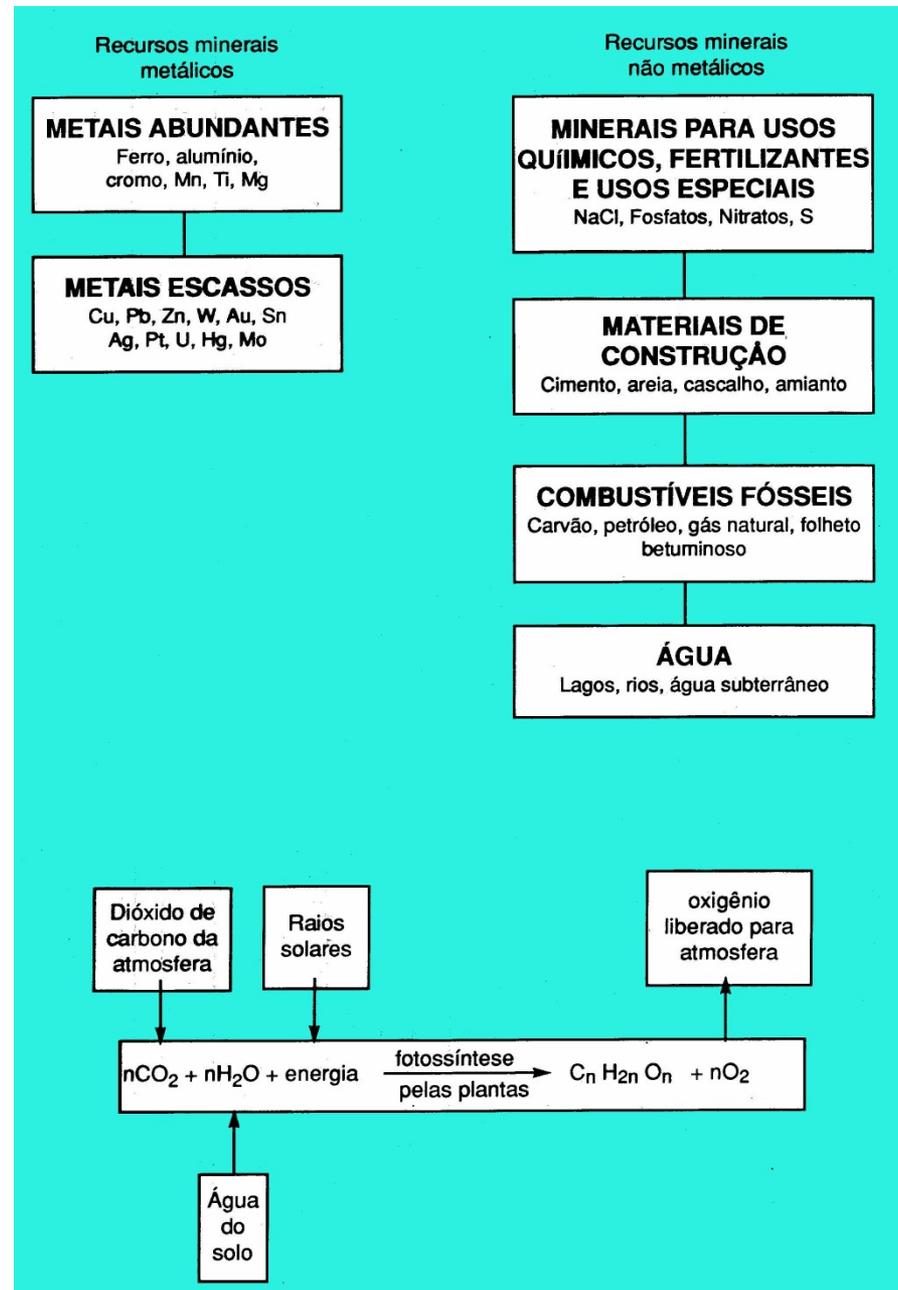


# PROCESSOS DE PRODUÇÃO DE FERRO E AÇO

Materiais Metálicos

Profa.Dra. Lauralice Canale

# Introdução



# Recursos - Minerais

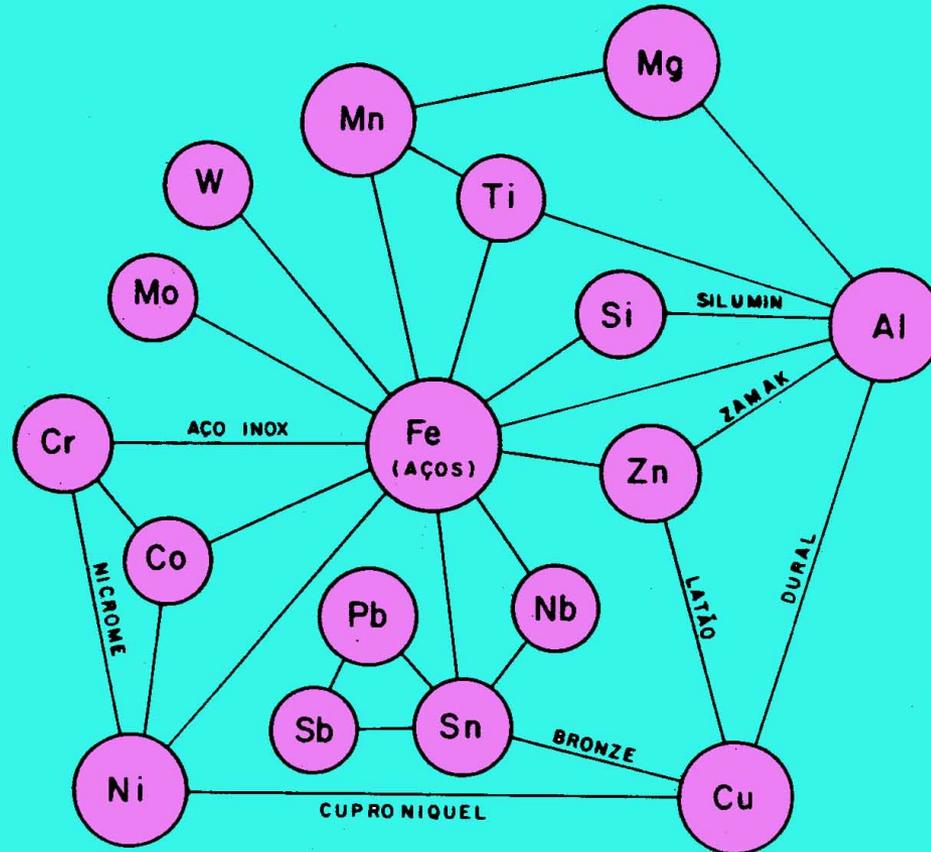
<i>Abundância Relativa</i>	<i>Elemento</i>	<i>Símbolo</i>	<i>Ocorrência (% peso)</i>	
1	Oxigênio	O	47	74%
2	Silício	Si	27	
3	ALUMÍNIO	Al	8	99%
4	FERRO	Fe	5	
5	Cálcio	Ca	4	
6	Sódio	Na	3	
7	Potássio	K	2,5	
8	MAGNÉSIO	Mg	2,0	
9	TITÂNIO	Ti	0,5	
10	Hidrogênio	H	0,15	
11	Fósforo	P	0,10	
12	MANGANÊS	Mn	0,09	
13	Fluor	F	0,06	
14	Bário	Ba	0,04	
15	Estrôncio	Sr	0,03	
16	Enxofre	S	0,025	
17	Carbono	C	0,020	
18	ZIRCONIO	Zr	0,015	
19	VANÁDIO	V	0,014	
20	Cloro	Cl	0,013	
21	CROMO	Cr	0,010	
22	Rubídio	Rb	0,009	
23	NÍQUEL	Ni	0,008	
24	ZINCO	Zn	0,007	
25	Cério	Ce	0,006	
26	COBRE	Cu	0,005	
27	Ítrio	Y	0,004	
28	Lantânio	Lt	0,003	
29	Neodímio	Ne	0,0028	
30	COBALTO	Co	0,0025	
31	Escândio	Sc	0,0023	
32	Lítio	Li	0,0022	
33	NÍOBIO	Nb	0,0021	
34	Nitrogênio	Ne	0,0020	
35	Gálio	Ga	0,0015	
36	CHUMBO	Pb	0,0013	
37	Rádio	Ra	0,0012	
38	Boro	B	0,0010	
39	Criptônio	Kp	0,0009	
40	Praseodímio	Pr	0,0008	

# Recursos - Minerais

## MINÉRIOS DE FERRO

Mineral	Fórmula química	Conteúdo teórico em ferro	Conteúdo teórico em ferro após calcinação
<b>hematita</b>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	69,96	69,96
<b>magnetita</b>	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	72,4	72,4
magnesioferrita	MgO·Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	56-65	56-65
goethita	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ·H <sub>2</sub> O	62,9	70
hidrogoethita	3Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ·4H <sub>2</sub> O	60,9	70
<b>limonita</b>	2Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ·3H <sub>2</sub> O	60	70
<b>siderita</b>	FeCO <sub>3</sub>	48,3	70
pirita	FeS <sub>2</sub>	46,6	70
pirrotita	Fe <sub>1-x</sub> S	61,5	70
ilmenita	FeTiO <sub>3</sub>	36,8	36,8

# Recursos - Minerais



*Esquema simplificado das principais interdependências entre metais, para formação das ligas metálicas de maior interesse industrial.*

# Recursos - Minerais

<i>PRAZOS A PARTIR DE 1980 (ANOS)</i>				
<i>10 a 20</i>	<i>20 a 50</i>	<i>50 a 200</i>	<i>200 a 400</i>	<i>400 a 600</i>
Estanho Prata Mercúrio Ouro	Cobre Zinco Chumbo Platina	Tungstênio Molibdênio Vanádio Antimônio	Cromo Níquel Cobalto Alumínio	Ferro Manganês Titânio Nióbio

Para refletir:

-Estamos em 2018. Acabaram? Por que?

-Há solução para o problema de falta? Qual?

# Recursos - Minerais

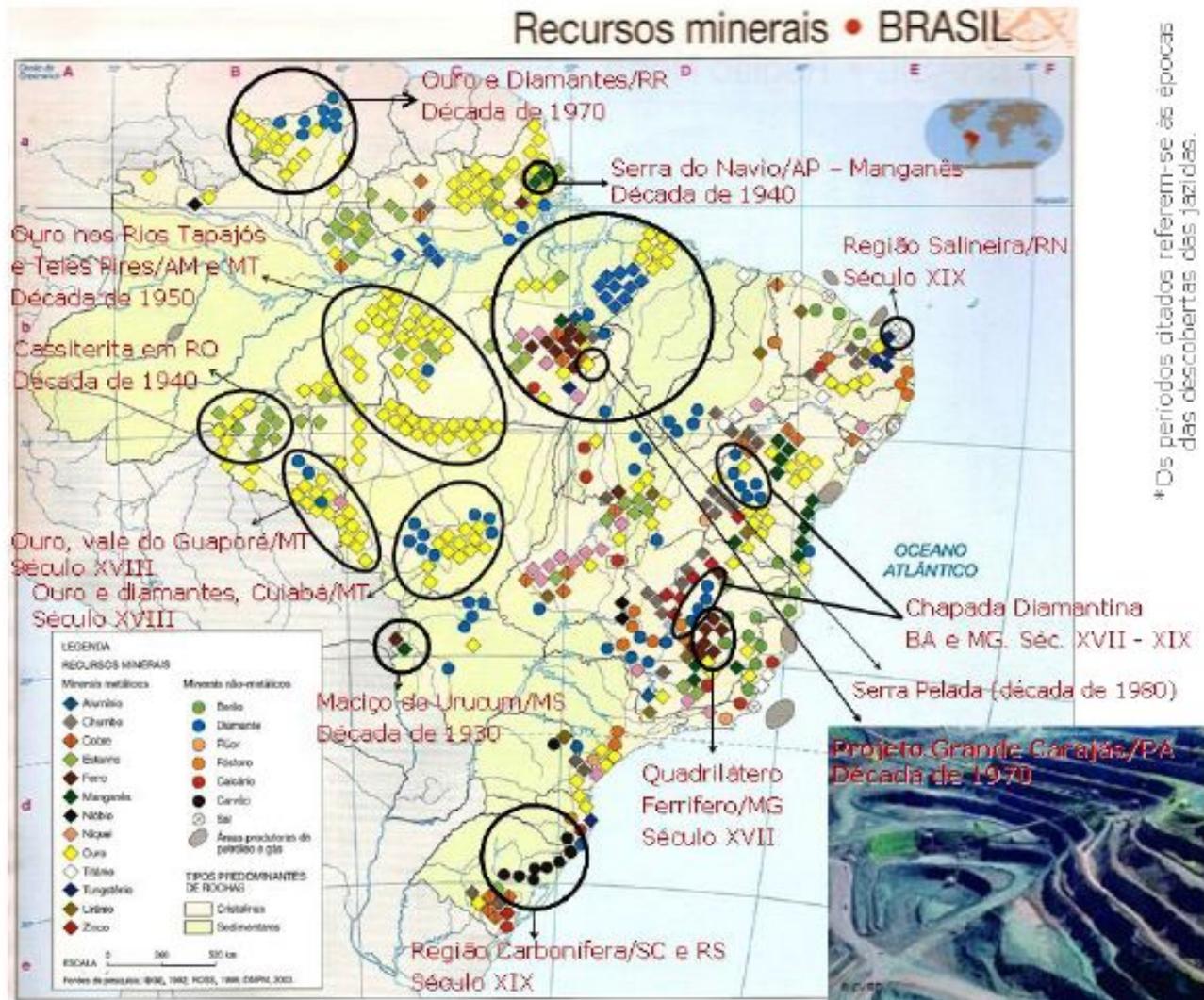
## Energia Especifica Requerida para a Extração do Metal e para a Recuperação de sua Sucata

<i>Metal</i>	<i>Energia Requerida (10<sup>3</sup> kWh/ton)</i>		<i>Relação Energia Energia Extr./Recup.</i>
	<i>Para Extração</i>	<i>Para Recuperação</i>	
Titânio	126,0	52,4	2,4
Ferro	4,3	1,7	2,5
Cobre	14,0	1,8	7,8
Alumínio	52,0	2,0	26,0
Magnésio	91,0	1,9	47,9

# Recursos - Minerais

São bastante relevantes os recursos minerais brasileiros:

## Grandes Projetos Mineralógicos do Brasil

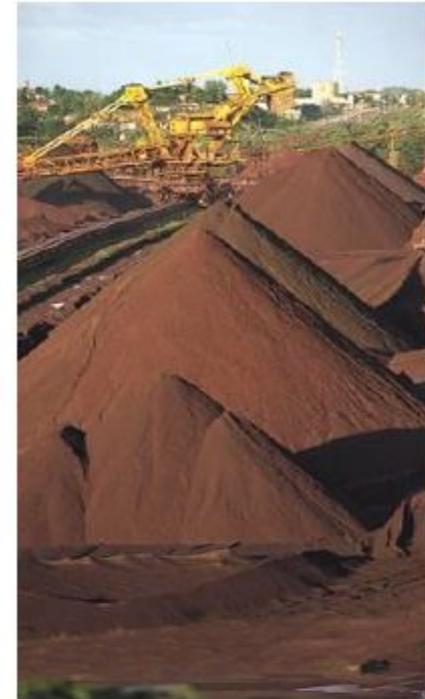


# Ferro e Aço

## FERRO

O **Quadrilátero ferrífero** em Minas Gerais e a **Serra dos Carajás** no Pará são as principais áreas produtoras de minérios metálicos no Brasil.

minérios de ferro / teor de ferro: hematita  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  69,96%, magnetita  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  72,4%,  
siderita  $\text{FeCO}_3$  48,3%, pirita  $\text{FeS}_2$  46,6%



A **Índia** é o terceiro maior exportador de minério de ferro. Produziu, em 2012, 223 milhões de toneladas das quais 105 milhões de toneladas foram exportadas, principalmente para a **China**.

# Ferro e Aço

## Aços



**Aço** é uma liga metálica formada essencialmente por ferro e carbono, com percentagens deste último variando entre 0,008 e 2,1%. Distingue-se do ferro fundido, que também é uma liga de ferro e carbono, mas com teor de carbono entre 2,1% e 6,7%.

Além disso, o aço incorpora outros elementos químicos, alguns prejudiciais, provenientes da sucata, do mineral ou do combustível empregados no processo de fabricação, como o enxofre e o fósforo. Outros são adicionados intencionalmente para melhorar algumas características do aço para aumentar a sua resistência, ductibilidade, dureza ou para facilitar algum processo de fabricação, como usinabilidade, que é o caso de elementos de liga como níquel, cromo, molibdênio e outros.

**>2 até 5%** aços de baixa-liga    **>5%** aços de alta-liga

O **aço inoxidável** é um aço de alta-liga com teores de cromo e de níquel em altas doses (que ultrapassam 20%).

# Recursos para processamento - Coque

Tabela 1 – Comparativo entre os tipos de carvões minerais

MATERIAL	TURFA	LINHITO	HULHAS	ANTRACITO
Período de formação	Quaternário	Terciário (cretácio; 135 a 2 milhões de anos )	Primário (350 a 225 milhões de anos )	Primário (350 a 225 milhões de anos )
Cor	amarela a parda	Parda a negra	negra	Negra
Aspecto	terroso	lenhoso	rochoso	rochoso
Estrutura	Musgosa e fibrosa			
Umidade (natural) [%]	90	20 a 40	10 a 20	2,0 a 3,5
Umidade (seco ao ar) [%]	20 a 25	15 a 25	1,0 a 2,0	2,0 a 3,5
% C <sup>1</sup>	55 a 65	65 a 73	73 a 92	92 a 96
% H	5,5	4,5	5,3	2,5
%O	32	21	8 a 16	4
Teor de cinzas [%]	8 a 15	6 a 7,5	3,5 a 9,1	2 a 3
Poder calorífico [Kcal/ kg]	3000 a 3500	3800 a 4600	5000 a 8200	7200 a 8000

<sup>1</sup> Teores calculados com base seca e sem cinzas

# Processos - Coqueamento

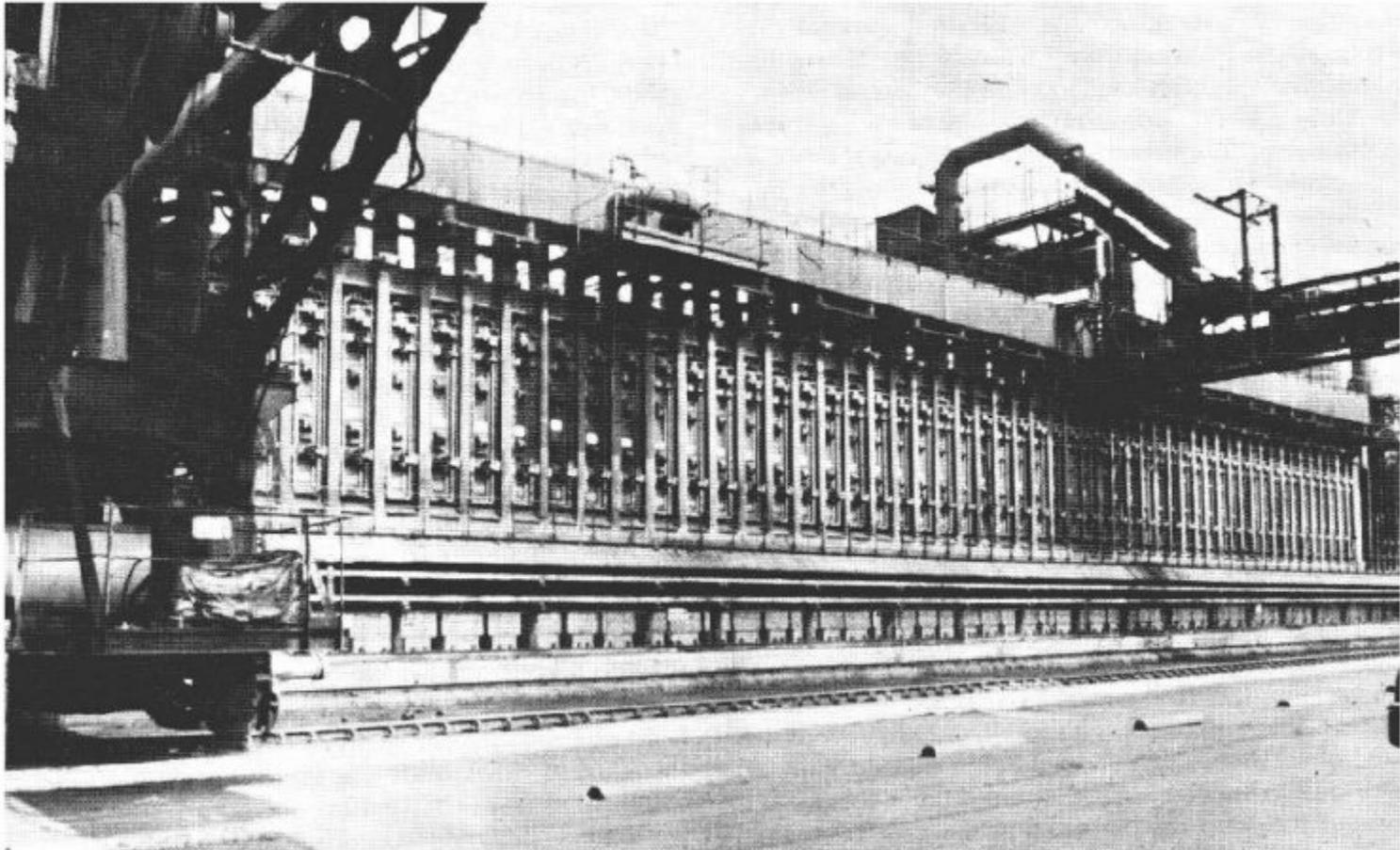
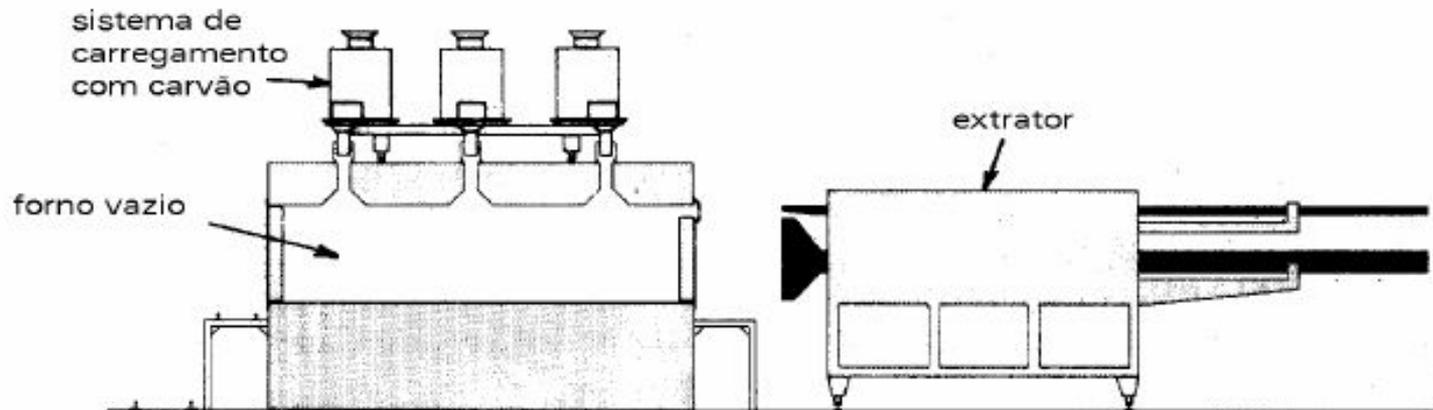
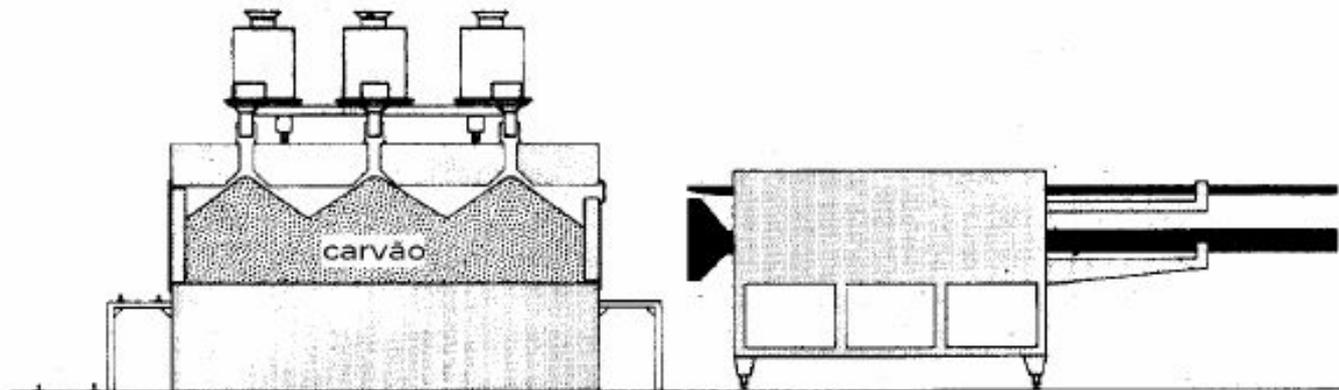


Figura 4 - Vista geral de uma bateria de fornos para coqueificação.

# Processos - Coqueamento

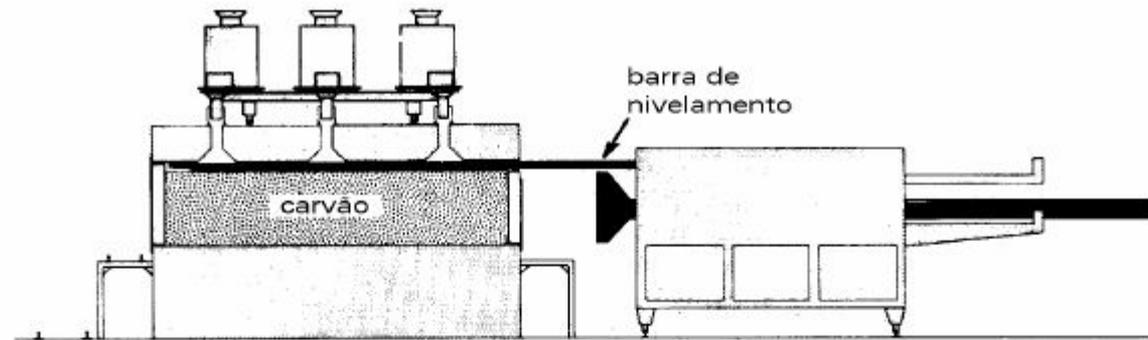


A - Início da operação. O forno está vazio e o sistema de carregamento adicionará uma quantidade determinada de carvão mineral.

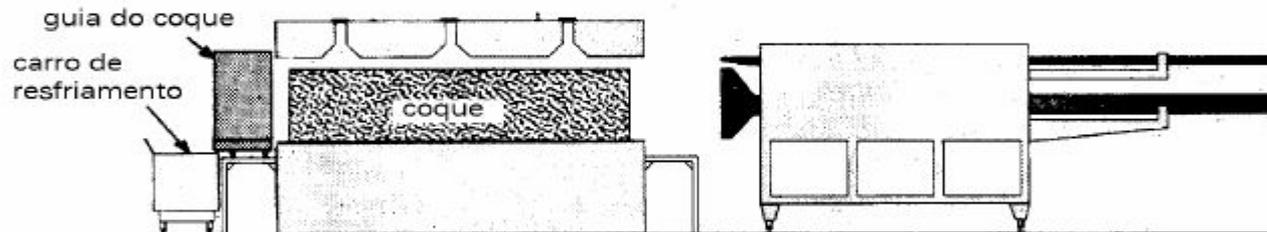


B- Fechamento da porta e carregamento do carvão mineral

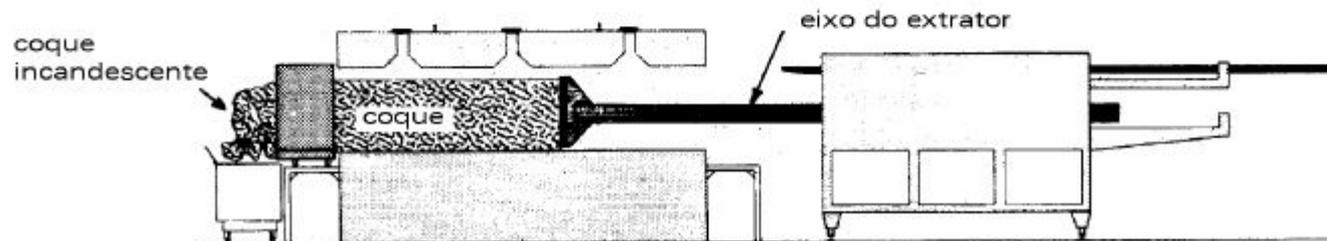
# Processos - Coqueamento



C - A porta de nivelamento, acima da porta do forno é aberta e a carga de carvão é nivelada. a barra de nivelamento é retirada, a porta é fechada e a operação de coqueificação é realizada.



D- A coqueificação está completa após 18 h e o coque é empurrado do forno para o carro de resfriamento



E- Extração do coque e início do carregamento.

# Processos – Fundentes ou fluxantes

Fundentes {  
Básicos (portadores de CaO e/ou MgO)  
Ácidos (portadores de SiO<sub>2</sub> e/ou Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)

Os principais fundentes são:

- Calcário (portador de CaO);
- Cal ( portador de CaO);
- Dunito (portador de MgO e SiO<sub>2</sub>);
- Serpentinó (portador de MgO e SiO<sub>2</sub>);
- Dolomita (portador de MgO e SiO<sub>2</sub>);
- Quartzó (portador de SiO<sub>2</sub>).

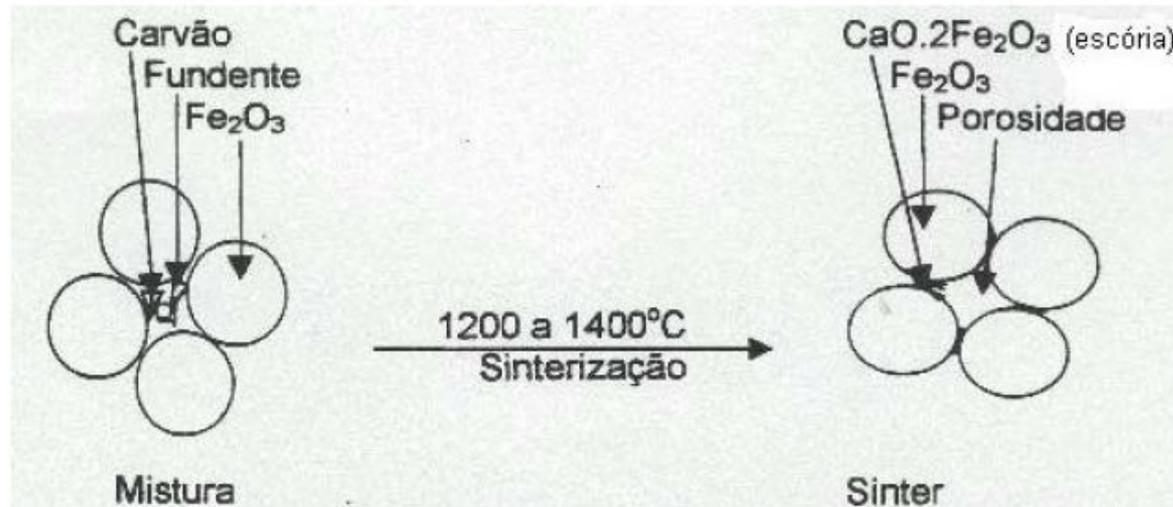


A composição química destes é a mesma tanto para Sinterização quanto para o Alto Forno. Sendo que a granulometria situa-se na faixa especificada abaixo:

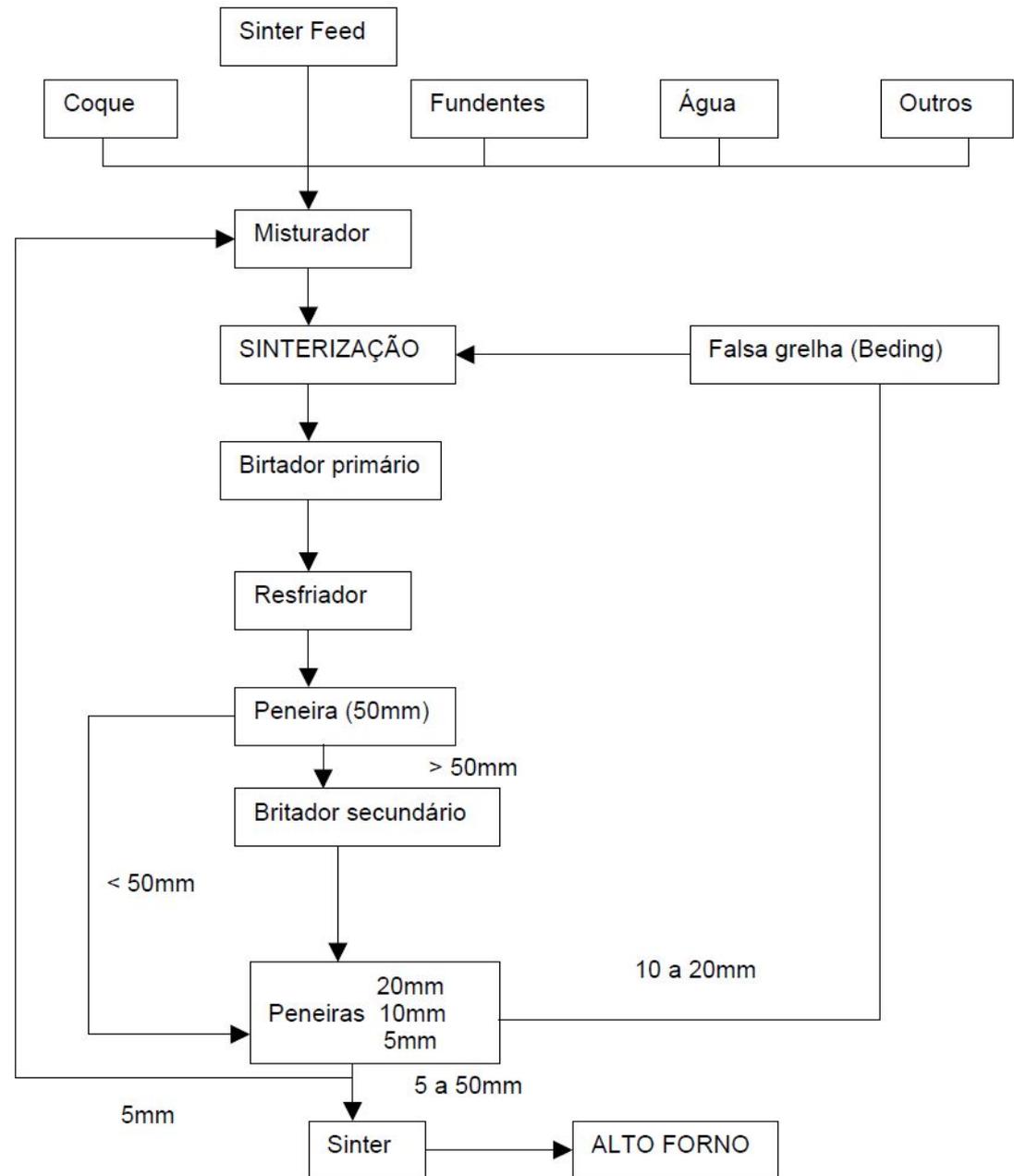
- 0 a 3,0 mm aproximadamente para Sinterização
- 10 a 30 mm aproximadamente para o Alto Forno.

# Processos – Sinterização

A sinterização consiste em misturar e homogeneizar finos de minérios de ferro (sinter feed), finos de carvão ou coque, finos de fundentes (cal, etc. ) e umidade e fazer a combustão do carvão ou coque, de modo que a temperatura atinja 1200 a 1400°C, condição suficiente para que a umidade evapore e as partículas da carga se unem por caldeamento, obtendo-se um material resistente e poroso denominado sinter.



# Processos – Sinterização



# Processos – Redução dos minérios de ferro

## Processo de redução direta

Processos de redução direta são aqueles nos quais a redução do minério de ferro a ferro metálico é efetuada sem que ocorra, em nenhuma etapa do processo, a fusão da carga no reator.

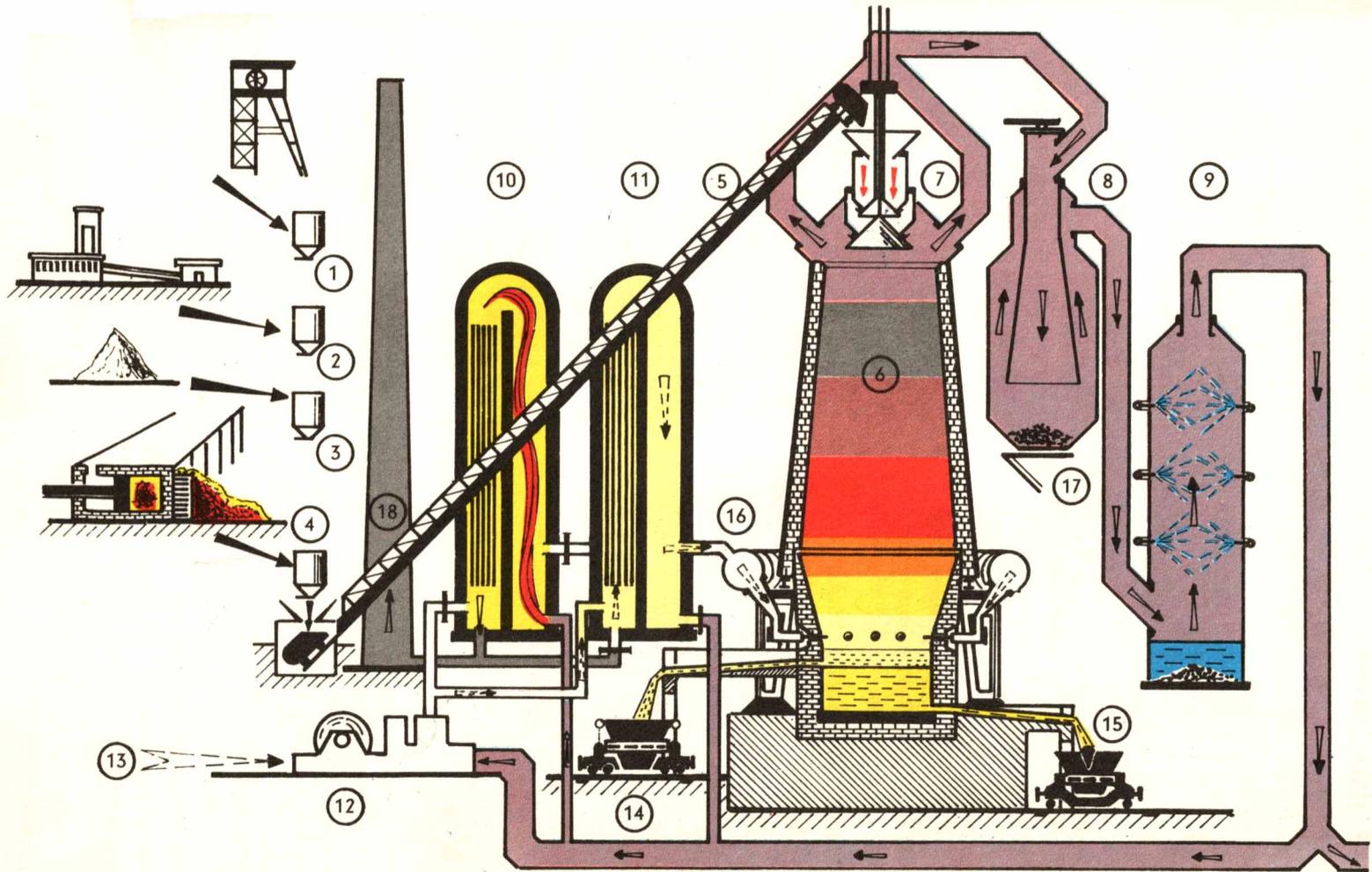
A redução no estado sólido de minério de ferro por carvão é praticada desde a antigüidade, tendo sido o principal processo de obtenção de ferro até o desenvolvimento dos altos fornos. Assim, o produto metálico é obtido na fase sólida, sendo chamado de “ferro esponja”.

O ferro esponja é um produto metálico com 85 a 95% de ferro e de 0,1 a 1,0% de C, podendo chegar a 2,0% de C. Tem aspecto esponjoso e é obtido no estado sólido à temperatura em torno de  $1100^{\circ}\text{C}$ , a preços relativamente reduzidos se comparado a grandes siderúrgicas.

Os processos de redução direta podem ser divididos conforme o tipo de redutor, em duas classes: redutor sólido (carvão ou coque) ou redutor gasoso (gás natural- $\text{CH}_4$  e/ou gases redutores como  $\text{CO}$ ,  $\text{H}_2$ ).

# Processos – Redução dos minérios de ferro

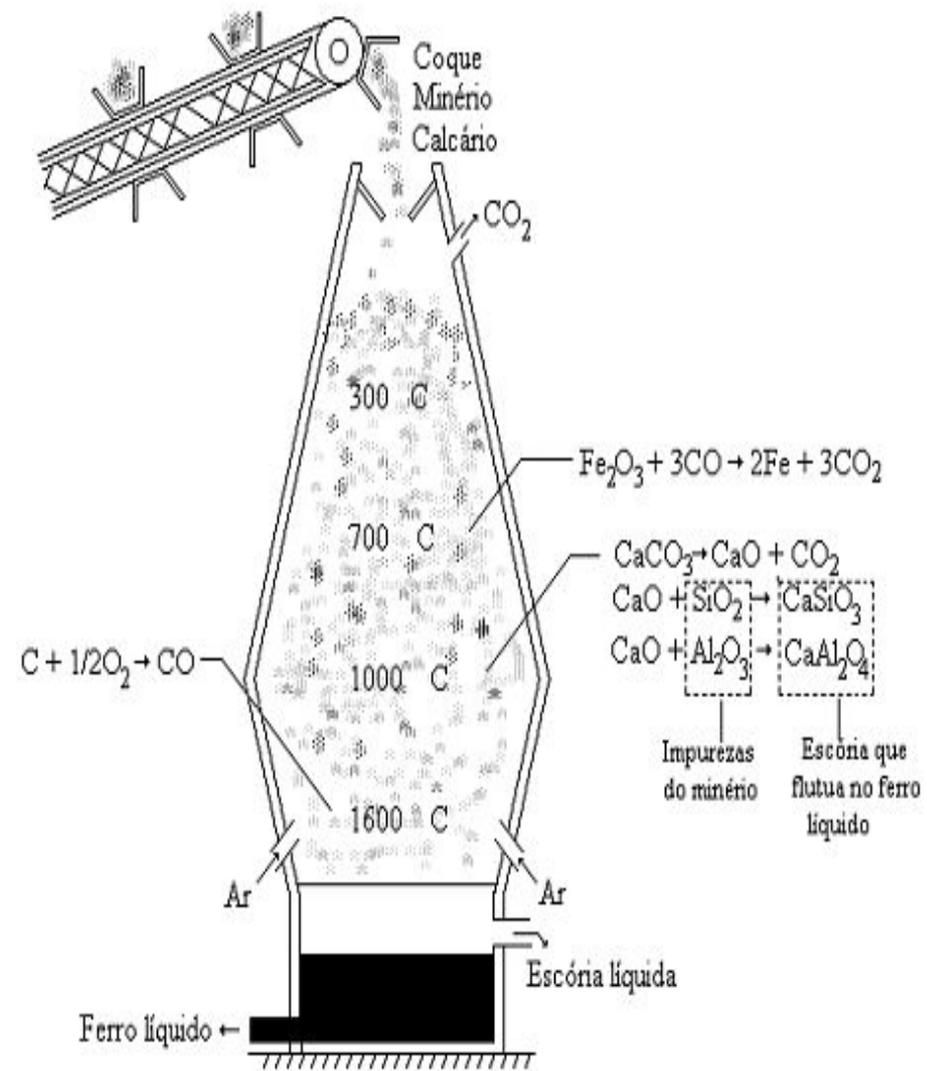
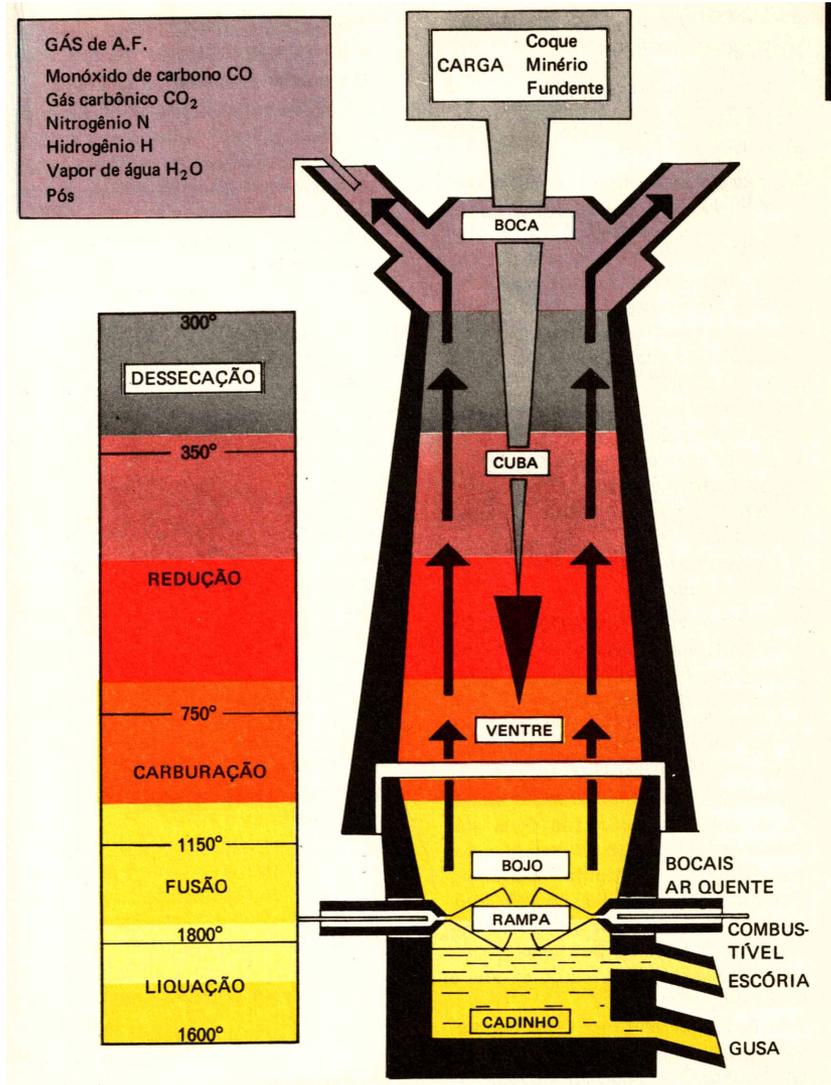
## Processo de redução indireta – ALTO FORNO



O alto-forno e suas instalações anexas

# Processos – Redução dos minérios de ferro

## Processo de redução indireta – ALTO FORNO



# Processos – Redução dos minérios de ferro

## Processo de redução indireta – ALTO FORNO

Ferro-gusa	
Elemento	Faixa de composição [%]
Si	0,5 – 3,0
S	0,035 - 0,050
P	0,040 – 0,40
Mn	1,0 – 2,0
C	3,0 – 4,5
Fe	Balanço

Escória do alto-forno	
Componente	Faixa de composição [%]
SiO <sub>2</sub>	23 a 55
CaO	27 a 55
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5 a 25
MgO	1 a 12
FeO	0,5 a 2
S	0,4 a 1,2

# Processos – Dessulfuração

O ferro gusa gerado nos altos fornos possuem elevados teores de enxofre, elemento indesejável na maioria dos aços e de difícil eliminação nos convertedores.

Para que ocorra condição ideal para a dessulfuração é necessária uma escória bastante básica (rica em CaO) e uma atmosfera redutora (rica em CO). O alto forno possui atmosfera redutora, mas a sua basicidade é limitada para se produzir uma escória líquida e fluida ( $\text{CaO/SiO}_2 = 1,2$ ). No caso da aciaria, temos excesso de cal, mas a atmosfera é oxidante. Portanto, nem o alto forno nem a aciaria possui condições ideais para a dessulfuração.

Por essa razão, o ferro gusa deve ser dessulfurado, ainda nos carros torpedos, antes de seguir para a aciaria, numa estação de dessulfuração onde se cria as condições ideais.

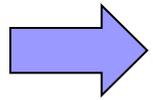
A mistura dessulfurante, na média, é composta por 50% de carbureto, 38% de calcário e 12% de coque. Esse último tem a função de garantir a atmosfera redutora necessária para que as reações ocorram.

O calcário fornece cal para dar uma alta basicidade necessária à dessulfuração e o dióxido de carbono confere agitação ao banho, garantindo maior rendimento e o carbureto é a principal fonte de cálcio e também fornece carbono ao banho.

# Processos – Ferro gusa comercial



# Processos – Fabricação de FoFo e Aço



**FERRO GUSA (ferro bruto ou ferro de 1ª fusão)**

**← FERRO FUNDIDO (FoFo)**

**← AÇO COMUM (Aço Carbono)**

**← AÇOS ESPECIAIS  
(Aço-liga)**

**EXTRA  
OFERTA**

MESA  
DE FERRO  
FUNDIDO

15

x

**3180**

À VISTA

**15900**

TOTAL À PRAZO

CARTÃO EXTRA

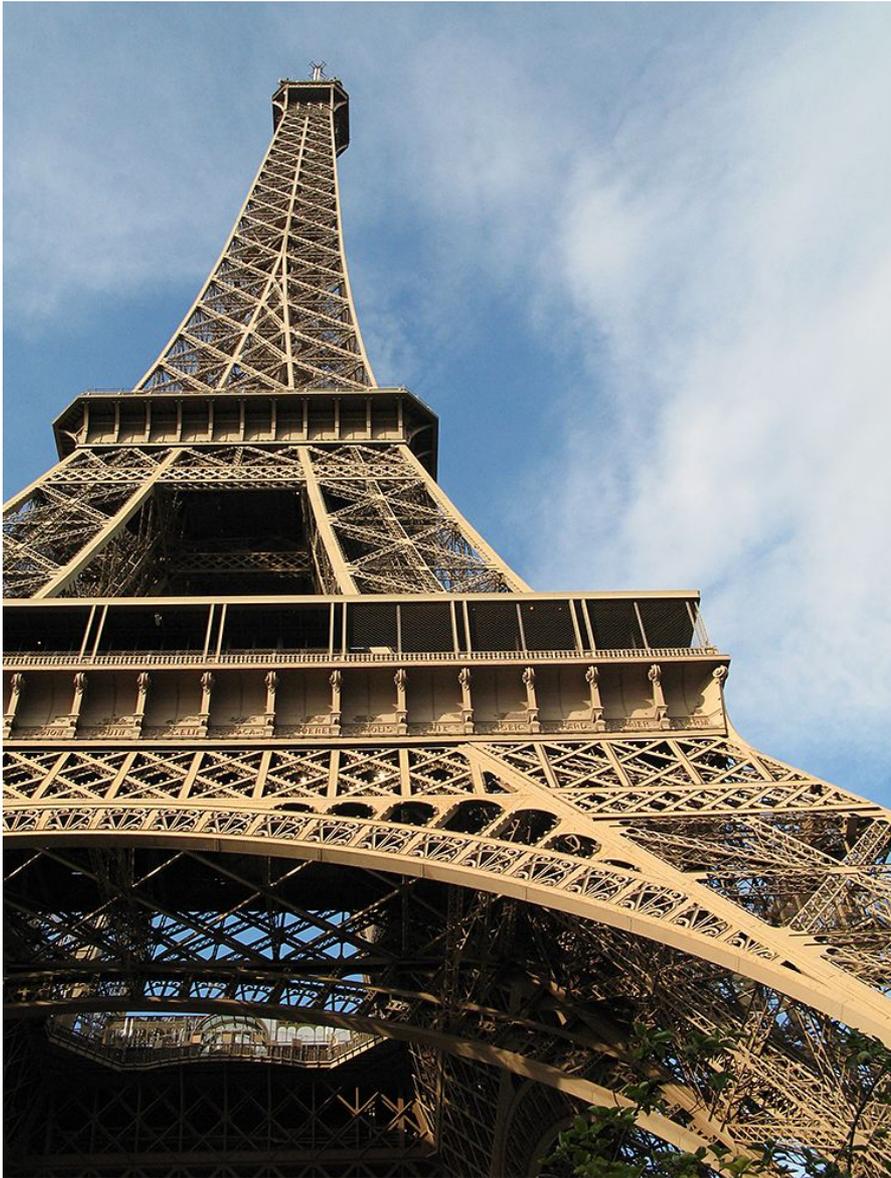
51 JUROS

# Processos – Fabricação de FoFo e Aço

## Ferro Pudlado

- O primeiro gusa fabricado com coque foi produzido em 1708-1709 por Abraham Darby, em Coalbrookdale, na Inglaterra. O gusa obtido em alto fornos usando carvão de pedra ou coque, não era considerado de qualidade, devido ao enxofre que o tornava quebradiço. Somente a disseminação do processo de pudlagem, já conhecido a muito tempo e que adquiriu novo impulso, graças aos trabalhos de Henry Cort em 1784, permitiu mudança nesta convicção. O ferro impuro obtido era refundido em forno de soleira rasa (de reverbero), entrando em contato com os gases oxidantes. Mediante a agitação por meio de barras (to puddle, em inglês), todo o banho entrava em contato com o oxigênio dos gases e assim, gradualmente, queimava-se o carbono e o gusa transformava-se em ferro pudlado (ferro doce). O banho líquido transformava-se pouco a pouco em massa pastosa que, no final, se tornava tão consistente que era possível retirar bolos ou "lupas", que eram a seguir marteladas em barras. Após uma hora e meia de trabalho eram obtidos 220 a 250 kg de aço doce.

# Processos – Fabricação de FoFo e Aço



A Torre Eiffel foi construída com ferro pudlado

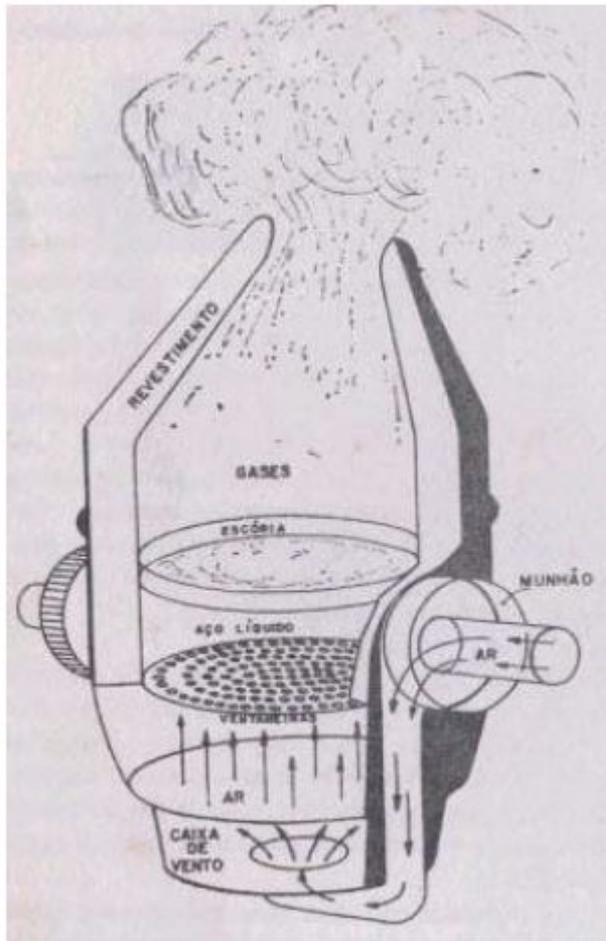
# Processos – Fabricação de FoFo e Aço

## Processo Bessemer

- O processo Bessemer foi desenvolvido paralelamente por William Kelly e Henry Bessemer mas este último conseguiu a patente do processo pelo qual a descarbonetação do gusa era feita num vaso em forma de pêra (semelhante ao de cadinho, com uma tampa através do qual passava um tubo central de argila, para soprar o ar através do metal líquido). Com esse processo foi possível conseguir, no mesmo espaço de tempo, 200 vezes mais aço que no processo de pudlagem.
- O processo Bessemer, desenvolvido inicialmente utilizando-se gusa importado da Suécia, teve insucesso completo ao se tentar aplicá-lo aos gusas produzidos na Inglaterra, com elevado teor de fósforo que, não sendo eliminado, tornava o aço quebradiço e frágil. Mediante um revestimento de dolomita é que foi possível, em 1878, utilizar esse processo aos gusas contendo elevado teor de fósforo.

# Processos – Fabricação de FoFo e Aço

## Processo Bessemer



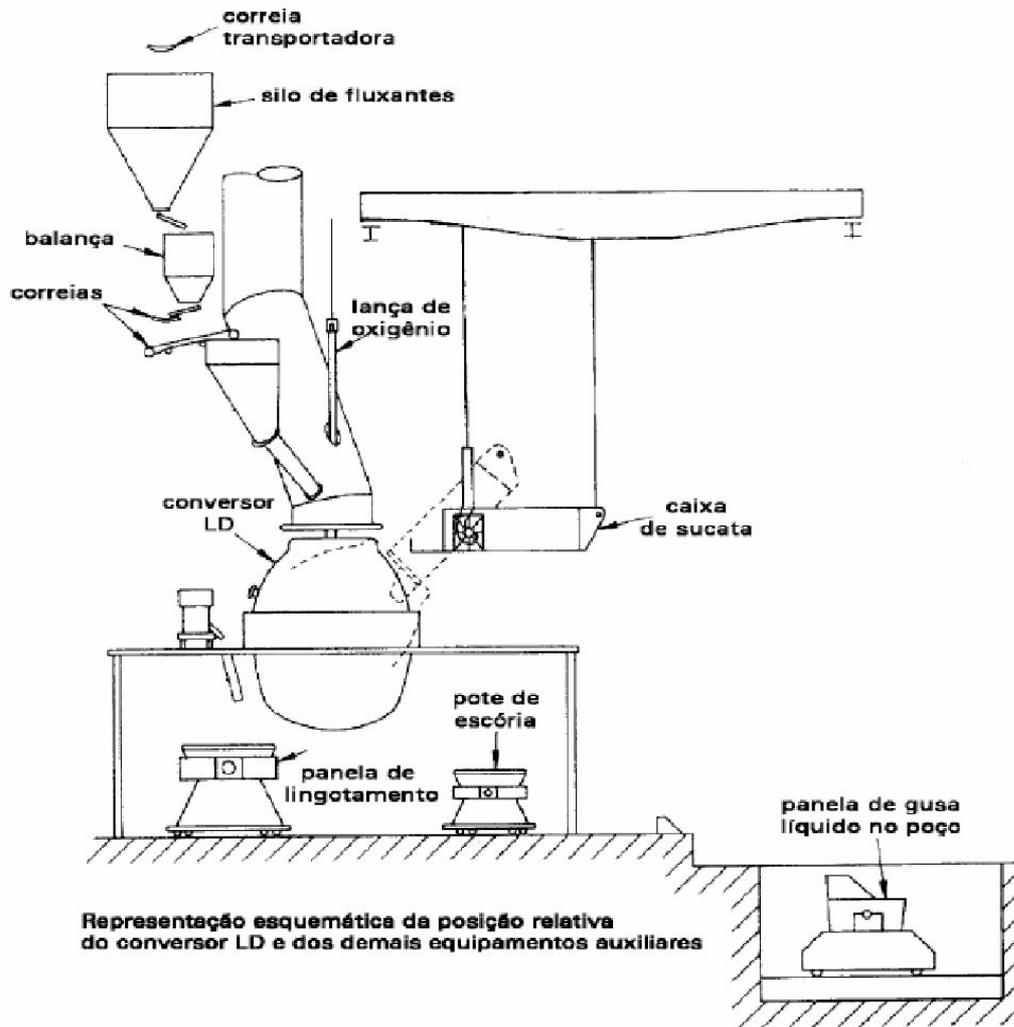
# Processos – Fabricação de FoFo e Aço

## Processo LD

- O **Conversor a Oxigênio** ou **Processo Linz-Donawitz** é o processo mais comum para a produção de aço atualmente.
- Nos conversores a oxigênio são fabricados mais de 50% da produção mundial de aço. No Brasil eles também são amplamente utilizados.
- A carga desse conversor é constituída de ferro gusa líquido, sucata de ferro, minério de ferro e aditivos (fundentes). Com uma lança refrigerada com água, injeta-se oxigênio puro a uma pressão de 4 a 12 bar no conversor.
- A oxidação do carbono e dos acompanhantes do ferro libera grande quantidade de calor. Para neutralizar essa elevada temperatura que prejudicaria o refratário, adiciona-se sucata ou minério de ferro.
- [[Pela adição de fundentes como a cal, os acompanhantes do ferro como o manganês, silício, fósforo]] e enxofre unem-se formando a escória.
- Para aumentar a qualidade do aço, adicionam-se os elementos de liga no final do processo ou quando o aço está sendo vertido na panela, já pronto.
- Os aços produzidos no LD não contém nitrogênio pois não se injeta ar, daí a alta qualidade obtida. Esse conversor oferece vantagens econômicas sobre os conversores do processo de Bessemer

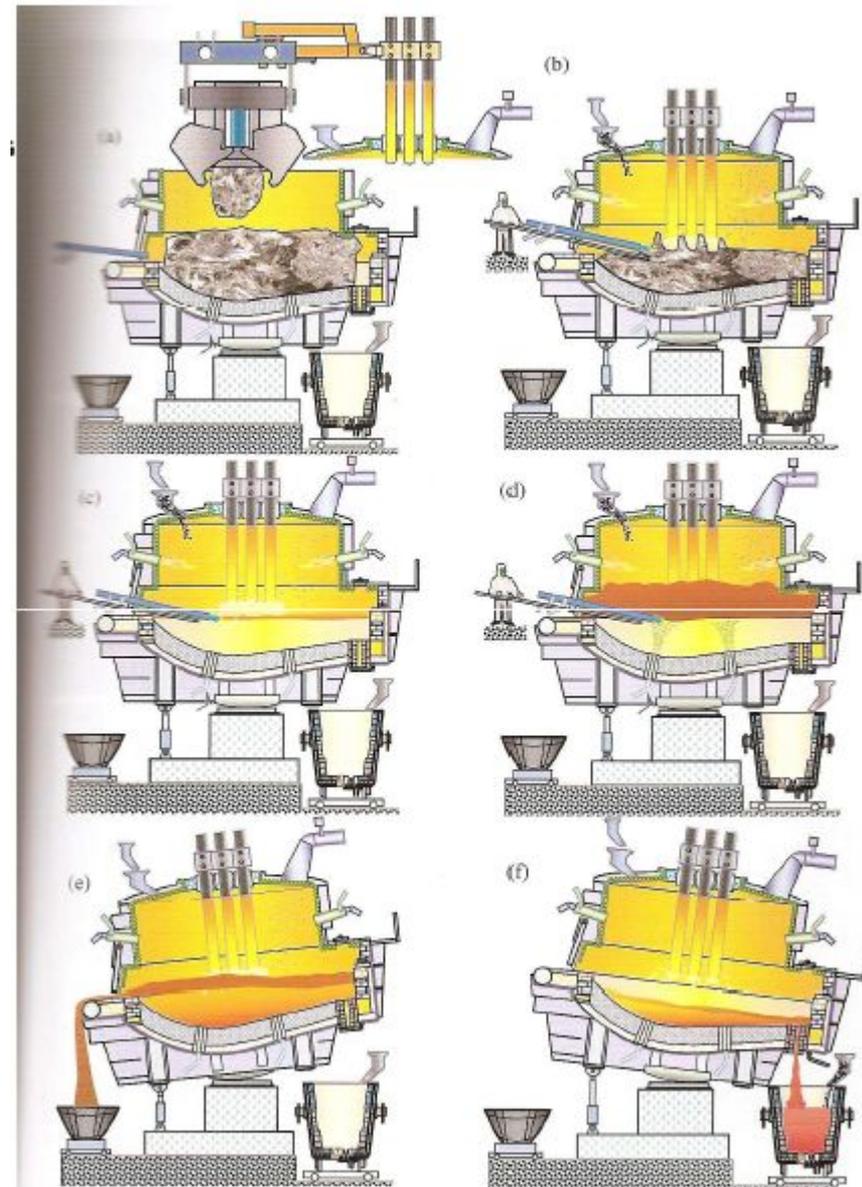
# Processos – Fabricação de FoFo e Aço

## Processo LD



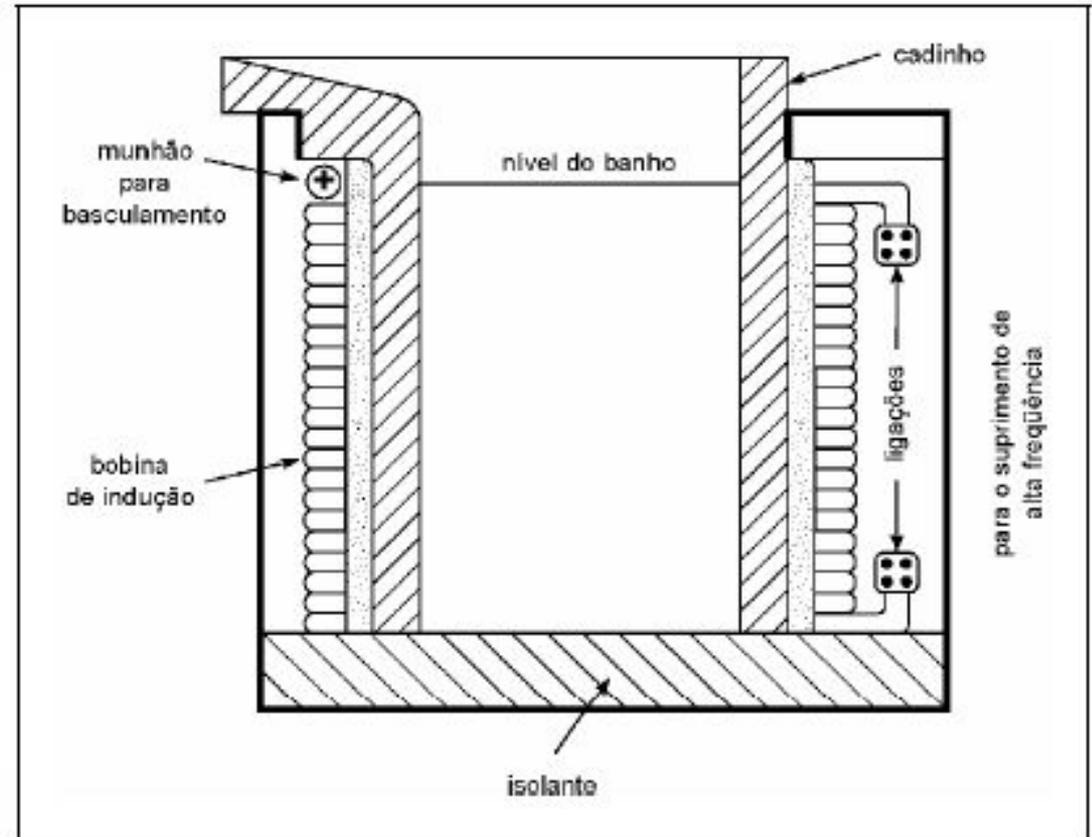
# Processos – Fabricação de FoFo e Aço

## Forno a arco elétrico



# Processos – Fabricação de FoFo e Aço

## Forno a indução



# Processos – Fabricação de FoFo e Aço

## Comparativo

Tipo de forno	Combustível	Tipo de carga	Capacidade de carga	Vantagens	Desvantagens
Conversor Bessemer	Injeção de ar comprimido.	Gusa líquido.	10 a 40 ton.	Ciclo curto de processamento (10 a 20 minutos).	Impossibilidade de controle do teor de carbono.  Elevado teor de óxido de ferro e nitrogênio no aço.  Gera poeira composta de óxido de ferro, gases e escória.
Conversor Thomas	Injeção de ar comprimido.	Gusa líquido, cal.	Em torno de 50 ton.	Alta capacidade de produção.  Permite usar gusa com alto teor de fósforo.	O gusa deve ter baixo teor de silício e enxofre.  Elevado teor de óxido de ferro e nitrogênio no aço.  Gera poeira composta de óxido de ferro, gases e escória.
Conversor LD	Injeção de oxigênio puro sob alta pressão.	Gusa líquido, cal.	100 ton.	Mínima contaminação por nitrogênio.	Gera poeira composta de óxido de ferro, gases e escória.
Forno a arco elétrico.	Calor gerado por arco elétrico.	Sucata de aço + gusa, minério de ferro, cal.	40 a 70 ton.	Temperaturas mais altas. Rigoroso controle da composição química. Bom aproveitamento térmico.	Pequena capacidade dos fornos.  Custo operacional.
Forno de indução	Calor gerado por corrente induzida dentro da própria carga.	Sucata de aço.	Em torno de 8 ton.	Fusão rápida. Exclusão de gases. Alta eficiência.	Pequena capacidade dos fornos. Custo operacional.



Tem mais???

Não!!! CAAABÔÔÔÔ!!!...