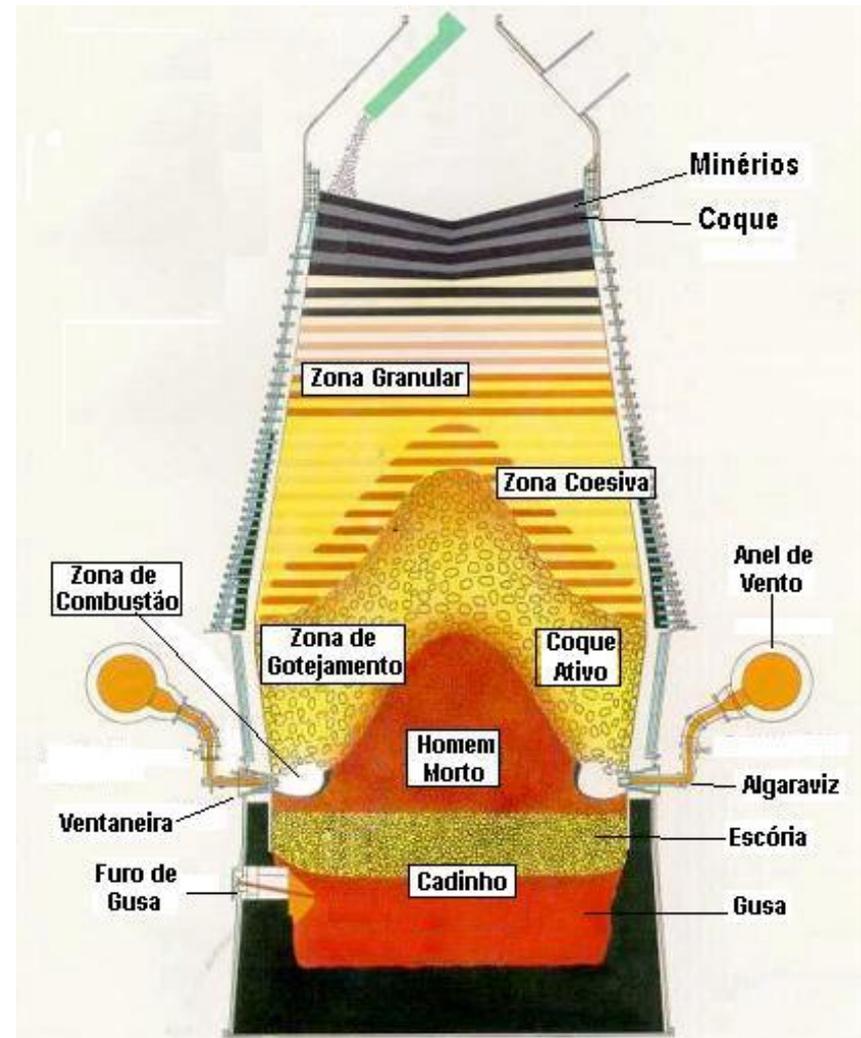


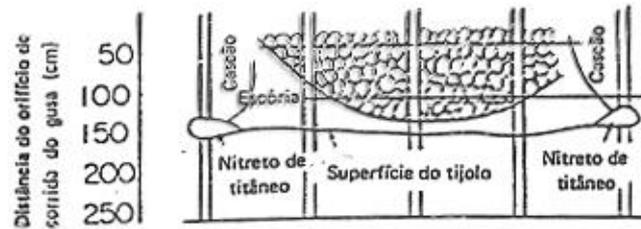
- **4 – Zona de Combustão:**
- É uma região gasosa em frente as ventaneiras, devido à elevada energia cinética do sopro de ar quente. À medida que as partículas de coque circulam, vão sendo queimadas, gerando o gás redutor e energia. Também o carvão pulverizado injetado deve queimar dentro desta zona.



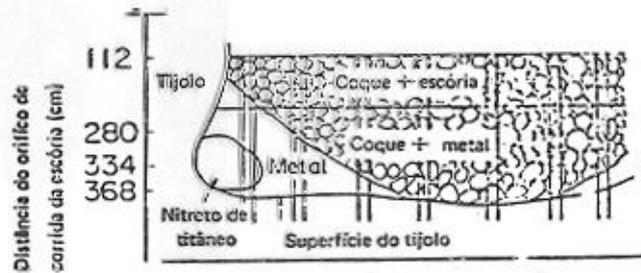


- **5 - Cadinho:**
- É preenchido com coque granulado, por cujos interstícios se depositam o gusa e escória, que se separam em duas camadas por diferença de densidade. No cadinho ainda ocorrem importantes reações entre as fases metálicas e escorificada, tais como a de dessulfuração do gusa.





A. F. nº 5 de Higashida



A. F. nº 4 de Kukioka

SEÇÃO VERTICAL DO CADINHO DE ALTOS-FORNOS. SE-
GUNDO KANBARA ET ALII(2).

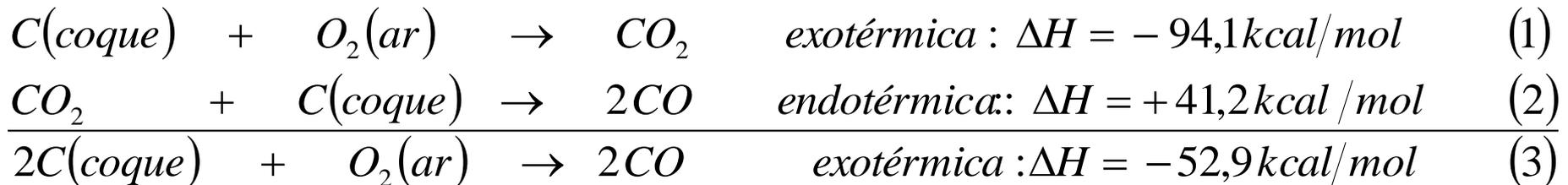
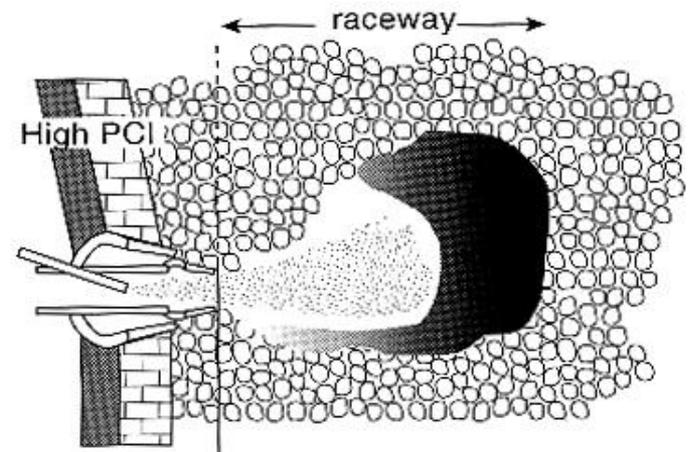
Zonas de Reações

- 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.
- Decorrente desta alta velocidade, o coque em frente das ventaneiras é empurrado formando uma cavidade, que é a “zona de combustão”
- Coque circula em movimentos rápidos enquanto é queimado pelo oxigênio do ar e vai diminuindo de tamanho à medida que reage.

O tamanho da “zona de combustão” varia na faixa de 1,5 a 2,5 m além da ponta das ventaneiras.



Vapor d'água contido no ar soprado



- A equação (4) explica o efeito refrigerante sobre a temperatura de chama proporcionado pela umidade do ar soprado. Na operação do alto-forno, 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.
- A injeção de combustíveis auxiliares pelas ventaneiras pode alterar significativamente a composição do gás gerado, principalmente com relação à presença de hidrogênio.

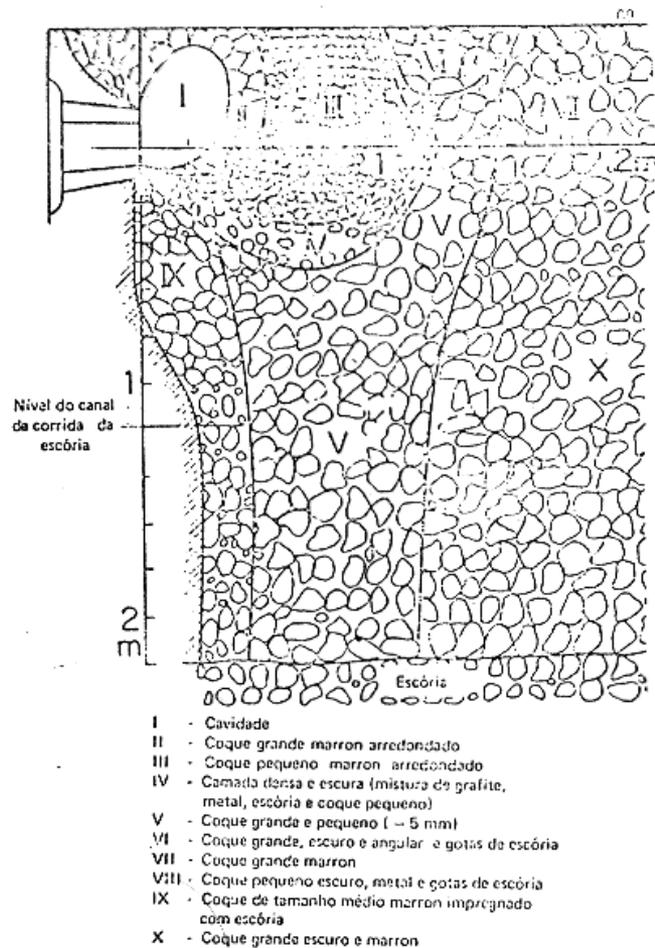


FIGURA 1.5 - SEÇÃO VERTICAL EM FRENTE A UMA VENTANEIRA DO ALTO Forno Nº 4 DE KUKIOKA, SEGUNDO KANBARA ET ALII(2).

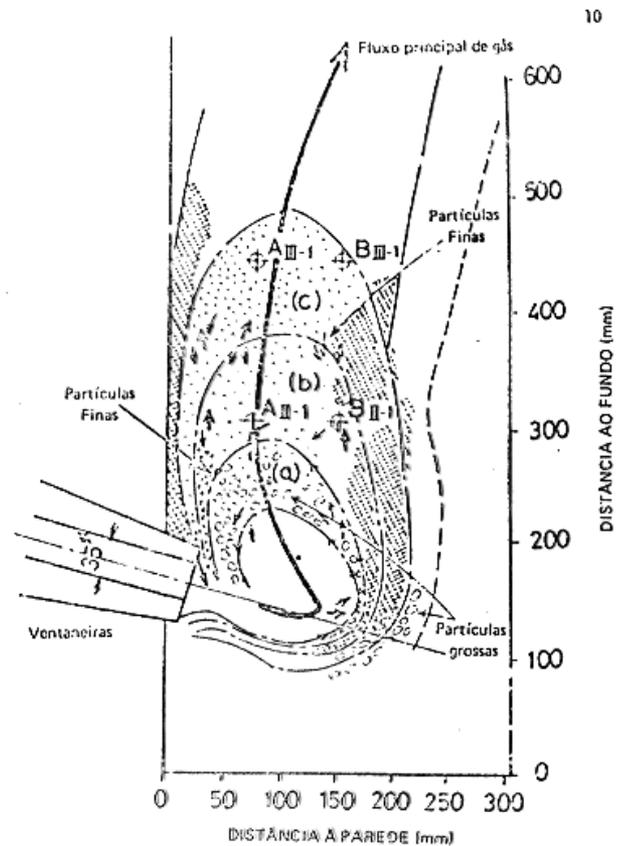


FIGURA 1.6 - COMPORTAMENTO DOS FINOS DE COQUE NA ZONA DE COMBUSTÃO DE UM FORNO EXPERIMENTAL: AS SETAS INDICAM A DIREÇÃO DAS PARTÍCULAS DE COQUE, SEGUNDO TATE ET ALII(6).

Reações de Redução

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

- 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. Outras reações que podem ocorrer na zona de preparação são a vaporização da água de hidratação, a reação de deposição do carbono ($2\text{CO} \rightarrow \text{C} + \text{CO}_2$) e a reação de formação do gás de água ($\text{CO}_2 + \text{H}_2 \rightarrow \text{CO} + \text{H}_2\text{O}$).

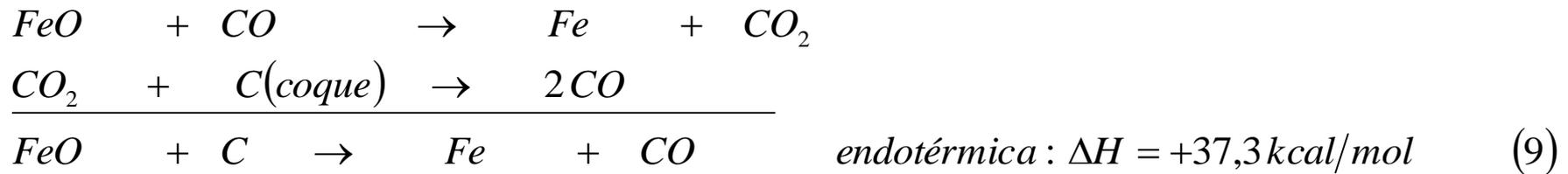
Zona de Elaboração

- 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, ocorrem 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.



As equações (5), (6) e (7) são chamadas reações de redução indireta e o produto é o CO_2 . Globalmente a redução indireta é levemente exotérmica.



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

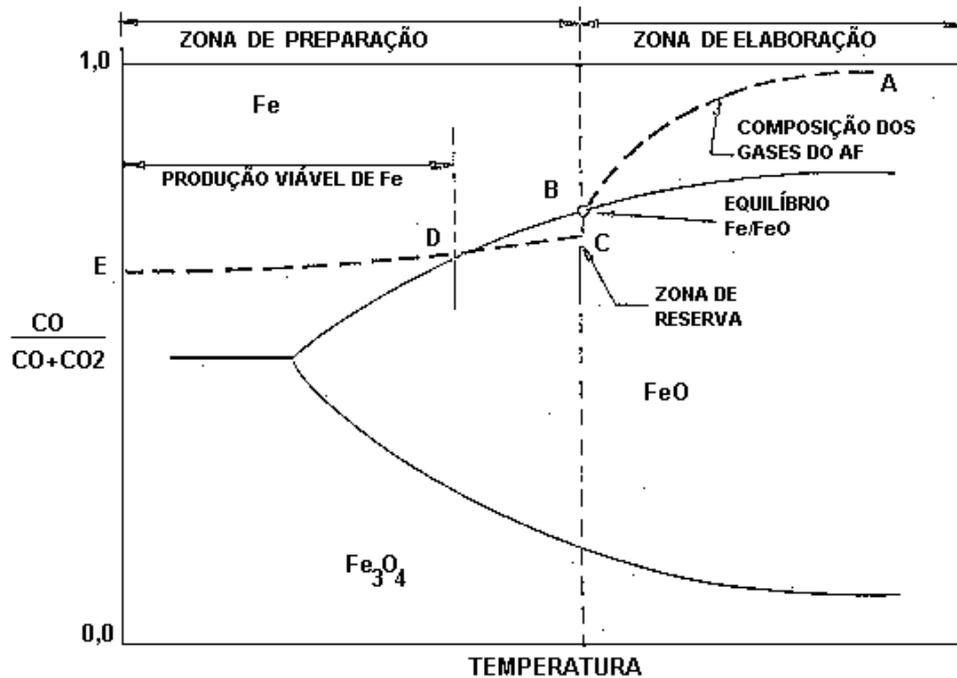
ponto “A” corresponde ao gás que sai da zona de combustão, com alto potencial redutor.

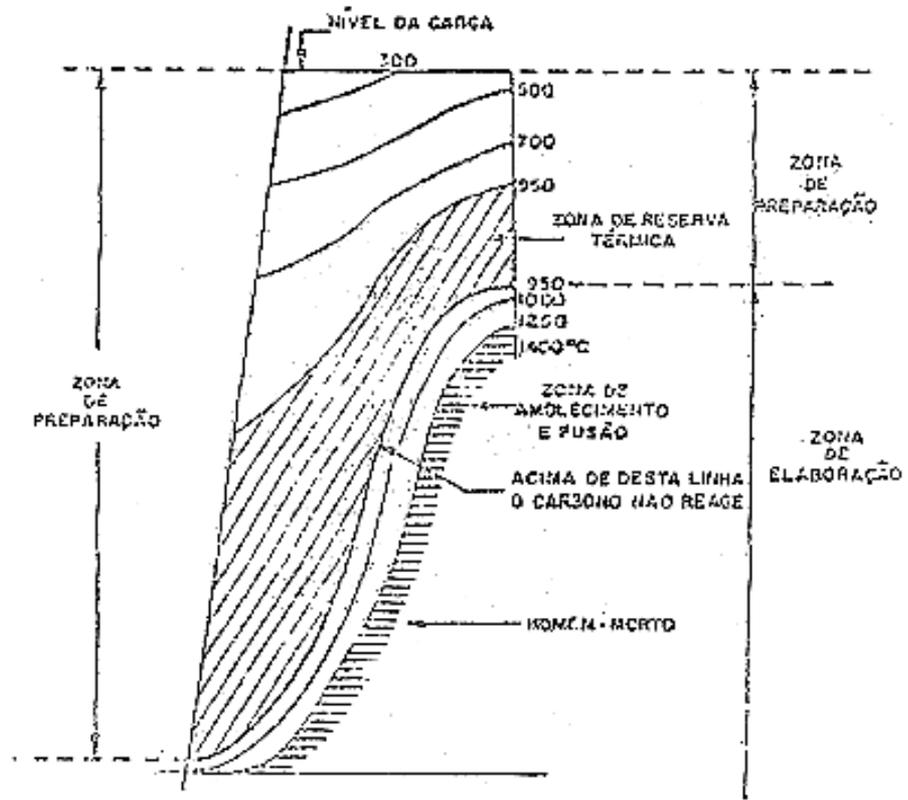
A medida que as reações de redução se processam o potencial redutor do gás cai, bem como a temperatura,

o gás que entra na zona de preparação, ponto “B”, exatamente sobre a linha de equilíbrio “FeO-Fe”, no caso de haver tempo suficiente para a redução completa dos óxidos de ferro para wustita na zona de preparação.

Existindo a zona de reserva térmica, onde a temperatura é constante, o gás, ao reduzir a carga ferrífera, atinge o ponto “C”.

Continuando sua ascendência no forno, o gás continuará a se resfriar a partir do ponto “C”, estando ainda sobre o campo de estabilidade da wustita. Ao atingir o ponto “D” o gás volta a penetrar no campo de estabilidade do ferro e havendo condições cinéticas favoráveis, pode ser produzida também alguma quantidade de ferro. O ponto “E” fornece a composição dos gases de topo do forno.





ESQUEMA DAS ZONAS DE PREPARAÇÃO E ELABORAÇÃO DE UM ALTO-FORNO A COQUE.

Consumo de carbono no AF

- Geração de calor- combustão nas ventaneiras (C_v)
- Carburação do ferro- dissolução no homem morto- (C_{gusa})
- Redução de óxidos não-ferrosos (Mn, Si, P)- (C_{rnf})
- Reação de Boudouard (solution loss, $CO_2 + C = 2 CO$) (C_{sl})

- $C_t =$ carbono que entra no coque + carbono que entra na ICP = carbono que sai nos gases + carbono que sai no gusa
- $C_t = C_v + C_{gusa} + C_{rnf} + C_{sl}$
- Para mesma matéria prima e mesmo procedimento operacional, C_{rnf} e C_{gusa} são constantes;
- $C_t = C_v + C_{sl} + cte$

- Requisitos do Ct

1. Térmico

Cv gera calor

Csl consome calor

2. Termodinamico

Etapa FeO-Fe exige alto teor de CO

Cv gera 1 CO ($C + 1/2 O_2 = CO$)

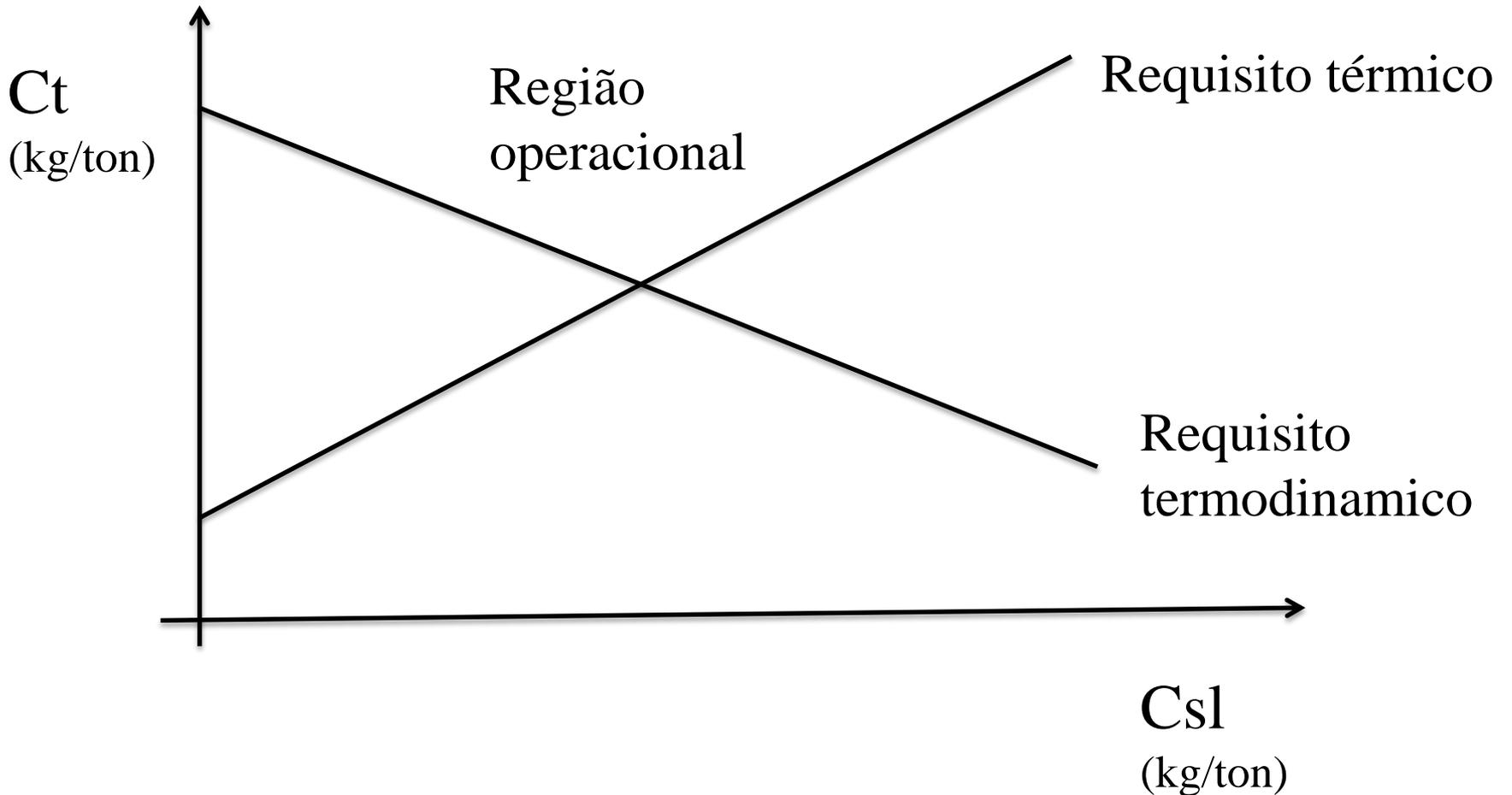
Csl gera 2 CO ($CO_2 + C = 2CO$)

Portanto, aumento de Csl

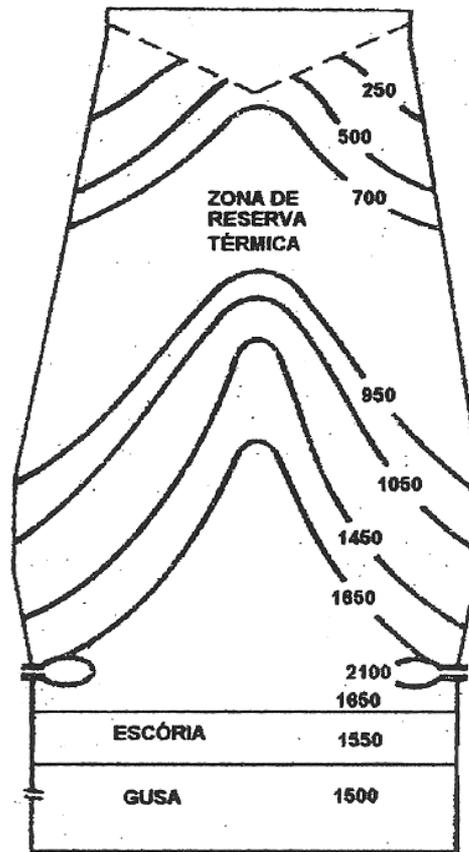
-aumenta Ct em termos térmicos,

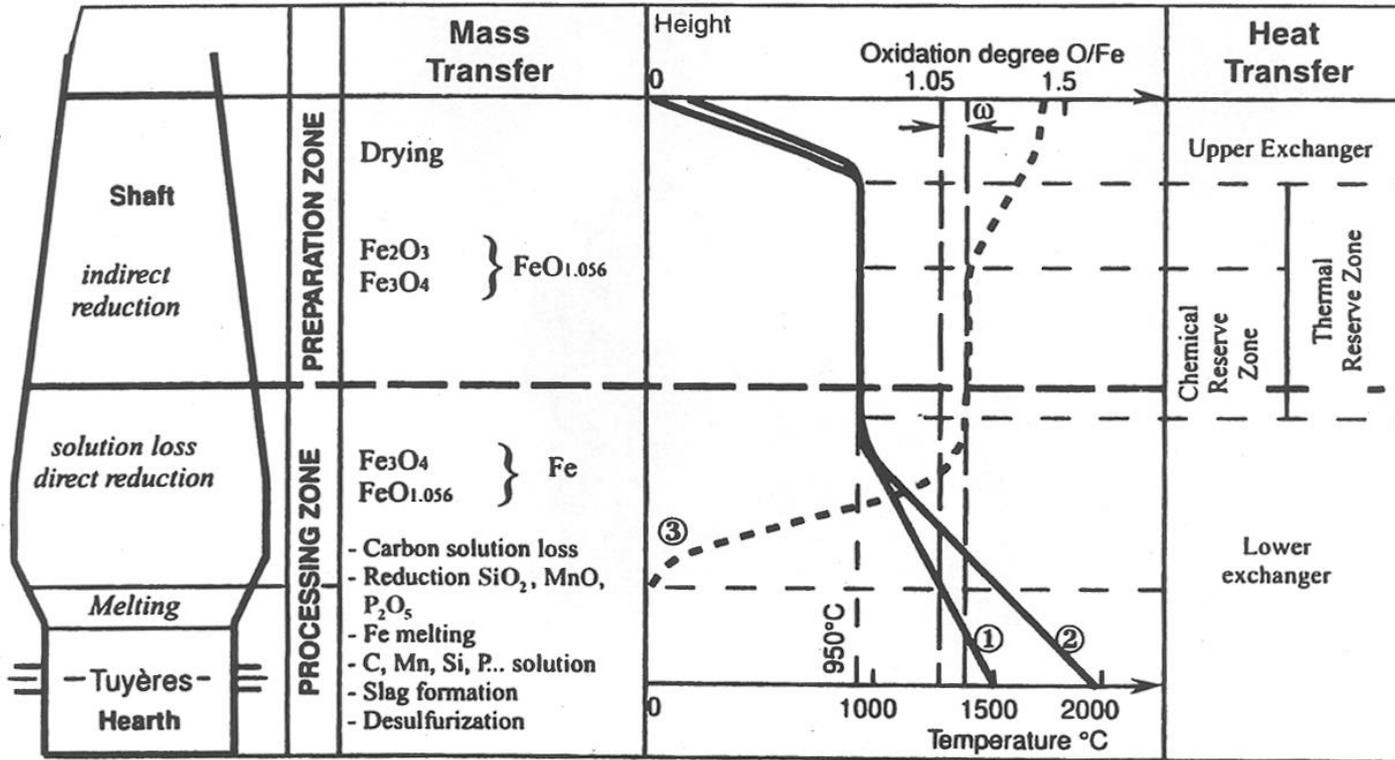
-diminui Ct em termos termodinamicos

Diagrama de mínimo consumo de carbono



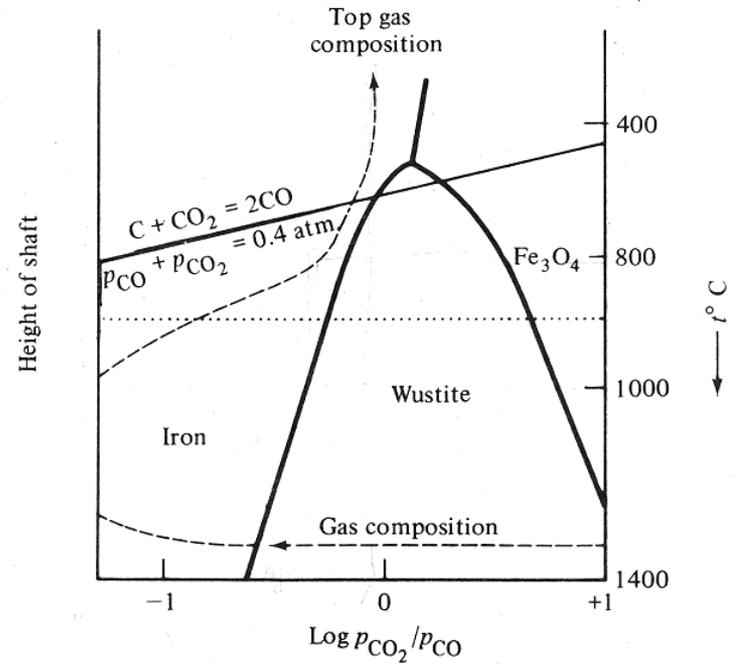
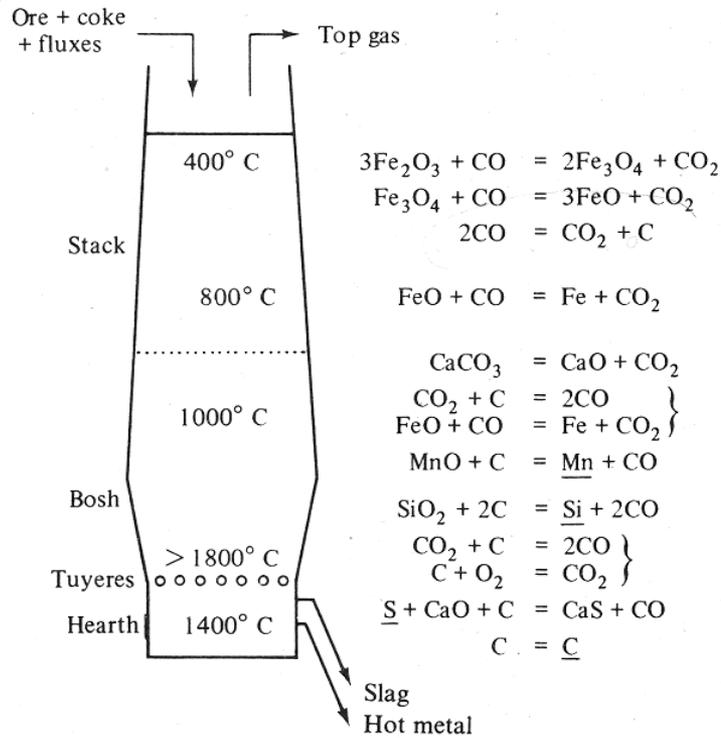
Zonas Térmicas





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

Principles of blast furnace process.



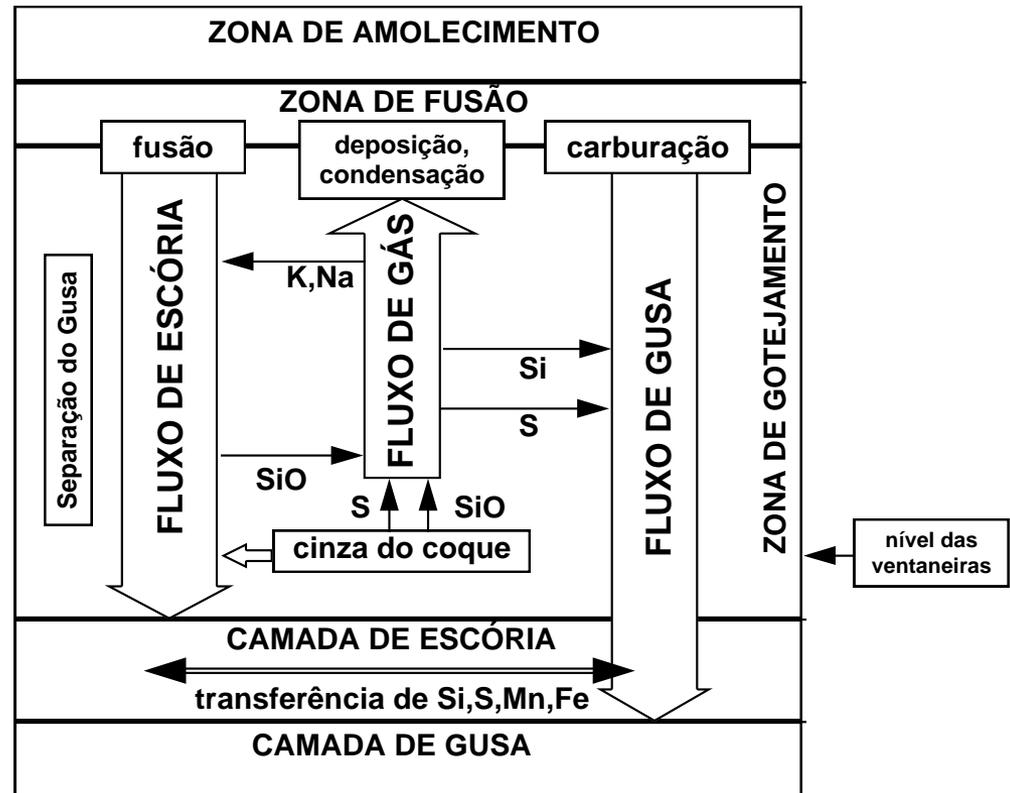
Comportamento químico e térmico nas várias zonas do alto-forno

Região	Comportamento Químico	Comportamento Térmico
Homem Morto (Cadinho e Rampa)	Saturação do gusa com carbono e redução final dos óxidos de impurezas.	O gotejamento de gusa e escória transfere calor para o cadinho
Zona de Combustão	O carbono do coque é oxidado para CO ₂ e então para CO	Grande geração de calor pela combustão do coque
Zona de Gotejamento (Rampa e Ventre)	Óxidos de impurezas são reduzidos e o ferro absorve carbono durante a percolação através do leito de coque	Transferência de calor dos gases ascendentes para o coque e as gotas de ferro e escória descendentes
Zona Coesiva (Rampa e Ventre e Baixa Cuba)	Formação e fusão da escória, redução final do FeO a Fe e fusão	Transferência de calor dos gases ascendentes para os sólidos em fusão
Início da Zona de Elaboração (Baixa Cuba e Ventre)	Redução do FeO e Gaseificação do Coque (Bourdouard)	A temperatura do gás ascendente cai rapidamente devido endotermicidade da Gaseificação do coque (Bourdouard)
Zona de Reserva Térmica (Média e Baixa Cuba)	Ocorre predominantemente a redução indireta do FeO	Variação mínima de temperatura ao longo da região, pois a redução indireta da wustita é fracamente exotérmica
Região Superior da Zona Granular (Alta e Média Cuba)	Redução do Fe ₂ O ₃ e Fe ₃ O ₄ para FeO	A temperatura dos gases diminui rapidamente devido à transferência de calor para os sólidos carregados. A evaporação da umidade da carga também rouba calor

Reações de Incorporação dos Elementos de Liga

diagrama com as principais transferências de elementos químicos entre o gusa, escória e o fluxo gasoso na região inferior do alto-forno.

observa-se que a cinza do coque desempenha um papel fundamental para a incorporação do enxofre e do silício ao gusa.

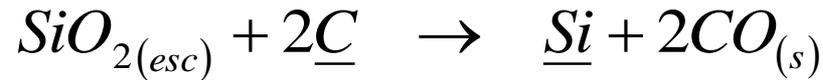


Mecanismos de Transferência do Silício

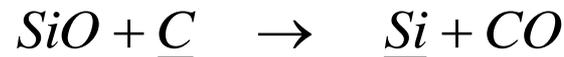
silício: elemento de liga mais importante do ferro-gusa do ponto de vista do controle térmico do processo, pois variações de nível térmico afetam diretamente sua incorporação ao gusa.

fontes de SiO_2 no alto-forno: ganga dos minérios e cinza do coque.

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



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



as reações metal-escória são lentas, a transferência de silício via SiO, reações acima, é a principal rota de transferência no alto-forno.

- A reação $SiO_2 + C \rightarrow SiO_{(g)} + CO$
- é favorecida pelo aumento da temperatura, e é deslocada no sentido das fases condensadas com a elevação da pressão, ou seja, ocorre redução da geração de SiO com a elevação de pressão.
- Isto explica a influência positiva da elevação do nível térmico e negativa da elevação da pressão de base do alto-forno sobre o teor de silício do gusa.

A reação $\text{SiO} + \underline{\text{C}} \rightarrow \underline{\text{Si}} + \text{CO}$

é favorecida pelo aumento da zona de gotejamento, ou seja, pela elevação da zona coesiva, o que aumenta tempo disponível para a reação.

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



Transferência de Outros Elementos para o Gusa

Enxofre

maior parte do enxofre carregado está na cinza do coque.

enxofre é absorvido pelo gusa e pela escória durante a descida da carga na cuba e na rampa, e a sua distribuição entre eles é definida pelas condições no cadinho.

A limitação do teor de enxofre do gusa pode ser feita:

- pelo controle da quantidade carregada, limitando a sua presença na cinza do coque e/ou reduzindo o “coque rate”
- no processo de alto-forno, favorecendo sua incorporação à escória, pela elevação da basicidade da escória e aumento do volume de escória.

Transferência de Outros Elementos para o Gusa

Óxidos de metais como níquel, cobre e chumbo, presentes em pequena quantidade, são facilmente reduzidos e inteiramente dissolvidos pelo gusa.

O óxido de fósforo necessita de maiores temperaturas e a redução só é completada na região inferior do forno.

A redução do óxido de manganês é mais difícil e ocorre apenas em regiões de temperatura elevada, de modo que a extensão de sua redução varia entre 50 a 75%, dependendo do nível de temperatura atingido, o restante sendo removido pela escória.

Portanto, o controle destes elementos no gusa se dá basicamente pelo controle da quantidade carregada

Injeção de Carvão Pulverizado em Altos-Fornos

- qualquer material com alta porcentagem de hidrocarbonetos é passível de ser injetado pelas ventaneiras do alto-forno, como plásticos picotados, óleo combustível, álcool, alcatrão, gás natural, borras oleosas, coque de petróleo, carvão vegetal e carvão mineral pulverizados entre outros. A escolha do material mais adequado passa obviamente pelos aspectos práticos e econômicos desta injeção.
- Praticamente todos altos-fornos brasileiros praticam injeção de carvão (vegetal ou mineral) pulverizado. A Injeção de Carvão Pulverizado (ICP) tem como objetivo básico a substituição de parte do coque carregado, objetivando redução de custos.

Injeção de Carvão Pulverizado em Altos-Fornos

- A ICP pode propiciar os seguintes benefícios:
 - • Redução de custos pela substituição de coque por carvões não-coqueificáveis de baixo custo, além de redução do consumo energético;
 - • Grande elevação de produtividade devido possibilidade de elevação do enriquecimento do ar soprado com oxigênio;
 - • Extensão da vida útil das baterias de coqueificação devido a redução da demanda de coque;
 - • Maior estabilidade de qualidade do gusa e redução do teor de silício.

- O carvão é injetado diretamente dentro da zona de combustão através das ventaneiras juntamente com o ar quente, que pode ser enriquecido com oxigênio.
- O carvão é injetado, absorve calor, devolatiliza-se e inicia a combustão logo que deixa a lança de injeção, onde o fluxo de carvão se mistura com o fluxo de ar injetado, facilitando a combustão do mesmo.

- à medida que a taxa de injeção aumenta ocorre tendência de elevação da quantidade de carvão não-queimado (“char”) e da energia cinética do sopro, causando
 - • Variações no formato da zona de combustão e instabilidade da zona de combustão;
 - • Redução da permeabilidade do coque nas vizinhanças da zona de combustão;
 - • Aumento da degradação do coque na zona de combustão;
- Variações na distribuição de temperatura da zona de combustão;
- redução significativa do “coke rate”, ou seja a coluna de carga do forno conterà cada vez mais carga metálica e menos coque.

- até taxas de 100 Kg/t ou mesmo de 150 Kg/t, não existe necessidade de alterações significativas nos procedimentos operacionais.
- para taxas mais elevadas, existe a necessidade de se experimentar com a distribuição de carga, com o enriquecimento do ar com oxigênio e com os critérios de qualidade das materias primas antes de se obter uma operação estável.

vantagens operacionais da ICP

- • maior flexibilidade operacional do que a operação “all coke”, permitindo melhor ajuste da temperatura teórica de chama.
- • injeção de vapor, utilizada na operação “all coke”, deixa de ser necessária.
- • produtividade do forno pode ser elevada, especialmente quando a ICP é acompanhada por enriquecimento com oxigênio.
- • vida útil da bateria de coqueificação pode ser estendida através da redução do ritmo operacional.
- • As taxas de injeção podem ser modificadas rapidamente, enquanto que a produção da planta de coqueificação não pode ser facilmente alterada em curto espaço de tempo.
- • carvão é mais barato e tem maior disponibilidade global que óleo e gás natural
- • carvão pode ser injetado em taxas mais elevadas que o óleo e o gás natural devido a uma menor redução da temperatura teórica de chama em relação aos outros combustíveis.

A Produtividade dos Altos-Fornos

- Produtividade: toneladas de gusa produzidas por dia por unidade de volume útil do forno.
- Produção: (tgusa/dia), depende da quantidade de combustíveis queimados nas ventaneiras na unidade de tempo e da quantidade de combustíveis (coque, carvão, etc) necessária para produzir uma unidade de ferro gusa, ou seja, do “fuel rate”.

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

onde, K : " fuel rate"

Q : consumo diário de combustíveis

Portanto, a produção pode ser elevada com medidas que aumentem a quantidade de combustíveis queimada e/ou reduzam o “fuel rate”.

- Para elevar a quantidade de coque queimado:
- elevação da quantidade de oxigênio injetada nas ventaneiras, via aumento do enriquecimento do ar ou através do aumento da vazão de ar.
- enriquecimento do ar soprado tem sido mais utilizado para elevação da produção,
- a utilização de taxas de enriquecimento elevadas (> 3%) causa elevação exagerada da temperatura de chama, e esta técnica tem sido aliada à injeção de carvão pulverizado, que tem efeito oposto sobre a temperatura de chama. Portanto, é comum hoje em dia observar altos forno operando com elevadas taxas de enriquecimento (> 6%) e altas taxa de injeção de carvão (> 150 kg/t), obtendo assim alta produtividade e baixo custo de combustíveis.

aumento da vazão de ar

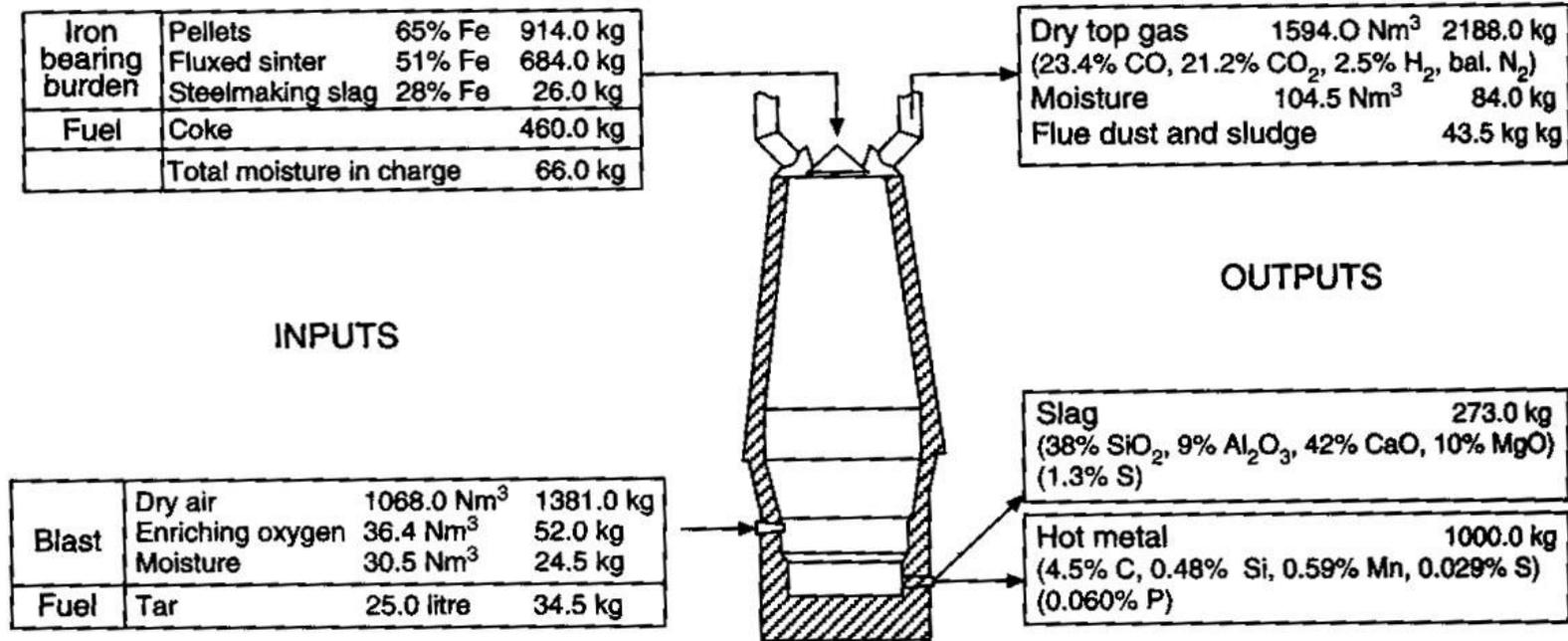
- é necessário que haja permeabilidade na carga do alto-forno, ou seja, a coluna de carga deve aceitar o aumento de volume de gases ascendentes, mantendo a operação estável. Esta elevação de permeabilidade da coluna de carga passa por medidas tais como melhoria da qualidade das matérias-primas, ações de distribuição de carga e melhor controle da drenagem do cadinho.

abaixamento do “fuel rate”,

outra via para a elevação da produtividade é o abaixamento do “fuel rate”, que passa por uma maior eficiência na redução dos óxidos de ferro.

- maior eficiência de redução, ou seja, maior taxa de redução indireta que não consome coque, pode ser obtida através de:
- maior utilização de cargas preparadas (sinter e pelotas),
- melhor distribuição de carga,
- melhoria no contato gás-sólidos através da redução da velocidade dos gases usando maior contra-pressão no topo.
- redução das necessidades térmicas do processo (menor volume de escória, menor umidade do ar, etc.)
- carregamento de cargas pré-metalizadas, apesar do custo elevado

Balanço de massa



Blast furnace material balance.

Balanço de massa e energia

Energy Balance and Materials Balance

Since the early 1970s, Sumitomo Metals has worked for environmental improvements to resolve such issues as air, water, and noise pollution. We have also been actively involved in company-wide energy conservation measures including the recovery of waste energy and more efficient energy use. Also in the future we will continue to work for the preservation and improvement of the environment, and will take appropriate steps to meet our energy conservation targets, as a means of ensuring efficient use of natural resources and to help prevent global warming.

Resources and Energy Inputs

Resources	Iron ore	18.73 million tons
	Iron source scrap	0.38 million tons
	Auxiliary materials (alloys, limestone, etc.)	3.19 million tons
	Other industrial wastes	0.17 million tons
	Coking coal	10.27 million tons
	Industrial water	194 million tons
Energy	Coking coal (energy value)	298 PJ
	Fuel (petroleum, gas, etc.)	21 PJ
	Electricity	5280 GWh

Products, Wastes, and Energy Supplies

Products	Steel products	12.87 million tons
	By-products (cement and roadbed sub-base, etc.)	4.18 million tons
Waste	Final disposal (slag, dust, sludge)	0.11 million tons
	Fuel (petroleum, gas, etc.)	63 PJ
Energy	Electricity	1850 GWh

*PJ (petajoule): Unit of energy and heat quantity. P (peta-) is 10¹⁵.

