

Redução de Minério de Ferro

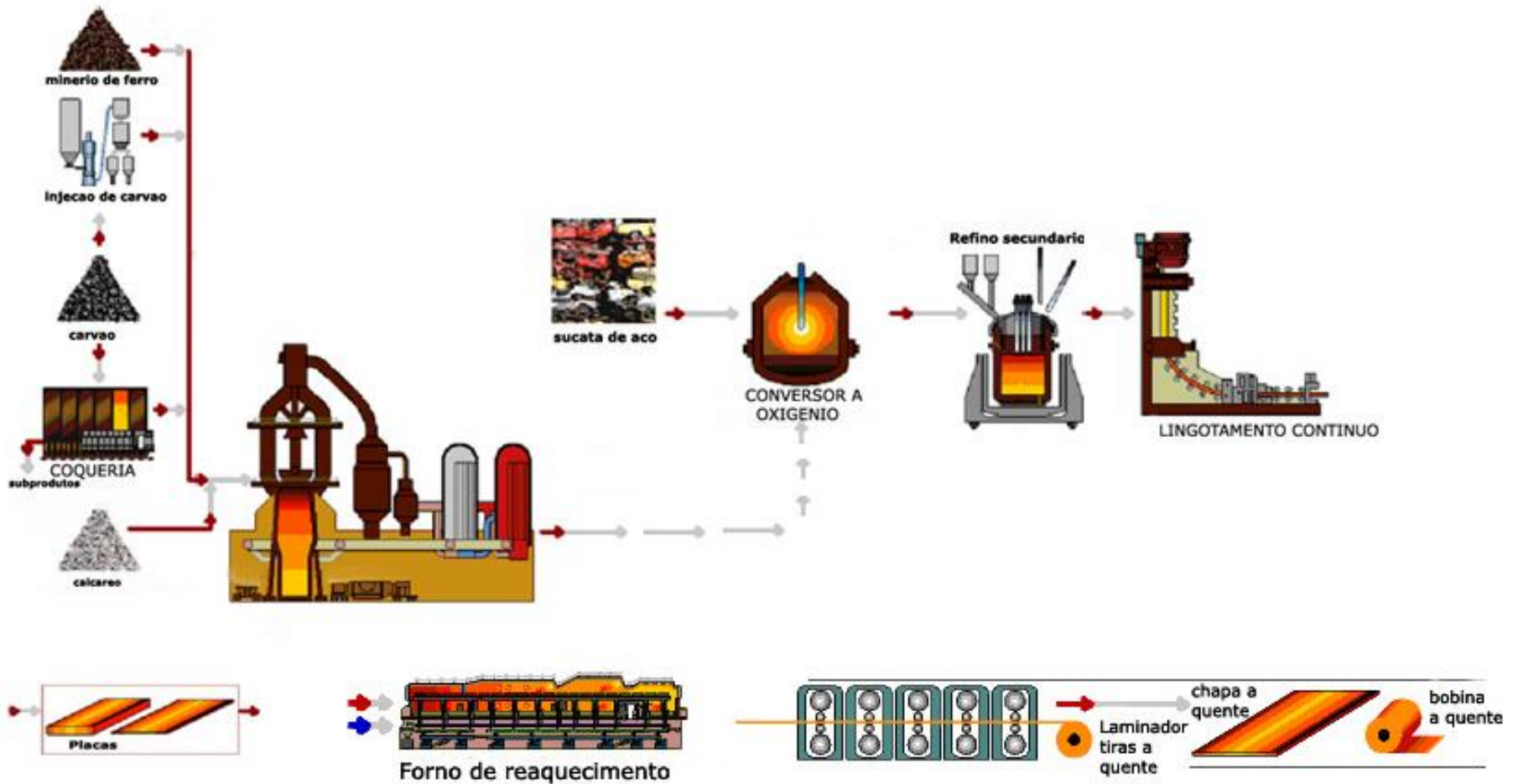
Redução Direta e Processos Emergentes

Usinas integradas

fonte de ferro : minério

redução em alto forno

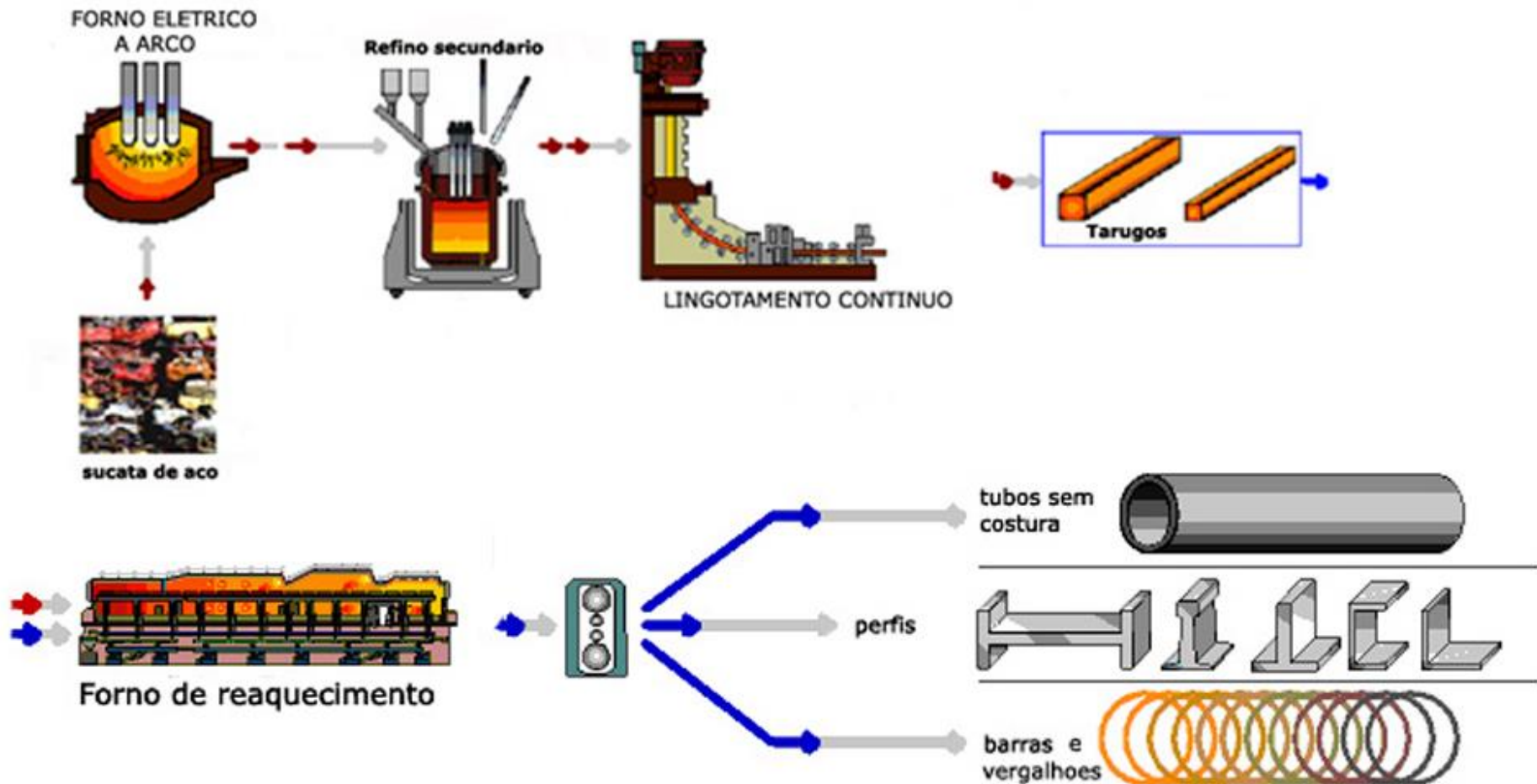
redutor e combustível de carvão fóssil coqueificável



Usinas semi-integradas

Fonte de ferro: sucata

Energia elétrica



Características do processo em Alto-Forno

- alta escala de produção (maior que 1.5 Mt/ano)
- necessidade de aglomeração do minério
- necessidade de coque metalúrgico
- degradação do meio ambiente

Teores de elementos residuais em sucata

Typical Residuals in Scrap [6], DRI, Pig Iron, Residual Limits in Steel Products

<u>typical residuals level</u> (Cu + Ni + Cr + Mo + Sn)		<u>maximum residuals level</u> (Cu + Ni + Cr + Mo)	
Metallic		Steel product	
DRI, HBI	0.01	tin plate	0.12
Pig Iron	0.07	enameling quality sheet	0.12
Scrap		deep drawing sheet	0.14
<u>Prompt</u>		drawing quality sheet	0.16
# 1 dealer bundles	0.10	Commercial quality sheet	0.22
# 1 factory bundles	0.10	wire rod	0.25
turnings	0.90	SBQ	0.35
<u>Obsolete</u>		merchant bar	0.50
# 1 heavy melting	0.50	rebar, structural	-
# 2 heavy melting	0.75		
# 2 bundles	0.90		

Processo Ideal de Redução

A dez anos atrás

- usar finos de minério diretamente
- usar qualquer tipo de carvão
- eliminar etapas do processamento
- ser o mais contínuo possível
- minimizar a dissolução de carbono e a incorporação de silício, permitindo eliminar etapas de refino
- adaptável para diferentes matérias primas e diferentes níveis de produção,
- baixo custo de capital
- baixo custo operacional

Hoje

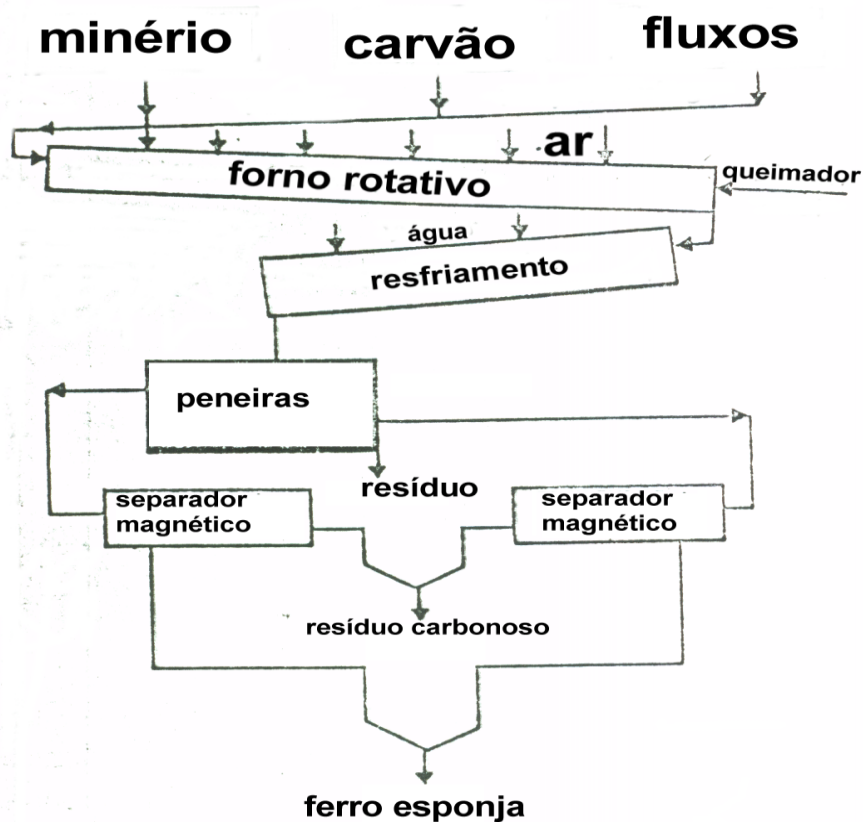
- Minimizar geração e emissão de CO₂ e outros gases de efeito estufa

Processos de Redução Direta

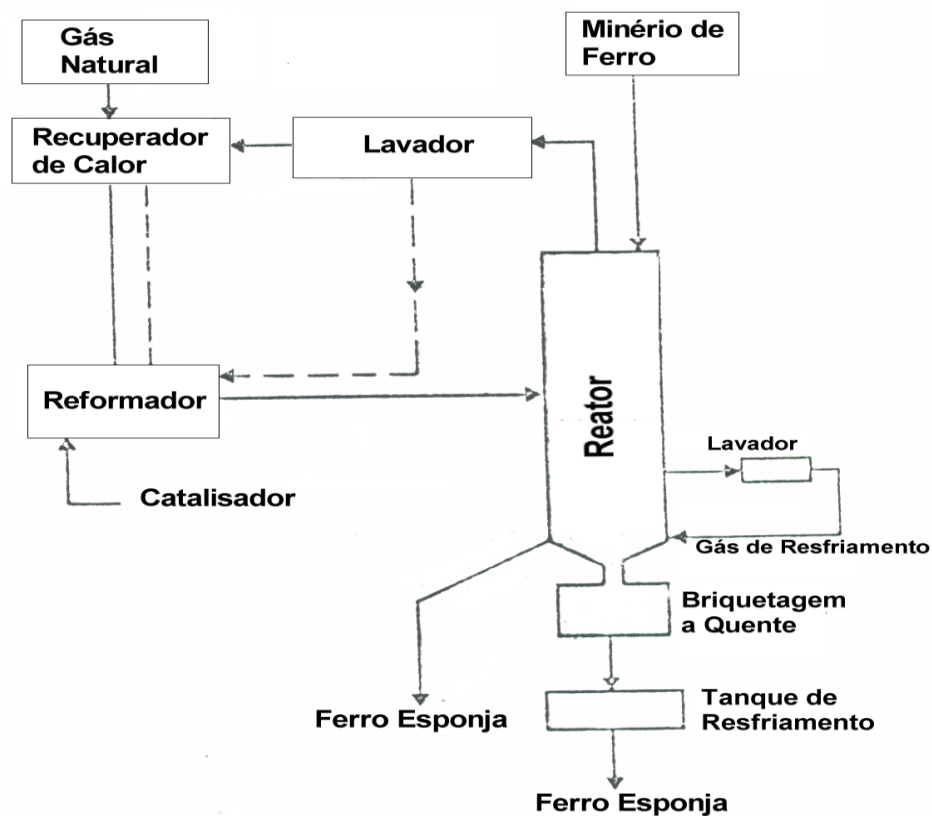
- a redução do minério de ferro a ferro metálico é efetuada sem que ocorra a fusão da carga do reator.
- o produto metálico é obtido na fase sólida
- é chamado de ferro-esponja (DRI, em inglês, iniciais de Direct Reduced Iron)
- pode ser briquetado a quente, obtendo-se o briquete (HBI)
- o ferro-esponja é usado em fornos elétricos para obtenção de aço.

Processos de Redução Direta

Processo a Carvão



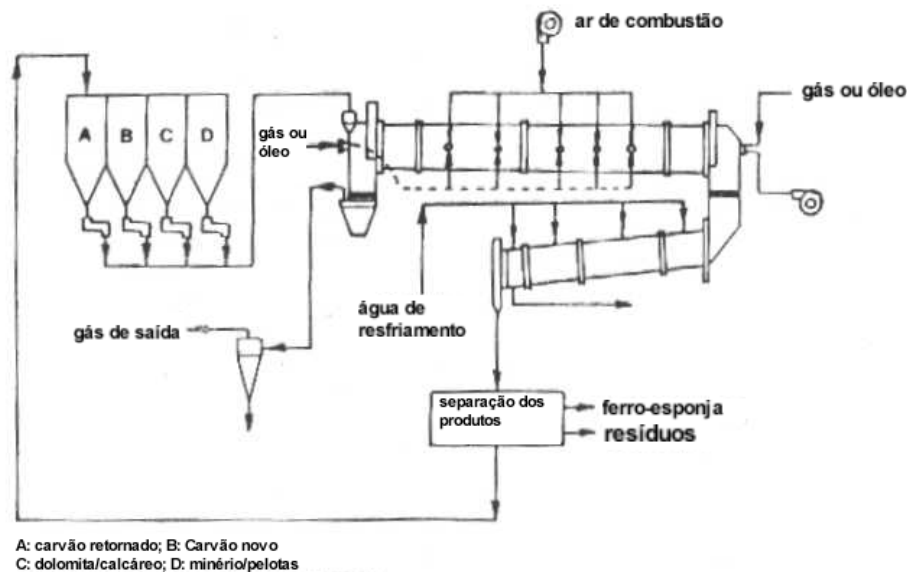
Processo a Gás Natural



Processos a carvão em forno rotativo: SL/RN

redução ocorre por sub-processos

- a) formação de gás redutor: $C_{\text{redutor}} + CO_{2(g)} = 2 CO$
- b) redução dos óxidos de ferro: $Fe_nO_m + m CO = n Fe + m CO_2$
- c) O ar admitido ao longo do forno queima o CO: $CO + 1/2 O_2 = CO_2$
- Reação global: $Fe_nO_m + m/2 C = n Fe + m/2 CO$



Forno rotativo-processo a carvão



Processos a Gás Natural

Gás Natural – basicamente metano, CH₄

Bom combustível

Decompõe-se acima de 500 °C

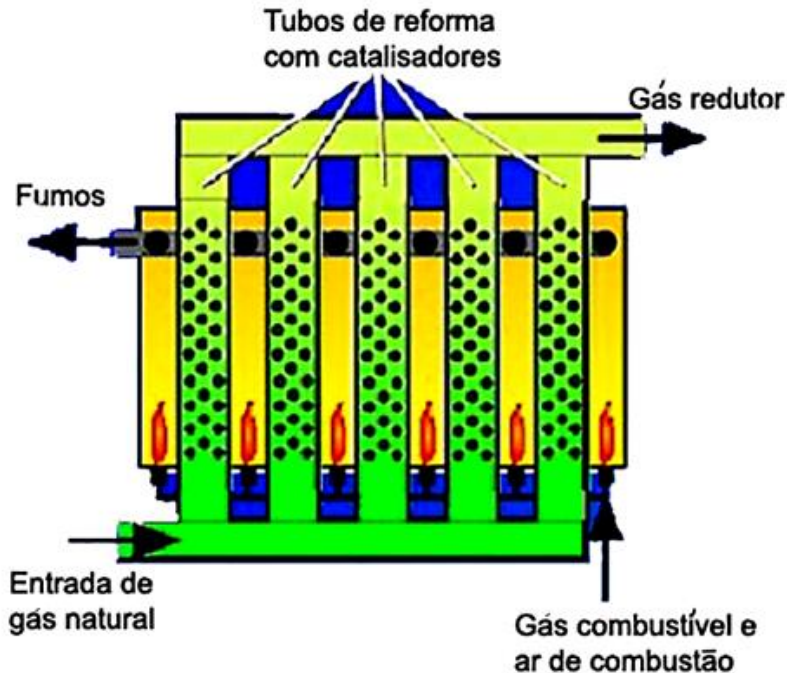
Como redutor, precisa ser transformado em monóxido de carbono (CO) e hidrogênio H₂

processos industriais que utilizam gás natural

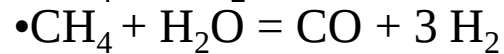
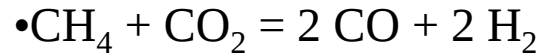
processos em reatores verticais, MIDREX e HyL III

processos em leito fluidizado (FIOR, Finmet)

Reforma de gás natural



- gás natural reage com CO_2 e H_2O através das reações:

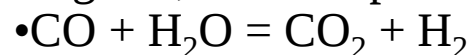


- reações endotérmicas (favorecidas a altas temperaturas)

- realizadas entre 950°C e 1000°C com catalisadores de níquel

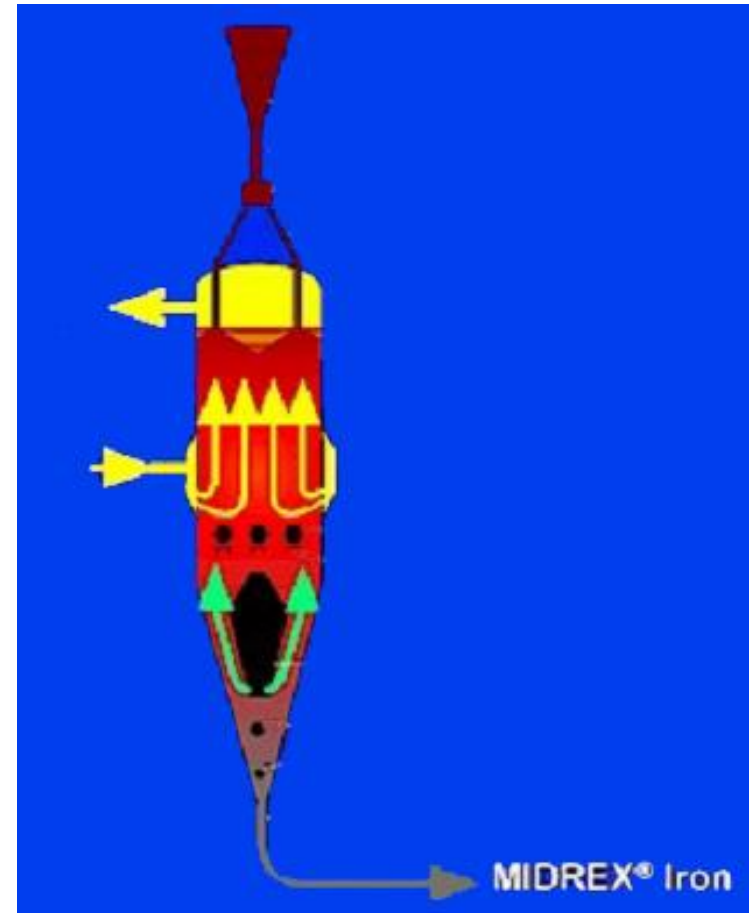
- Em redução direta, os produtos da redução contêm CO_2 e H_2O , podem ser recirculados e usados nas reações de reforma.

- proporção entre CO e H_2 no gás reformado é controlada pela proporção de CO_2 e H_2O no gás reagente, limitada por :



Processo MIDREX

- gás redutor: 95% de ($\text{CO} + \text{H}_2$) entre 860 e 900°C
- ascende em contra-corrente com a carga (minério bitolado ou pelotas)
- gás de topo 70% de ($\text{CO} + \text{H}_2$), mais CO_2 e H_2O . Retorna ao reformador como gás reagente e/ou combustível.
- ferro-esponja resfriado antes da descarga com mistura gasosa de gás de saída lavado (para remoção de H_2O) com gás natural

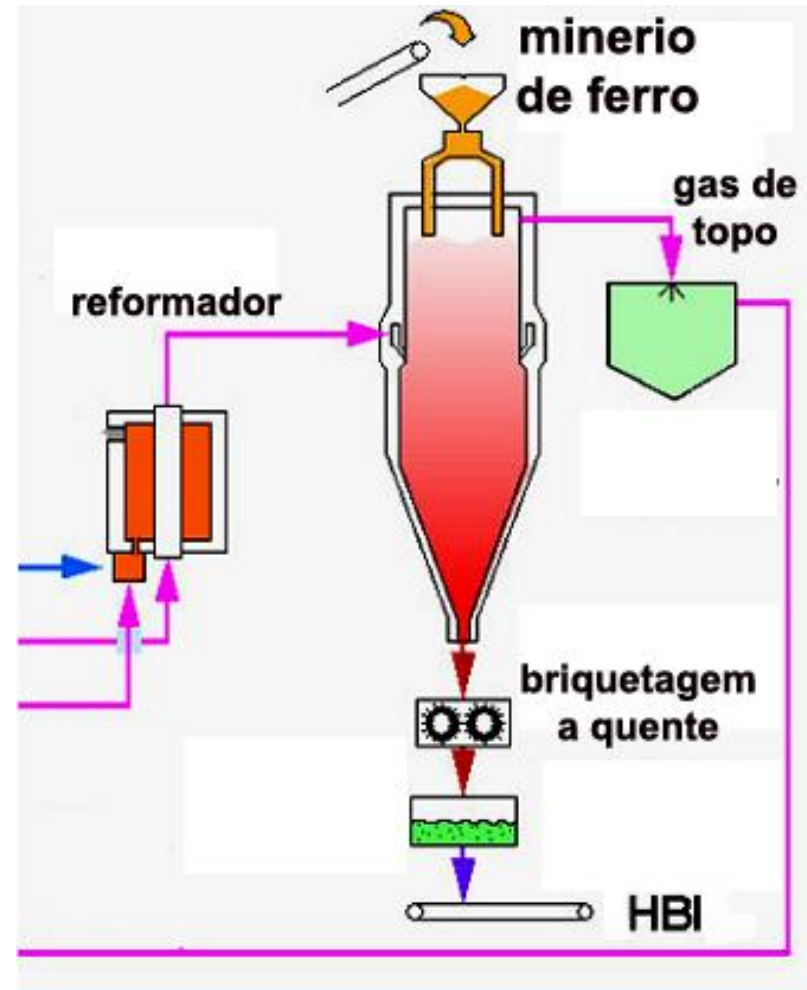


Processo MIDREX

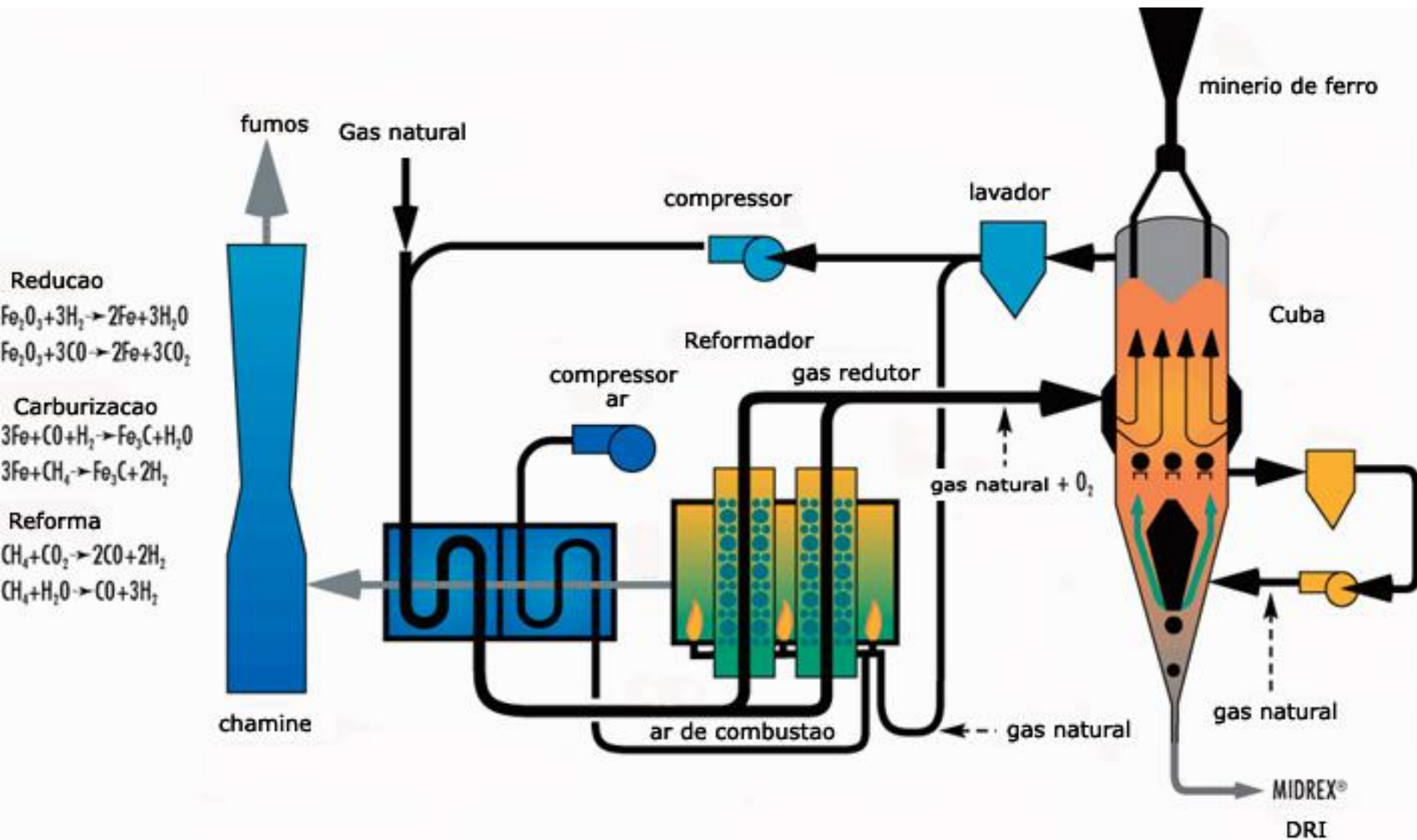
- carbura o ferro-esponja entre 1,4% e 1,7 % de carbono, diminui a possibilidade de reoxidação e auxilia na etapa posterior de fusão em forno elétrico.
- pode-se fazer a briquetagem a quente do ferro-esponja,
- O grau de metalização do ferro-esponja, é definido como

$$G_M = \frac{\%Fe_{metalico}}{\%Fe_{total}} \times 100$$

- procura-se $G_M > 92\%$
- tempos de residência usuais em torno de 6 horas.
- produtividade dos processos de reatores verticais a gás varia de 9 a 12 t/m³/dia.



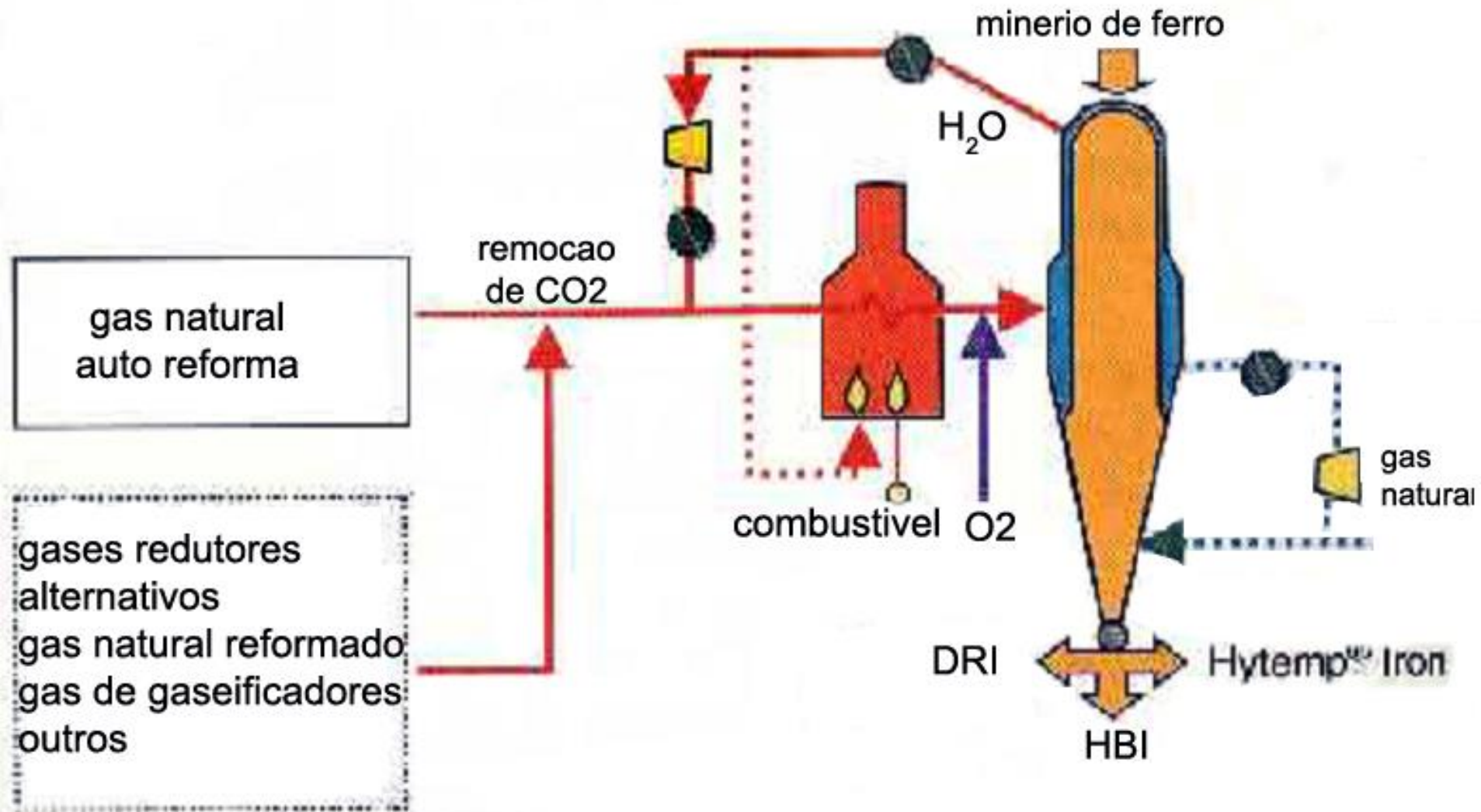
Processo MIDREX



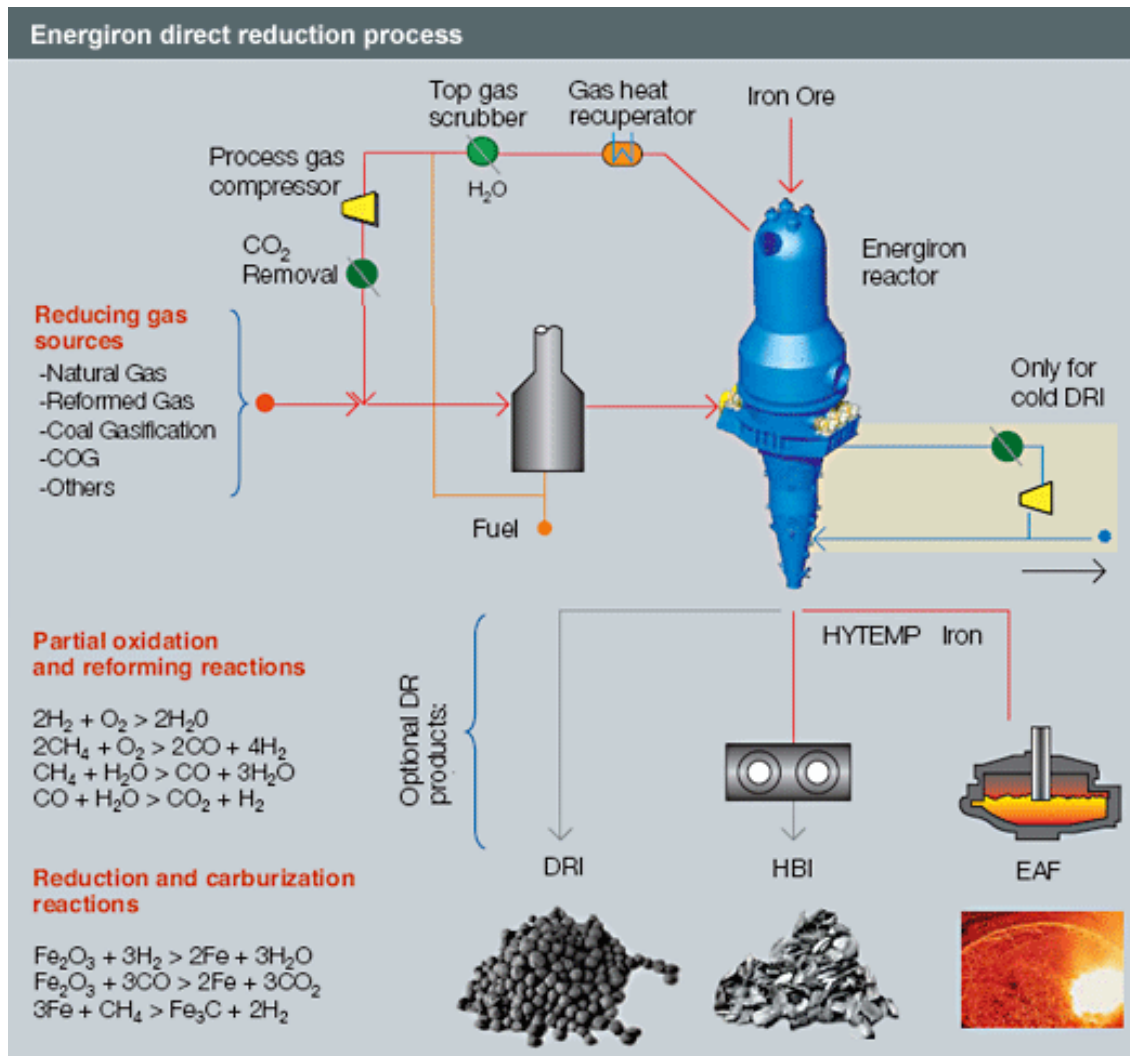
Midrex Misurata



Processo HyL-Energiron



Processo Energiron

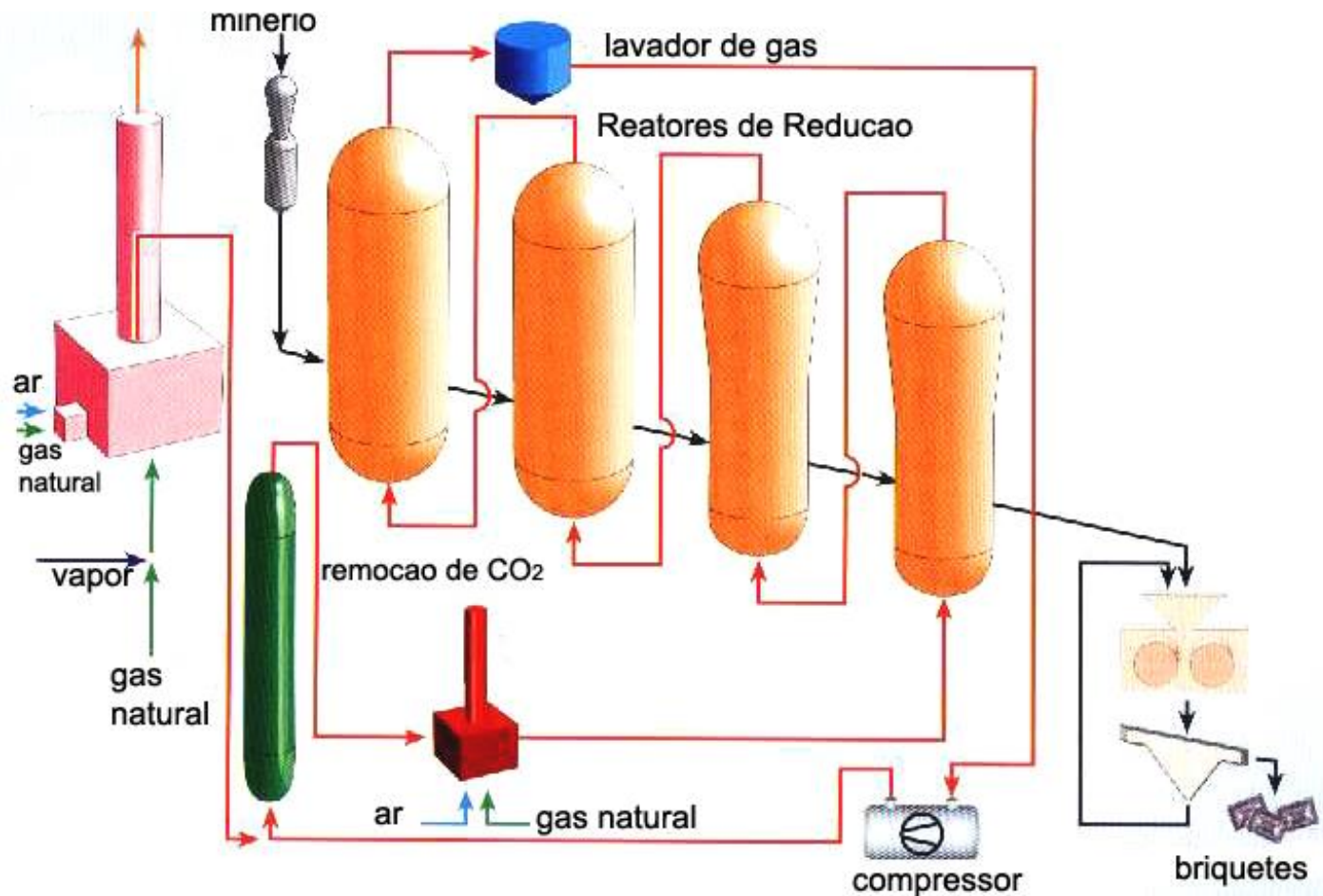


Ferro-esponja (DRI) Briquetes a quente (HBI)



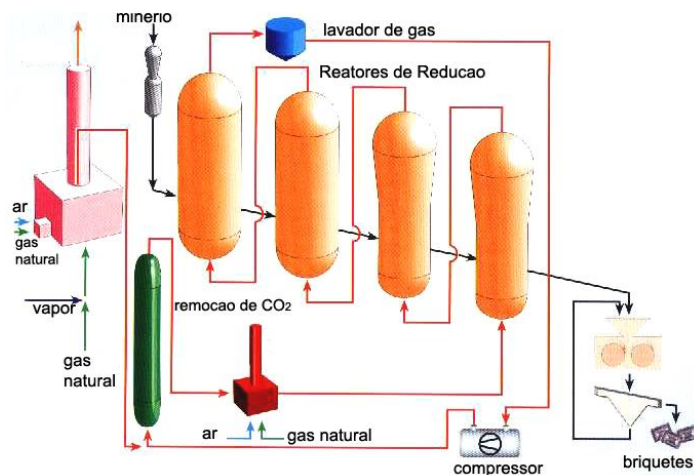
Processos em Leito Fluidizado

- minério de ferro fino é reduzido em uma série de reatores de leito fluidizado



Processos em Leito Fluidizado

- fluxo de gases é tal que a perda de carga na camada iguala o peso da mesma, por unidade de área, causando a expansão da camada sólida (aumento de porosidade) e a flutuação das partículas no fluxo gasoso
- permite um ótimo contato gás-sólido, e altas velocidades de reação, devido ao alto coeficiente de transporte de massa e a alta área da superfície de reação.
- Este princípio foi aplicado ao processo FIOR, que foi recentemente aperfeiçoado, resultando no novo processo FINMET
- os reatores de redução trabalham a pressões entre 10 e 12 bar

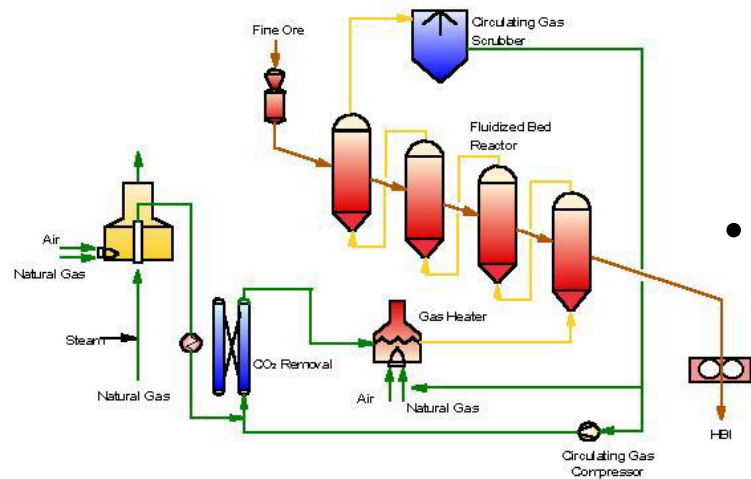


Processos em Leito Fluidizado

- o minério é pre-aquecido no primeiro reator pelo gás proveniente do reator precedente na série. Após um certo tempo de permanência, o minério parcialmente reduzido é transferido ao reator seguinte por linha de transporte
- O minério é progressivamente reduzido e aquecido em cada reator subsequente até que o grau de metalização desejado (entre 91 e 92%) seja alcançado. É então descarregado e briquetado a quente.
- O gás de processo é gerado pela reforma catalítica de gás natural com vapor d'água, e é aquecido a 830°C antes de entrar na série de reatores em direção oposta àquela do minério.

Após sair do sistema, o gás é lavado e resfriado antes de ser reciclado no processo.

.



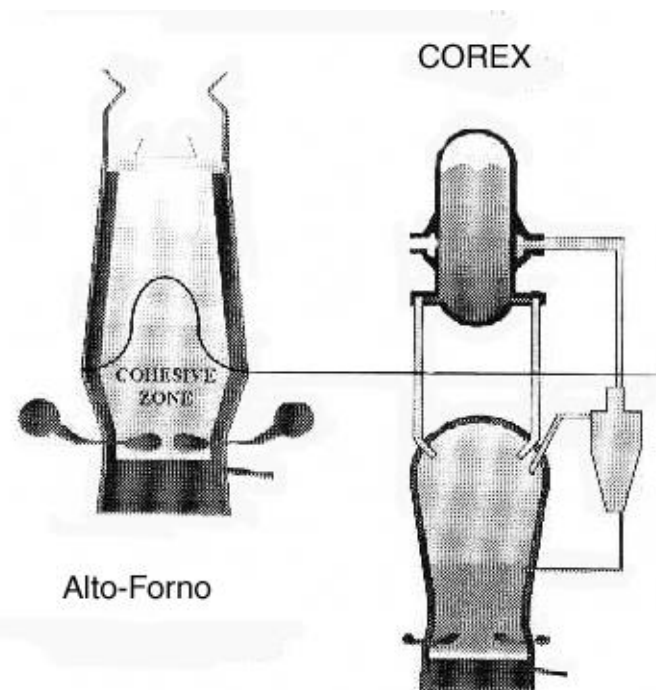


FINMET BHP, Australia

Processos emergentes que produzem ferro-gusa líquido:

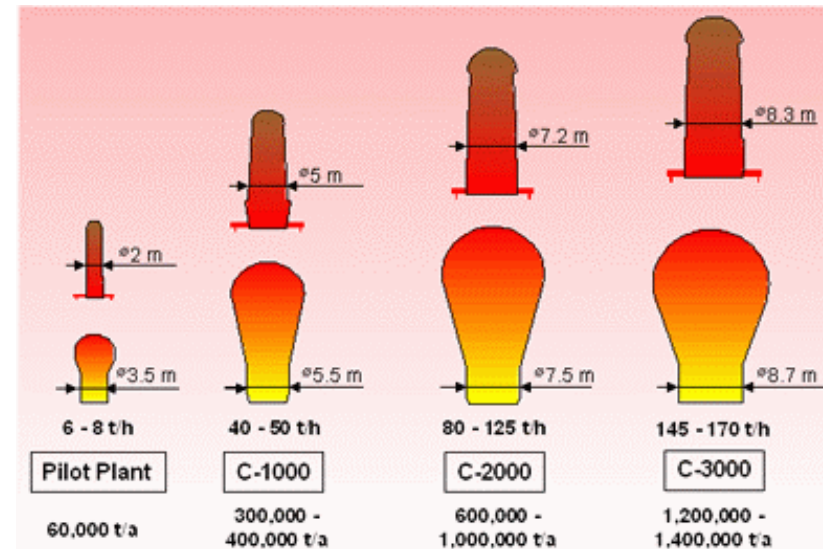
Processo COREX

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

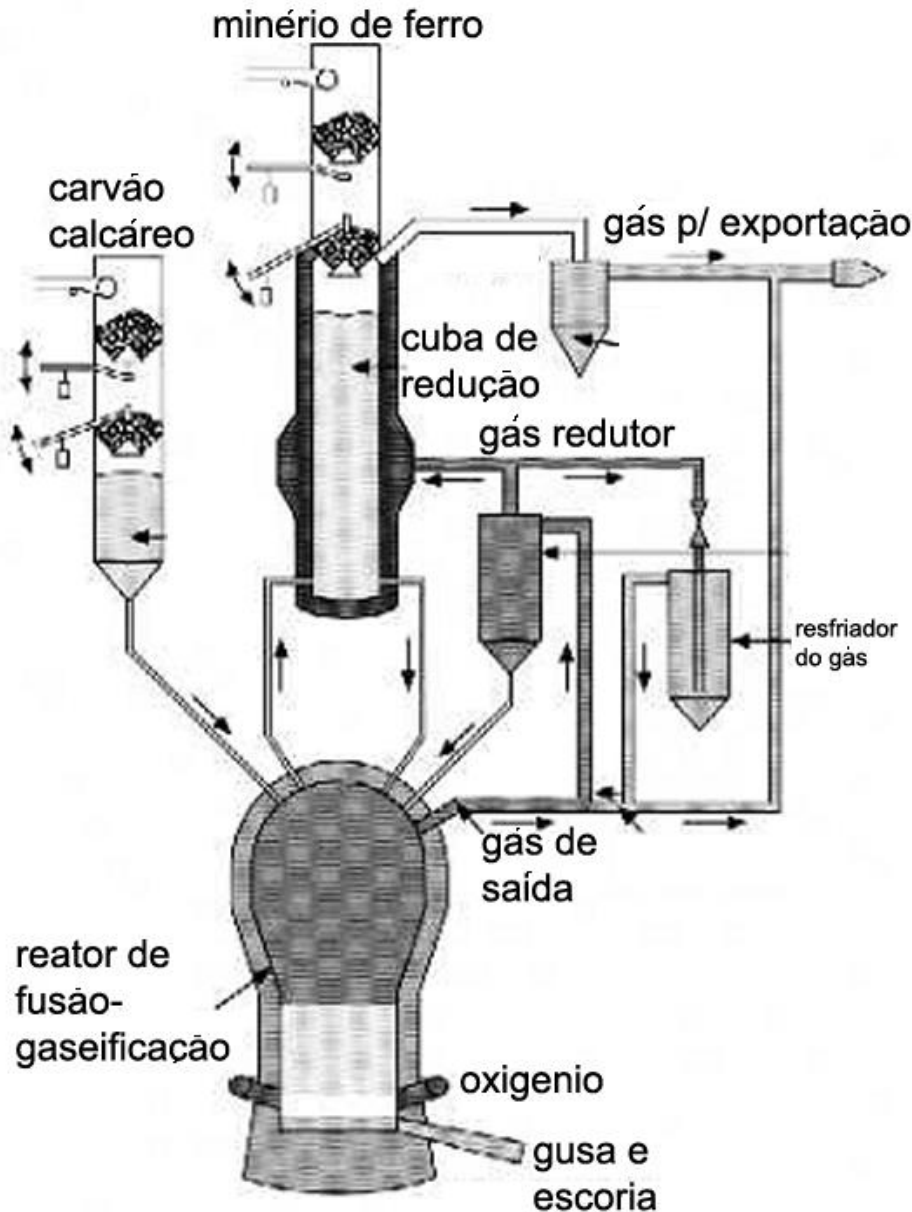


Processo COREX

- não há a necessidade de uma cama de coque, que no alto-forno garante a permeabilidade da zona coesiva, permitindo a utilização de carvões não-coqueificáveis.
- O COREX utiliza oxigênio puro nas ventaneiras do reator de fusão-gaseificação ao invés de ar quente usado nos altos-fornos.
- O gás produzido no reator de fusão-gaseificação, que é constituído basicamente de CO e H₂, deixa o reator entre 1000 e 1050°C, destruindo qualquer sub-produto indesejável da gaseificação do carvão, como alcatrão, fenóis, etc.



Processo COREX

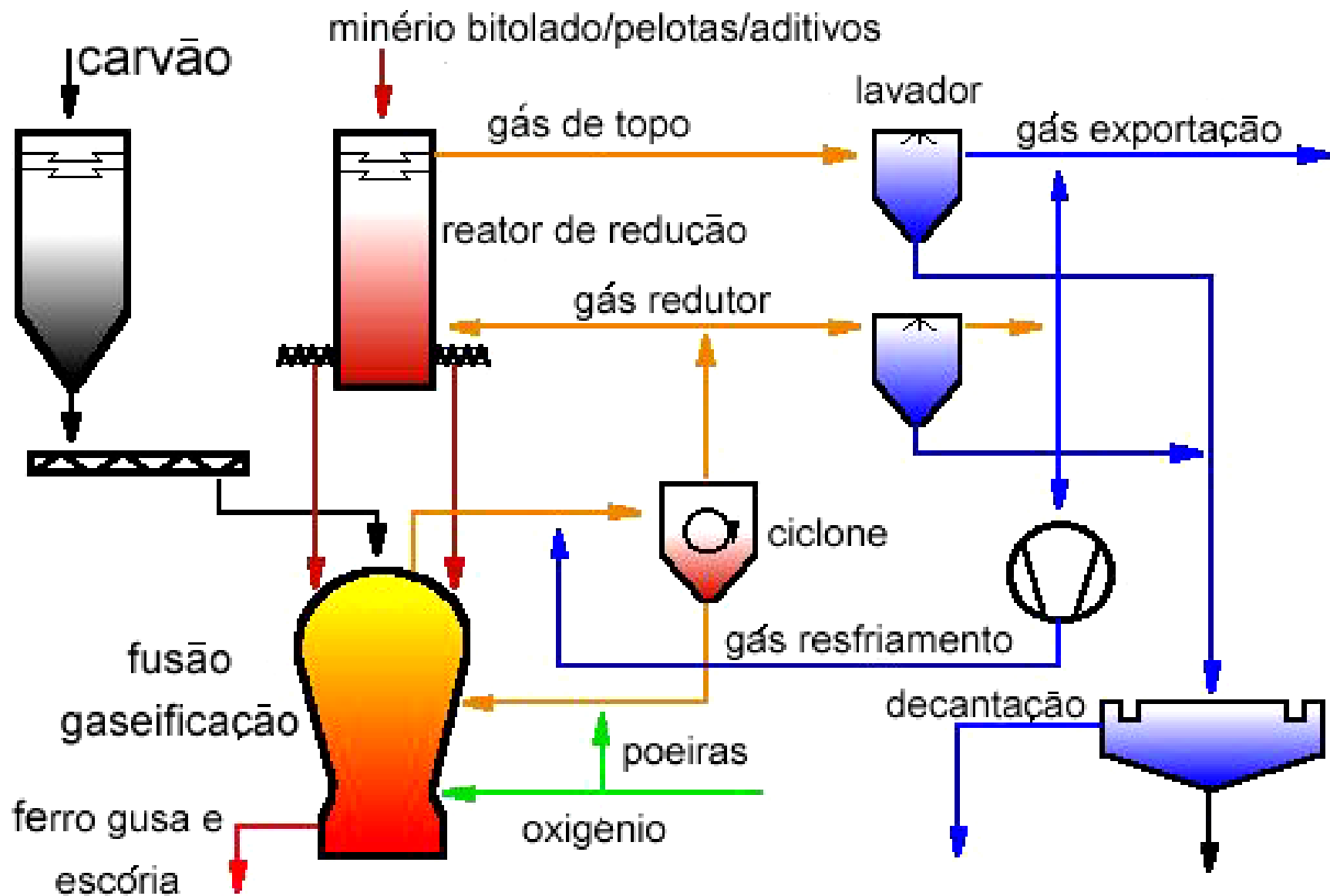


—Antes de entrar na cuba de redução, é resfriado a 800-850 °C, e despoeirado.

—O gás de saída do forno de redução é resfriado e limpo, obtendo-se gás para venda ou utilização posterior.

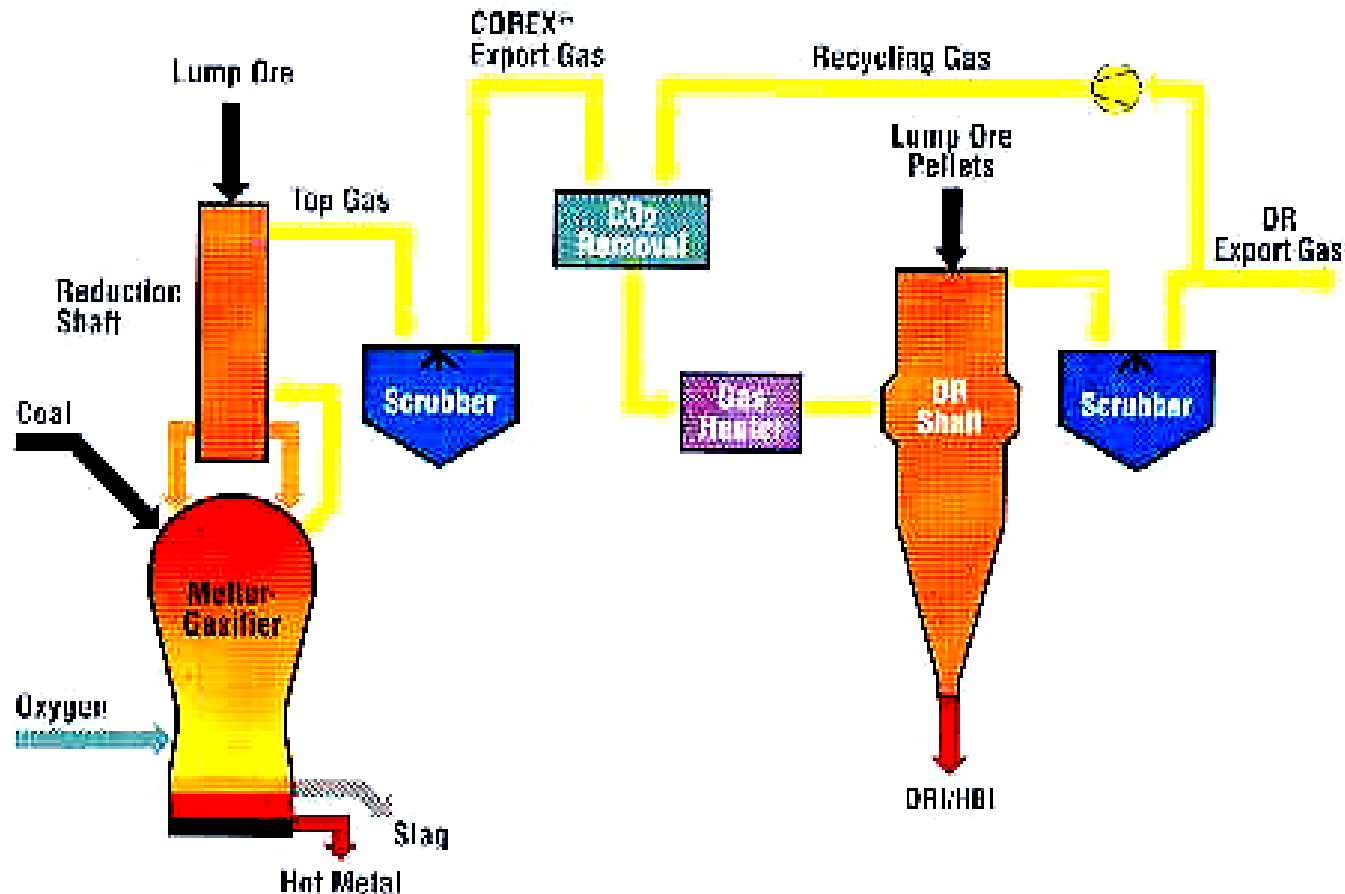
—o gás tem alto poder calorífico, o dobro do gás de alto-forno, e pode (e deve) ser usado para geração de eletricidade, ou como gás redutor para produção de ferro-esponja ou para aquecimento em geral.

Processo COREX



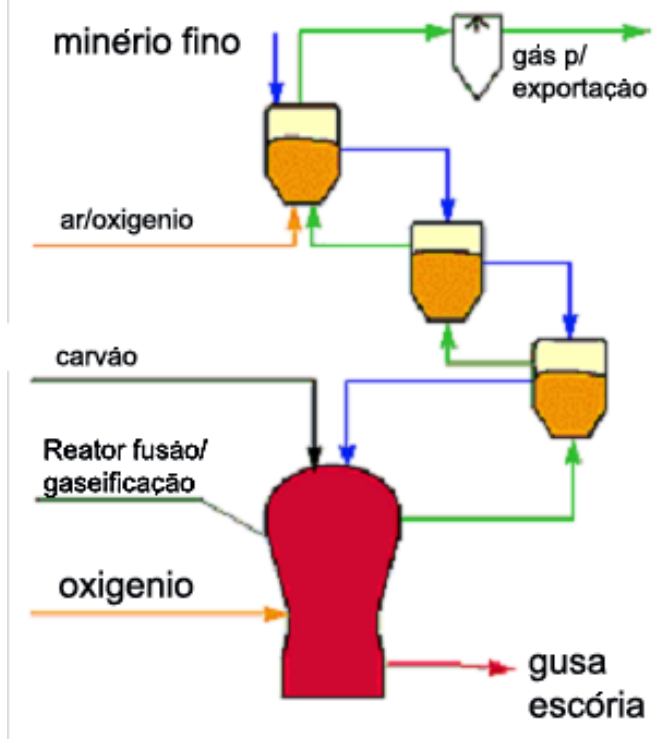
COREX conjugado a redução direta

- O gás de topo do Corex pode ser usado como gás redutor em um módulo de redução direta tipo Midrex ou HyL. O conjunto produz ferro-gusa e ferro-esponja.

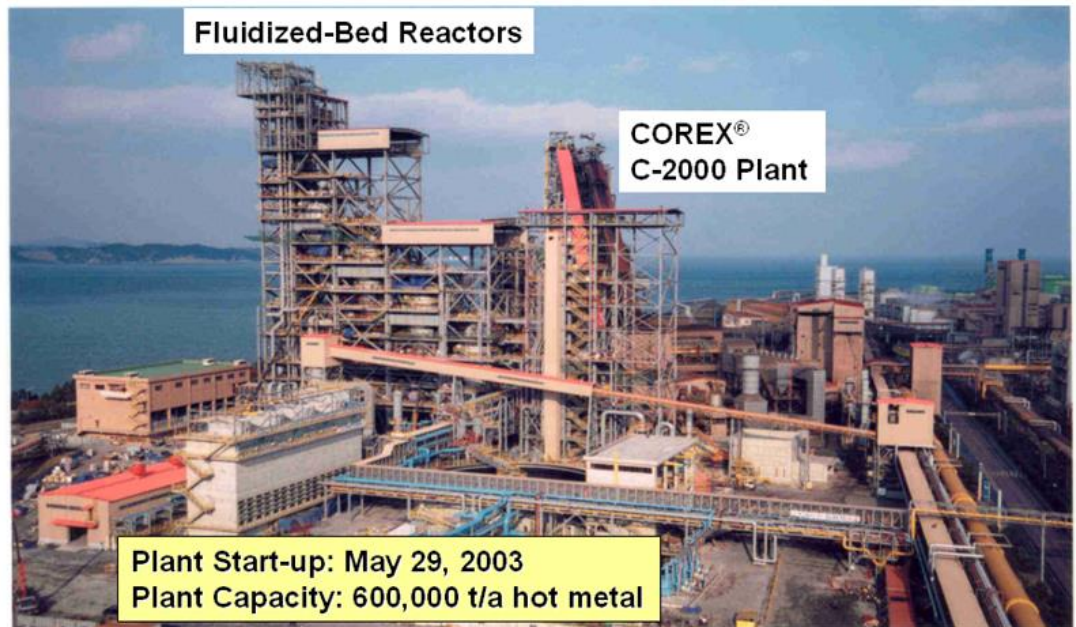


Combined Hot Metal and DRI Production

Finex: Corex com redução por leito fluidizado



FINEX® F-2000 Demonstration Plant, POSCO/Korea





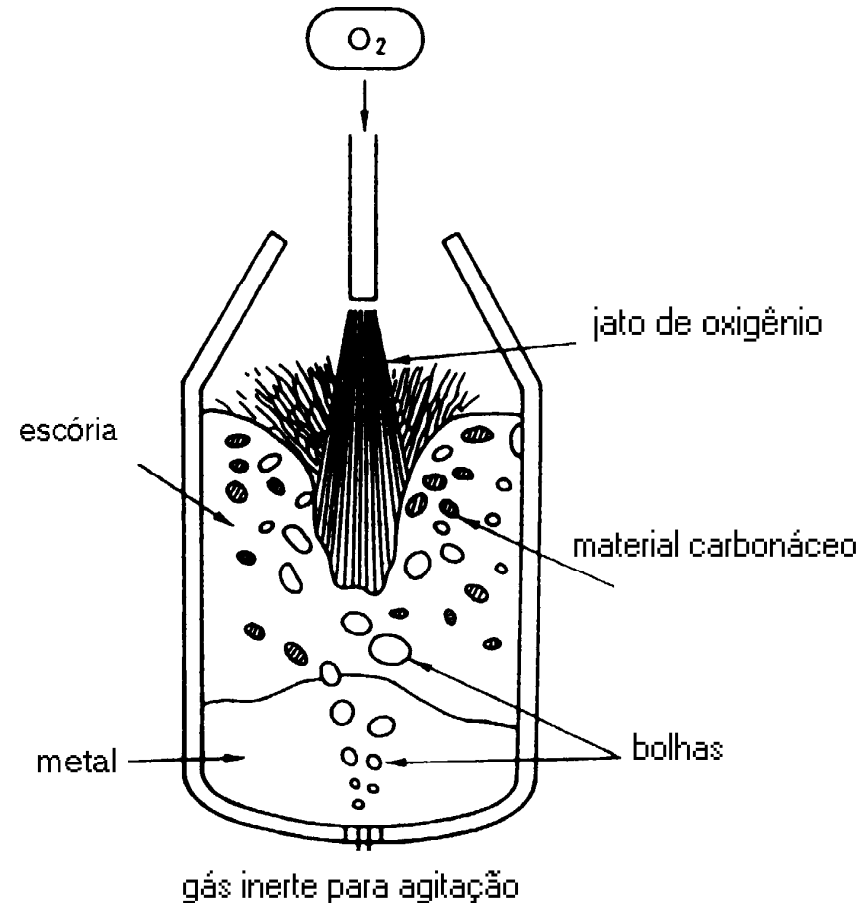
Corex Saldanha Steel, Africa do Sul

Processos de Redução em Fase Líquida (fusão-redução, smelting-reduction, in-bath process)

—minério de ferro adicionado por cima a reator contendo banho líquido de ferro com carbono dissolvido

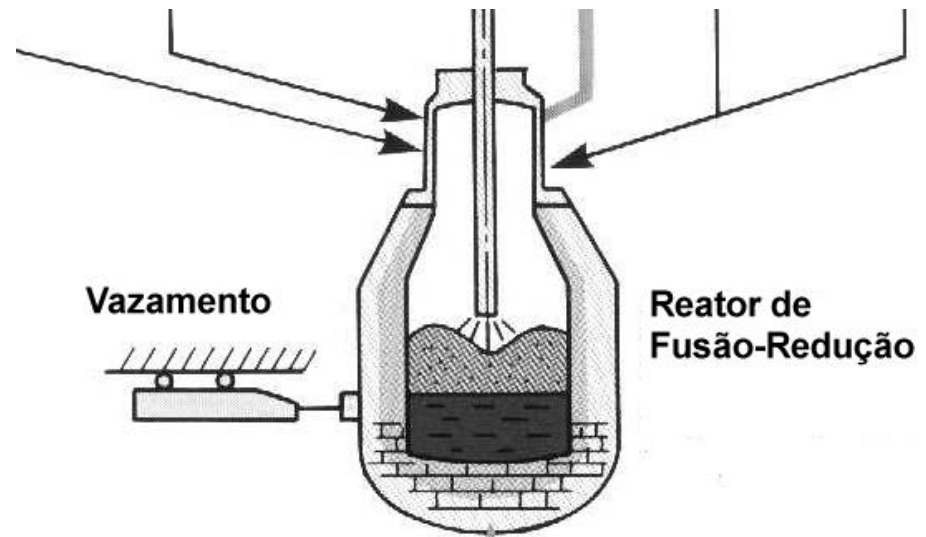
—São simultaneamente adicionados oxigênio gasoso e uma fonte de carbono (coque ou carvão)

—alta produtividade: alta velocidade específica das reações de redução e criação de uma grande área de interface de reação.



Processos de Redução em Fase Líquida (fusão-redução)

- ganga do minério, a cinza do carvão e óxidos de ferro formarão escória
- o carbono dissolvido no banho ou do carvão reduz os óxidos de ferro dissolvidos na escória
- gera grandes quantidades de monóxido de carbono
- evolução gasosa através da escória faz com que esta forme um sistema espumante, com grande aumento de volume



alto-forno e COREX: maior parte da redução efetuada a baixa temperatura, CO passando a CO₂, e geração de calor é com C passando a CO nas ventaneiras.

etapa CO $\rightarrow$ CO₂, capacidade de geração de calor 2.5 vezes da etapa C $\rightarrow$ CO,

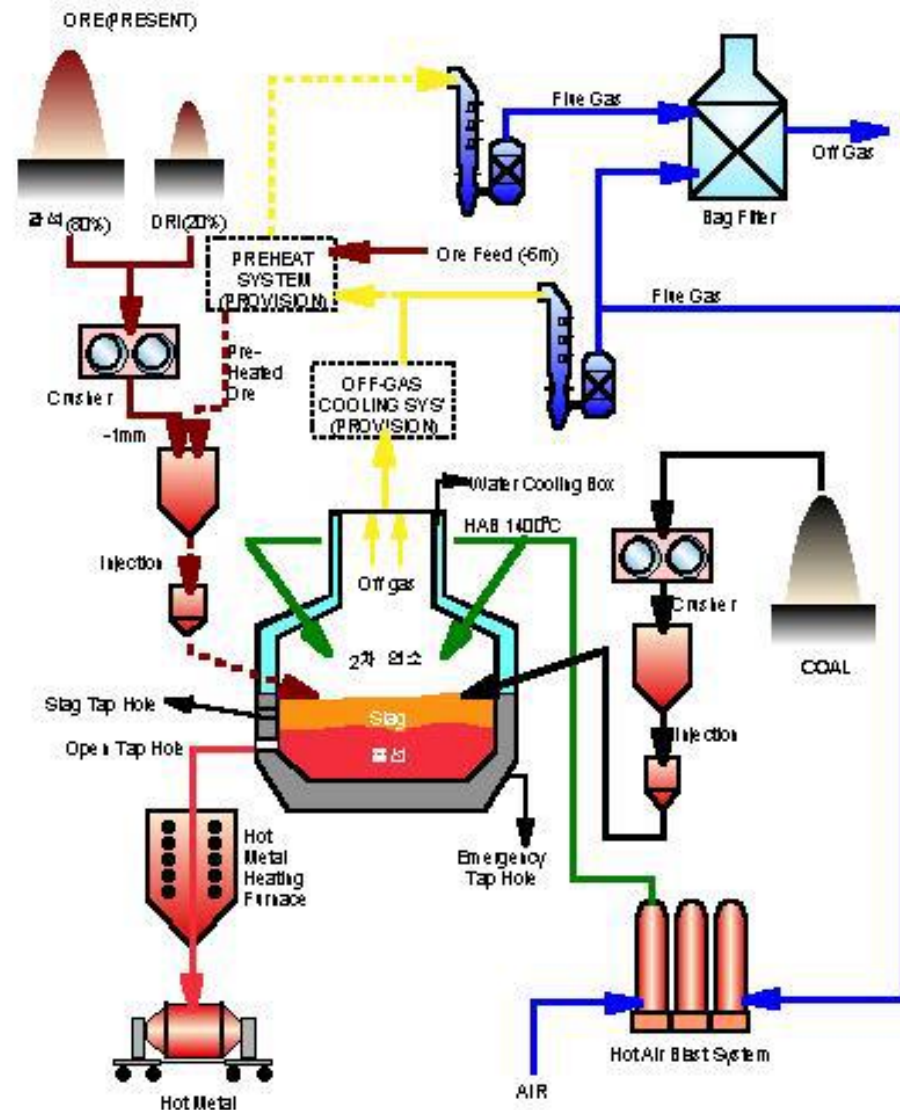
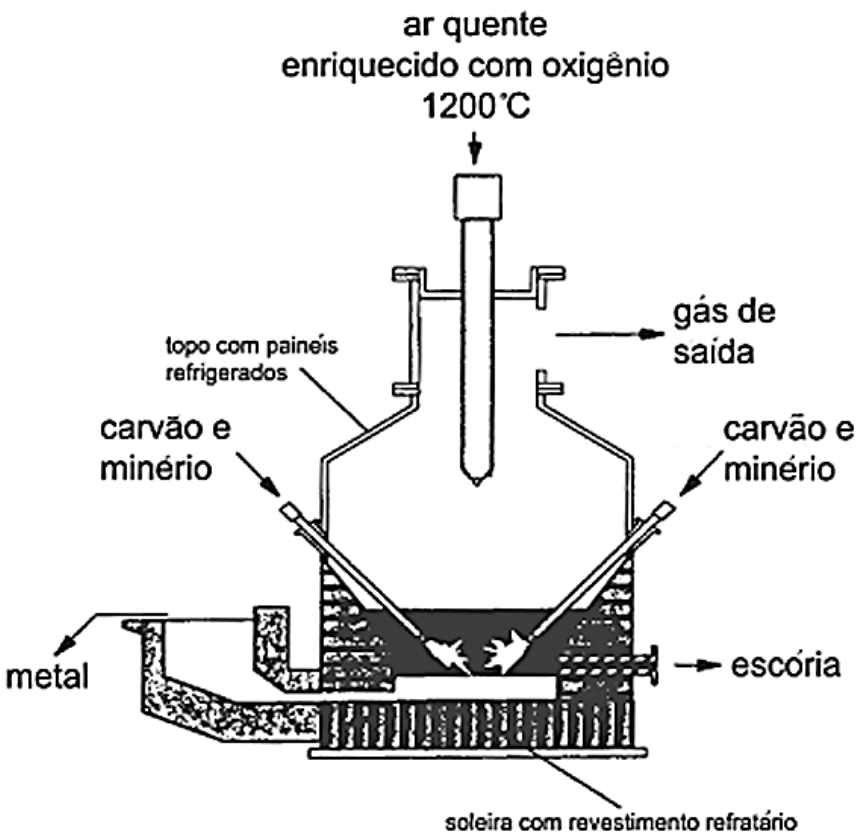
- $C + 1/2 O_2 = CO + 110.3 \text{ kJ}$
- $CO + 1/2 O_2 = CO_2, + 282.7 \text{ kJ}$

fusão-redução em banho líquido opera de maneira inversa ao alto-forno:, redução na etapa C $\rightarrow$ CO e combustão do CO a CO₂, para gerar calor, em um único reator

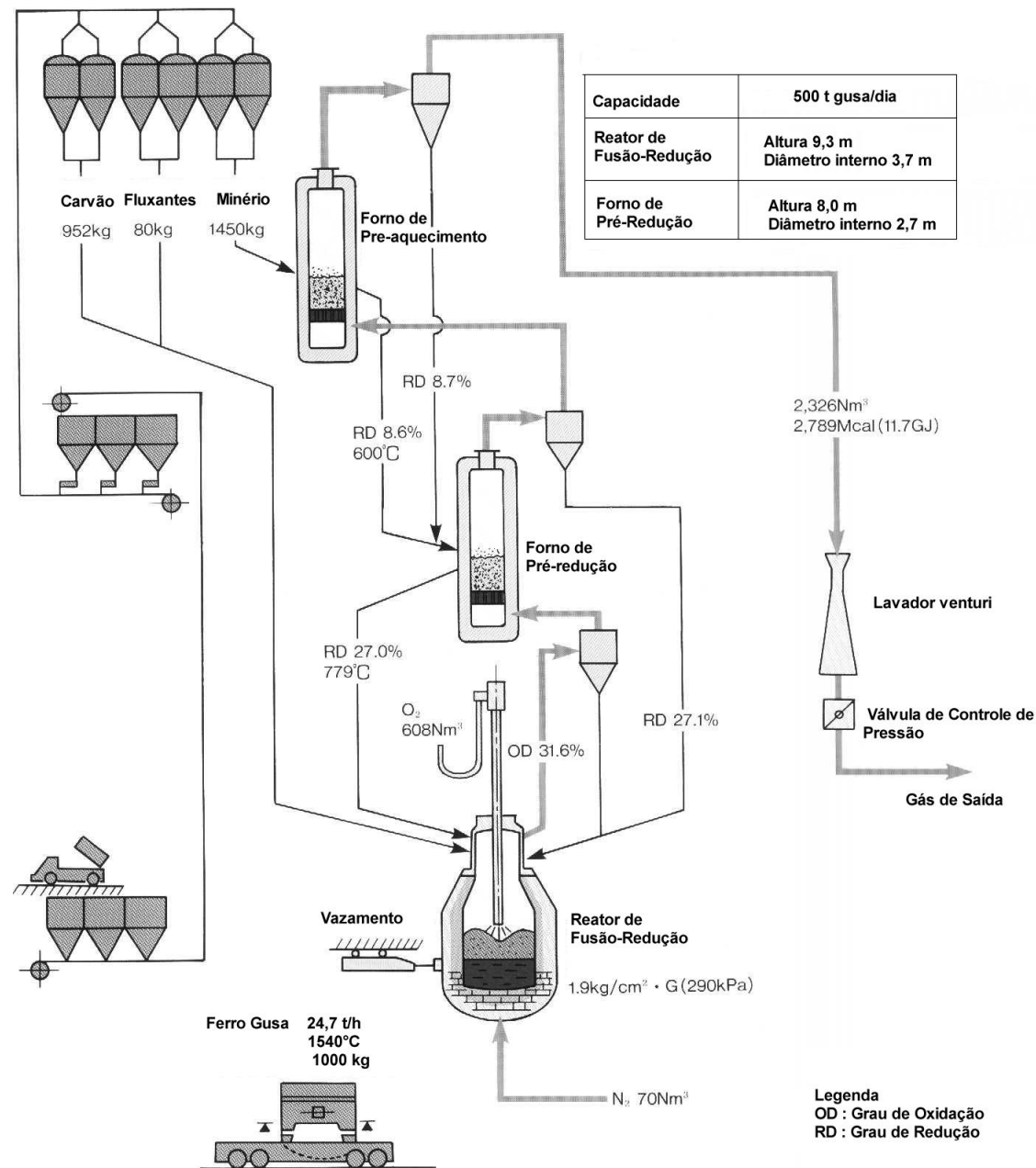
Processos de Redução em Fase Líquida (fusão-redução)

- é necessário que o calor gerado na combustão do CO a CO₂ seja diretamente aproveitado para promover as reações de redução, que são fortemente endotérmicas, caso contrário não seria possível fechar o balanço térmico. Isto é conseguido com a pós-combustão dos gases.
- O produto é ferro gusa líquido além de escória e gases.
- Processos de fusão-redução em banho líquido foram desenvolvidos no Japão (processo DIOS), nos Estados Unidos (processo AISI/DOE) e na Austrália (processo HISmelt).

Fusão-Redução: Hismelt High Intensity Smel-



Fusão-redução
Processo DIOS
Direct Iron Ore Smelting



Processos de Auto-Redução

- tecnologia de auto-redução: aglomerados nos quais o minério de ferro (ou resíduos contendo óxidos de ferro) é aglomerado conjuntamente com material carbonáceo (carvão vegetal, moinha de coque, carvão fóssil, biomassa, etc) que terá a função de redutor dos óxidos.
- estudos comprovaram que este tipo de aglomerado apresenta vantagens cinéticas significativas sobre a redução convencional por gases.
- dificuldade de desenvolver processo que aproveite de maneira integral esta vantagem: aglomerados não podem ser queimados para fornecer resistência mecânica, pois acarretaria na combustão do material carbonáceo.

Processos de Auto-Redução

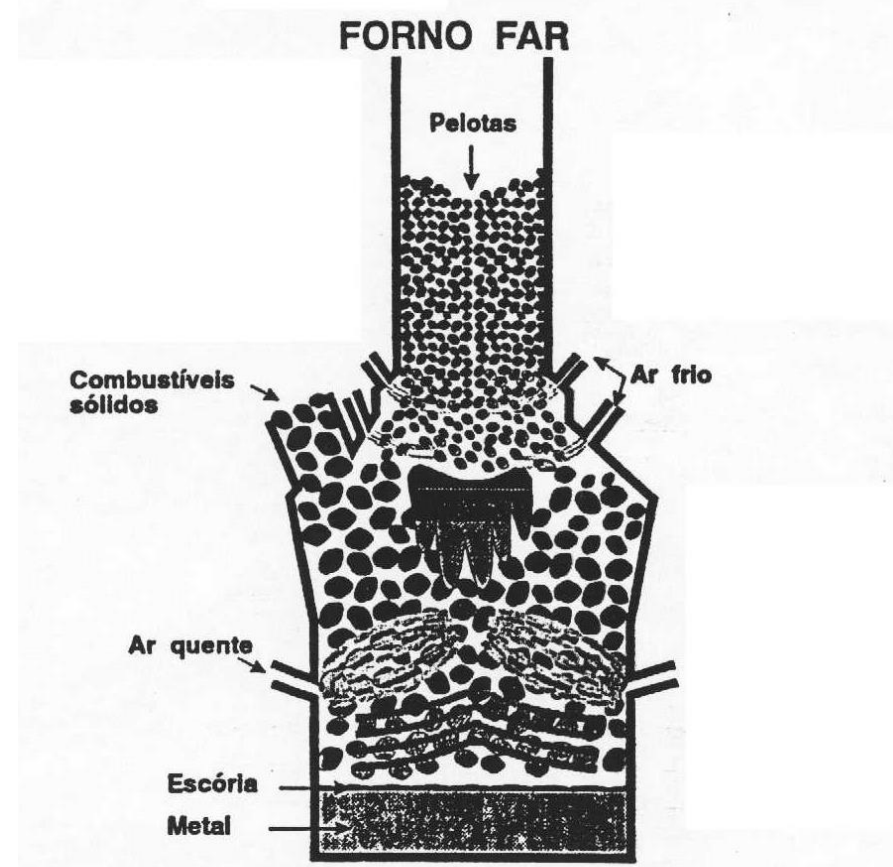
- Ou o processo não exige mecanicamente dos aglomerados, ou este deve ter em sua composição um aglomerante hidráulico (cimento Portland, escória de alto-forno, etc) que forneça resistência a frio
- processos a auto-redução: uso de carbono sólido como redutor, podendo-se empregar qualquer tipo de material carbonáceo, não necessitando de coque.
- mais promissores: processo Tecnored, desenvolvido no Brasil, e o processo Fastmet.

Processo Tecnored

—pelotas auto-redutoras aglomeradas a frio carregadas em forno de cuba semelhante a um forno cubilo modificado

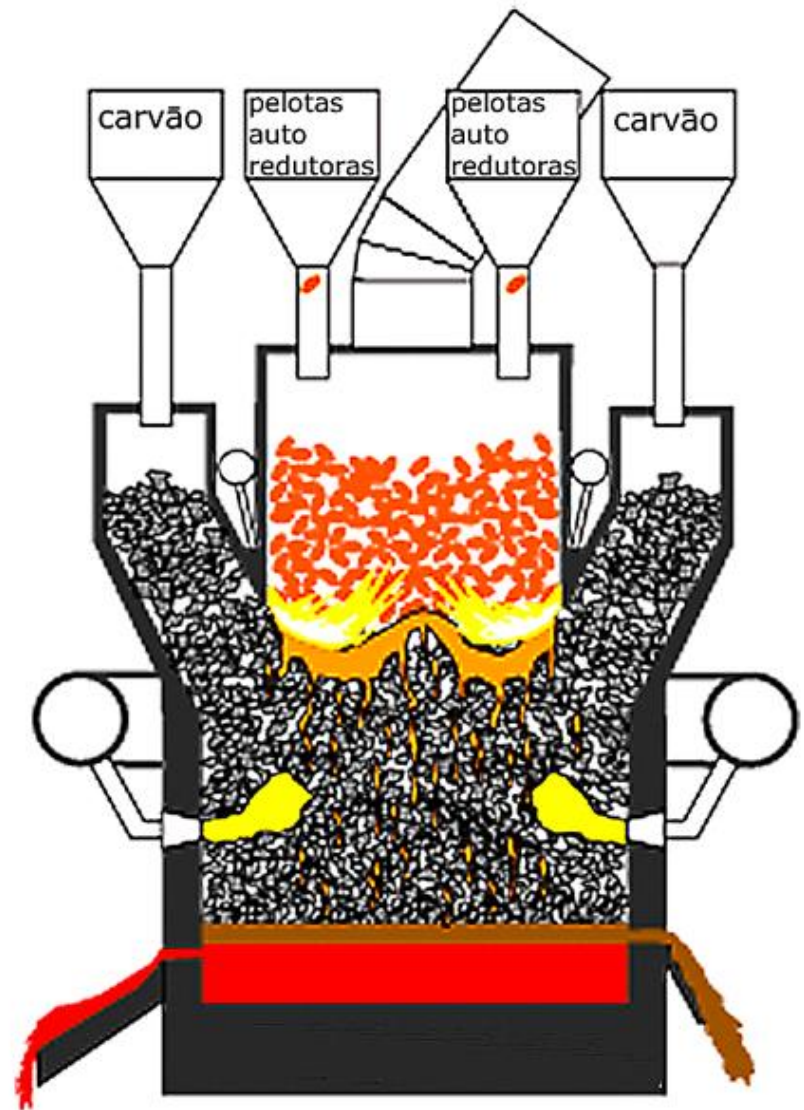
—combustível sólido é carregado lateralmente diretamente na zona inferior, de modo que a cuba principal contém apenas as pelotas auto-redutoras.

—Ar quente é introduzido através de ventaneiras, promovendo a combustão do material carbonáceo e gerando gases quentes que ascendem pela cuba, aquecendo as pelotas auto-redutoras e fornecendo o calor necessário para a redução dos óxidos de ferro pelo carbono



Processo Tecnored

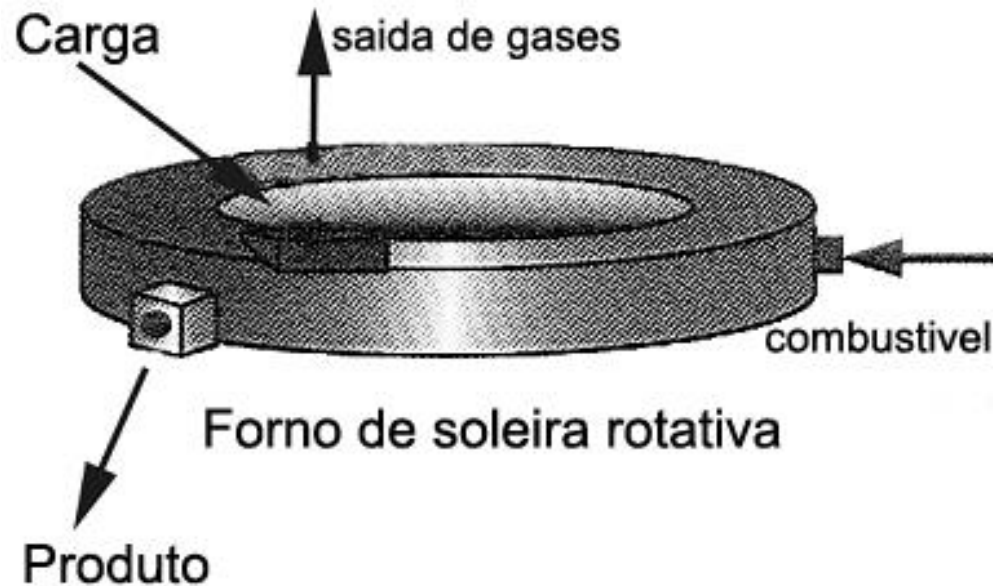
- ventaneiras secundárias injetam ar frio para queimar os gases ascendentes, gerando alta temperatura onde as pelotas, já agora metalizadas, fundem-se.
- material líquido atravessa a cama de carvão, até o cadinho:
- O ferro gusa e a escória são vazados de tempos em tempos.
- altura da carga na cuba central entre 2 e 3 m, pelota necessita certa resistência mecânica, muito inferior daquela requerida por um alto-forno.



Processos de Soleira Rotativa

Processo Fastmet

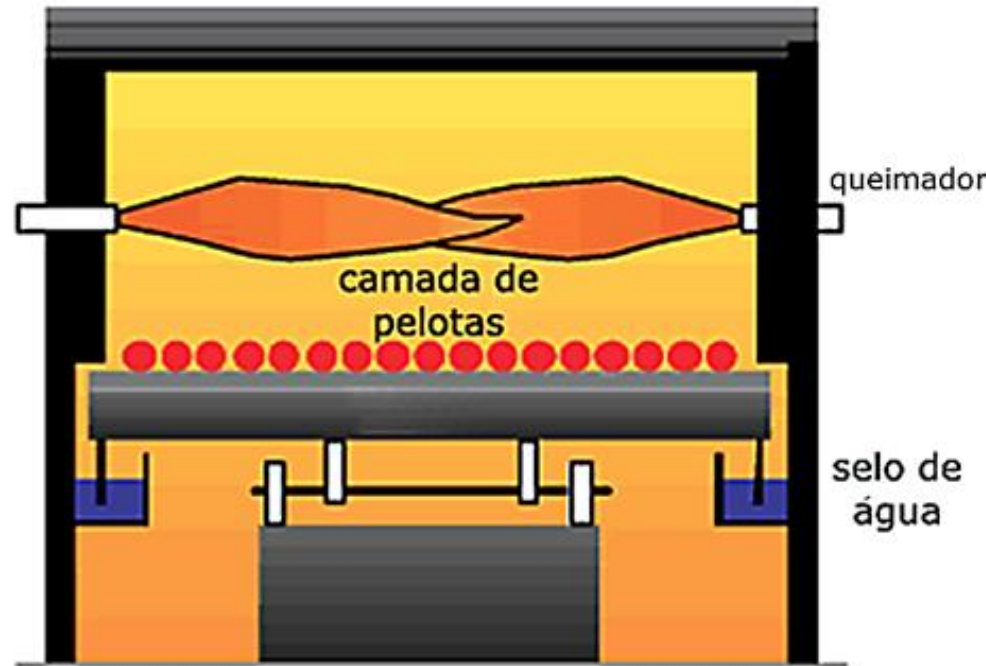
- emprega forno de soleira rotativa para a redução de pelotas auto-redutoras
- camadas de apenas 2 ou 3 pelotas sobre esteira
- pelotas não sofrem solicitação mecânica, não necessitando ter alta resistência
- a pelota não precisa de aglomerantes hidráulicos, que implicam em tempos de cura longos (7 a 28 dias)
- A matéria prima (minério de ferro, redutor e aglomerante) é misturada com água e carregada em disco ou tambor de pelotamento.



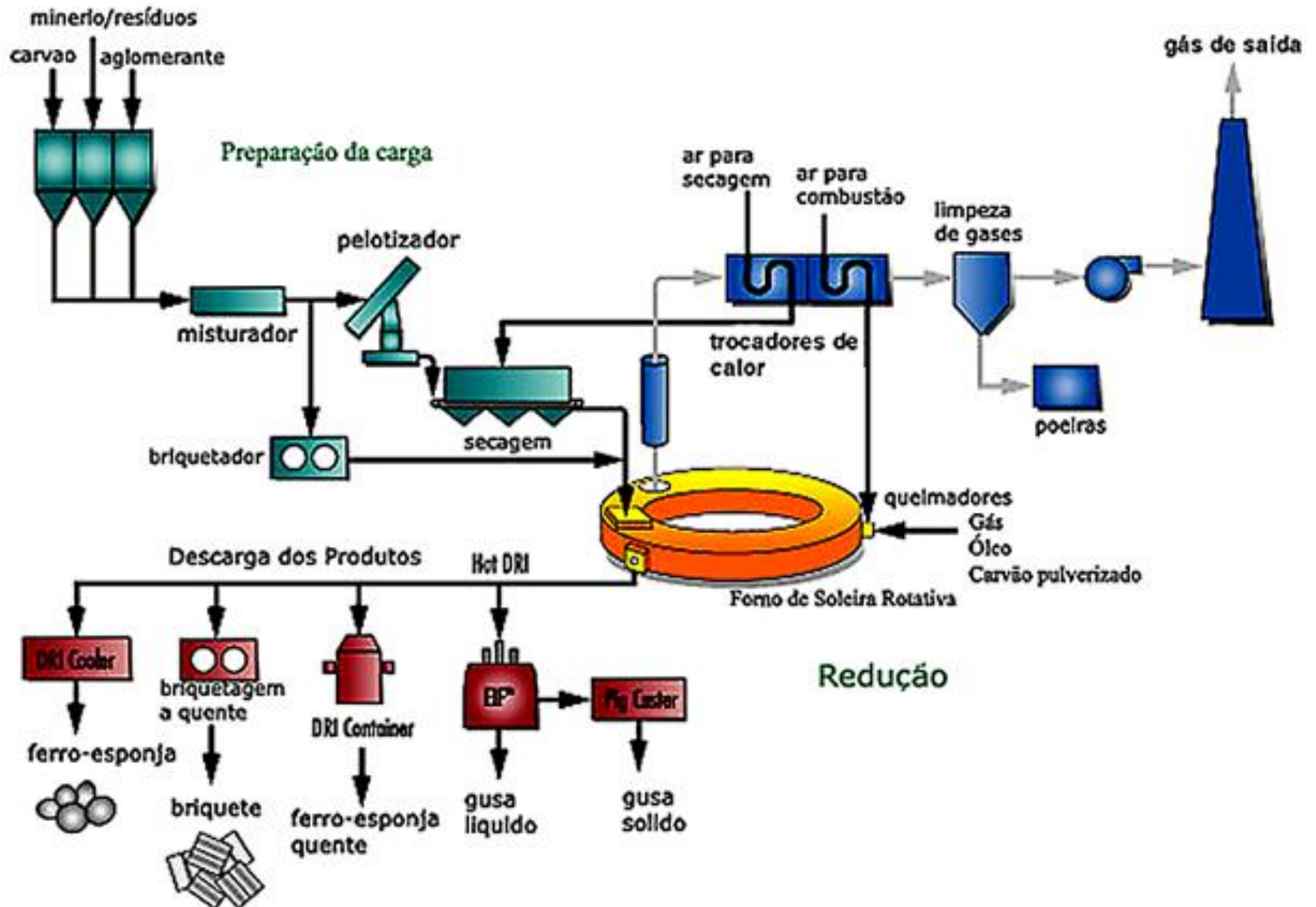
Processos de Soleira Rotativa

Processo Fastmet

- Pelotas são secadas e carregadas no forno de soleira rotativa.
- forno aquecido por gás, ou carvão pulverizado, entre 1250 e 1350 °C
- reações muito rápidas, tempos de residência de 9 a 12 minutos
- pelotas metalizadas são descarregadas entre 900 e 1000°C.
- pelotas reduzidas podem ser briquetadas a quente (HBI, hot briquetted iron), ou transferidas quentes diretamente para forno de fusão, ou ainda resfriadas produzindo-se o ferro-esponja.
- Fastmet já é comercial

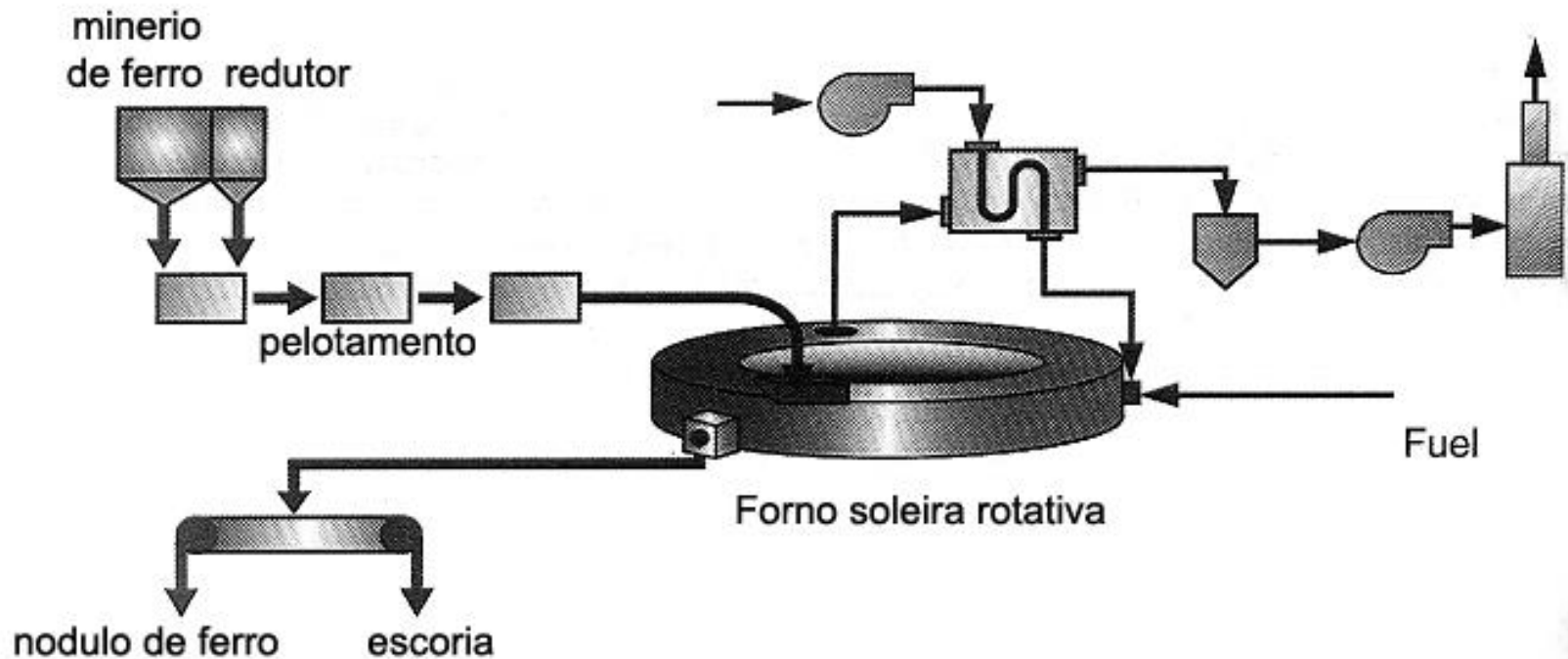


Processos a soleira rotativa



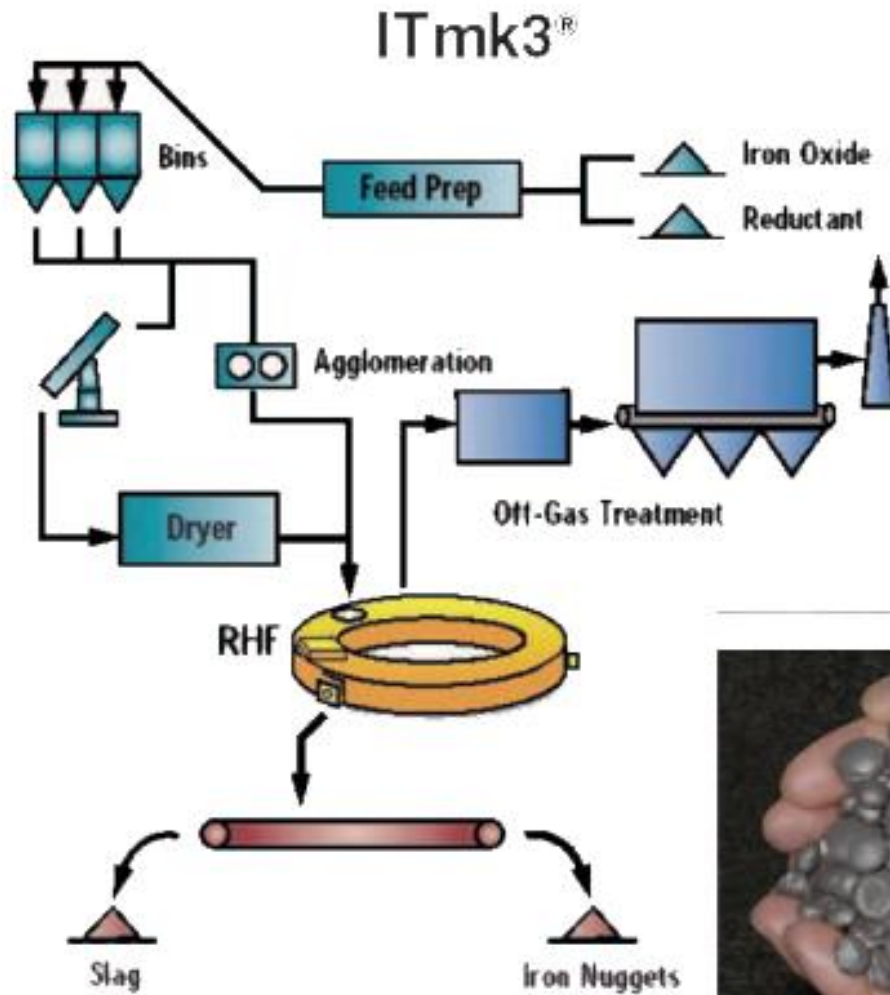
Processo ITmk3

Fastmet modificada para operar a temperaturas mais altas (1350 a 1450°C), produzindo diretamente nódulos de ferro separados da escória. Ótima carga para forno elétrico.



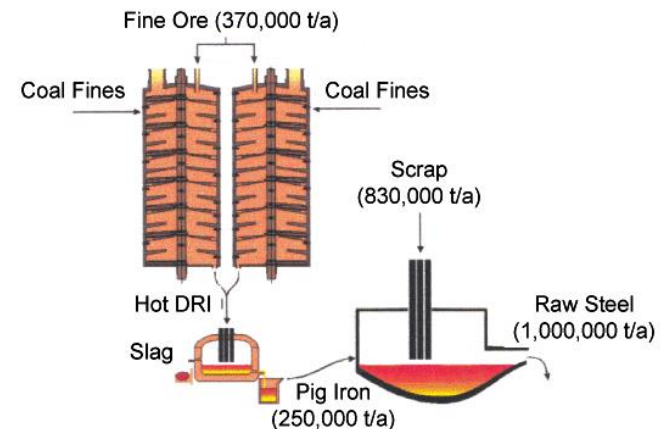
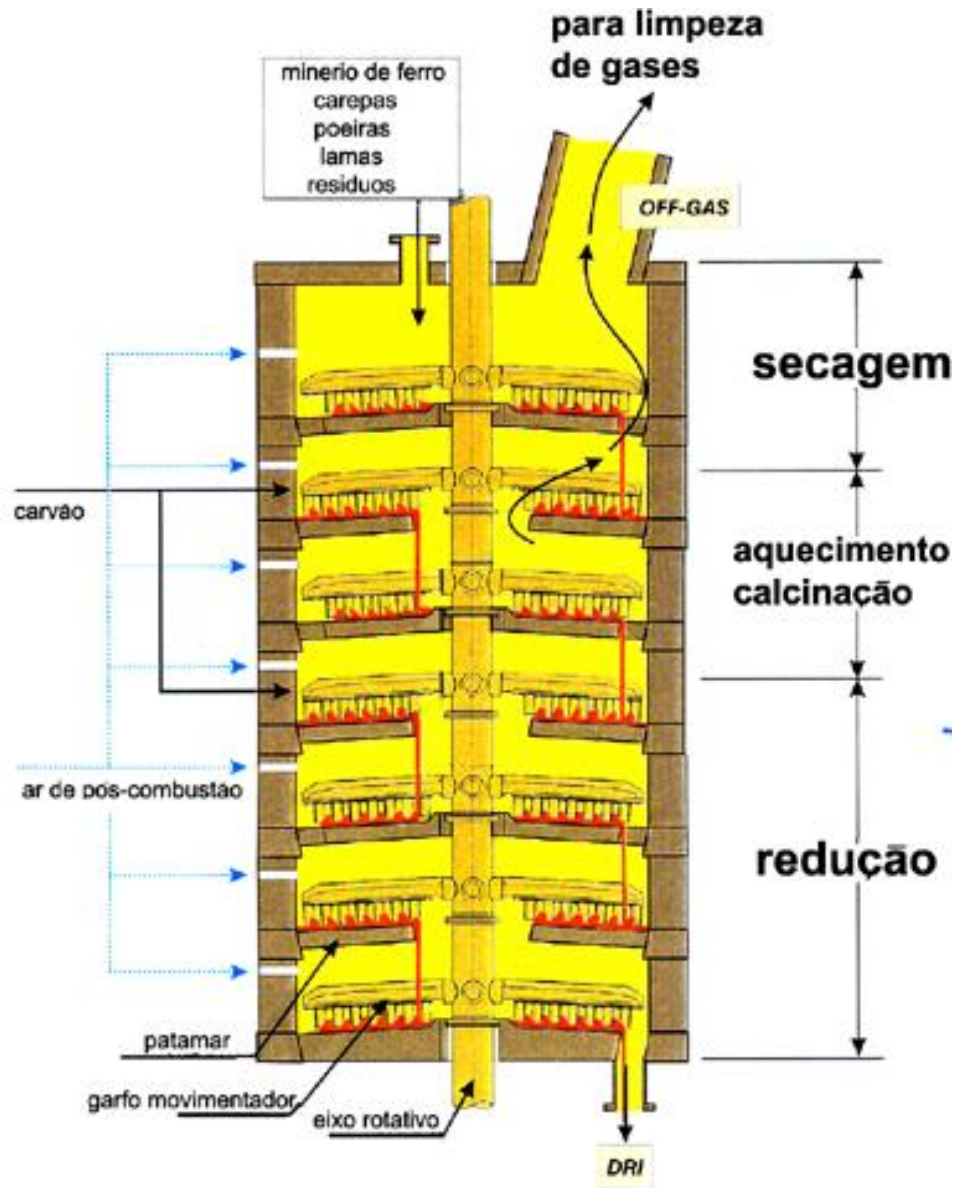
ITmk3 process

Nódulos de ferro-carbono



Processo Primus

Minério fino em forno de patamares, com adição de carvão, ar de combustão, forma material reduzido, não-aglomerado, que pode ser carregado diretamente em forno elétrico, ou briquetado.



Comparação entre os Processos

	ALTO-FORNO	COREX	TECNORED	DIOS	MIDREX	FINMET	FASTMET
processo	cuba 1 estágio	cuba/ gaseificador- fundidor, 2 estágios	cuba 1 estágio	cuba/reator, 2 estágios	cuba 1 estágio	leito fluidizado 4 estágios	soleira rotativa 1 estágio
estágios preliminares	coqueificaçã o aglomeração	aglomeração fábrica oxigênio	pelotização cura		reforma do gás aglomeração	reforma do gás	pelotização
reductor/com- bustível							
coque (kg)	320	-	-	-	-	-	-
carvão p/ injeção (kg)	160	-	-	-	-	-	-
carvão vapor (kg)	-	1000	520	950	-	-	250-380
gás natural (GJ)	-	-	-	-	10	12,5	2,5
oxigênio (m3)	30	560	-	610	-	-	-
eletricidade (kWh)	58	75	-	-	120	150	60-120
aglomerante (kg)	-	-	150	-	-	-	50
consumo energético líquido (GJ/t)	14-16	15-18	16-18	17-19	9,5-10,5	12,5-13,5	11,5-13,0