



Metalurgia do Ferro

**Processos de Redução Direta e
Processos Alternativos ao Alto Forno**

Características do processo em Alto-Forno

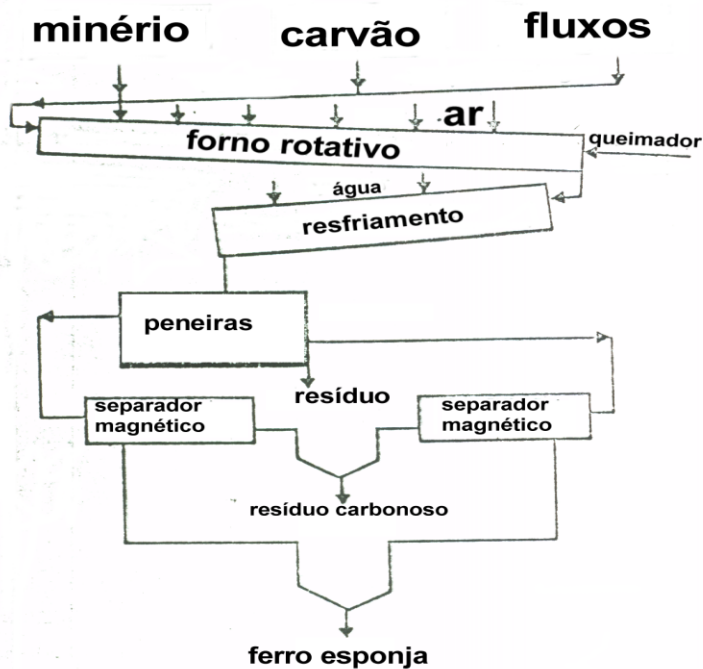
- alta escala de produção (maior que 1.5 Mt/ano)
- necessidade de aglomeração do minério
- necessidade de coque metalúrgico
- degradação do meio ambiente

Processos de Redução Direta

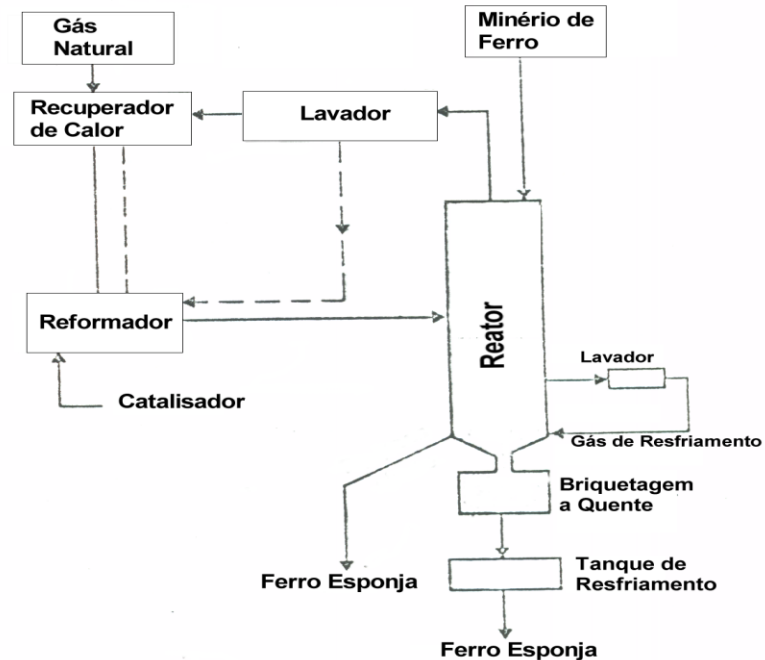
- a redução do minério de ferro a ferro metálico é efetuada sem que ocorra a fusão da carga do reator.
- o produto metálico é obtido na fase sólida
- é chamado de ferro-esponja (DRI, em inglês, iniciais de Direct Reduced Iron)
- pode ser briquetado a quente, obtendo-se o briquete (HBI)
- o ferro-esponja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

Processos de Redução Direta

Processo a Carvão



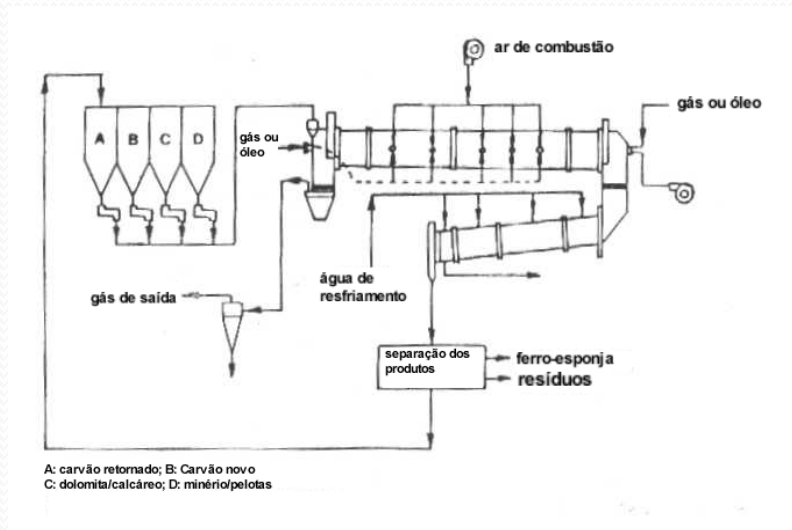
Processo a Gás Natural



Processos a carvão em forno rotativo: SL/RN

redução ocorre por sub-processos

- a) formação de gás redutor: $C_{\text{reductor}} + \text{CO}_{2(g)} = 2 \text{CO}$
- b) redução dos óxidos de ferro: $\text{Fe}_n\text{O}_m + m \text{CO} = n \text{Fe} + m \text{CO}_2$
- c) O ar admitido ao longo do forno queima o CO: $\text{CO} + 1/2 \text{O}_2 = \text{CO}_2$
- Reação global: $\text{Fe}_n\text{O}_m + m/2 \text{C} = n \text{Fe} + m/2 \text{CO}$



Forno rotativo-processo a carvão

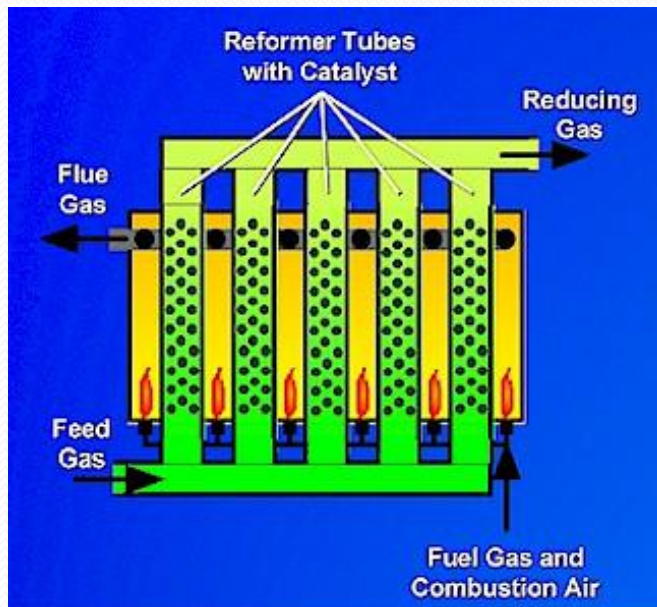


Processos a Gás Natural

Gás Natural – basicamente metano, CH_4

Como redutor, precisa ser transformado em monóxido de carbono (CO) e hidrogênio (H_2)

- gás natural reage com CO_2 e H_2O através das reações:
- $\text{CH}_4 + \text{CO}_2 = 2 \text{CO} + 2 \text{H}_2$
- $\text{CH}_4 + \text{H}_2\text{O} = \text{CO} + 3 \text{H}_2$



processos industriais que utilizam gás natural

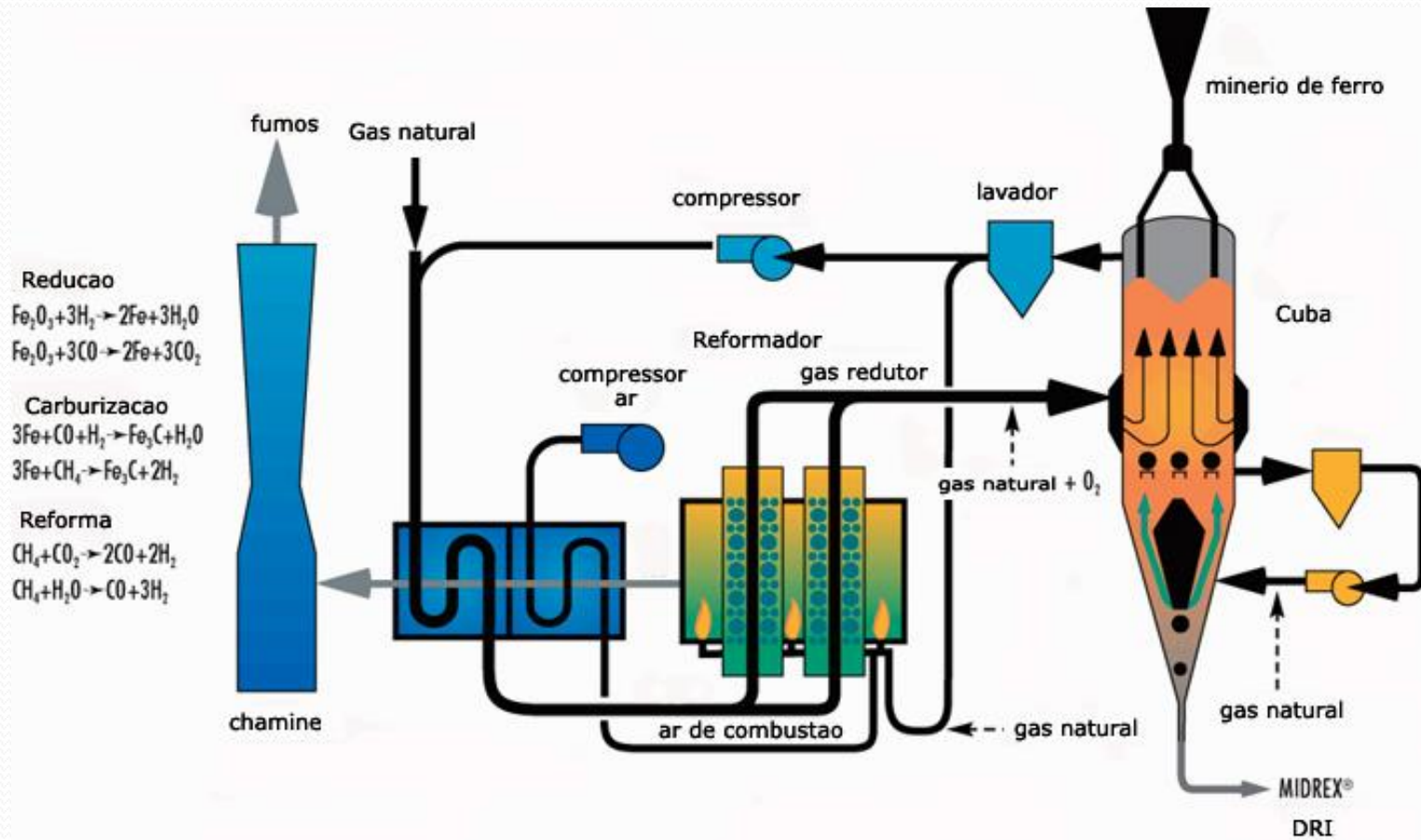
processos em reatores verticais, MIDREX e HyL III

processos em leito fluidizado (FIOR, Finmet)

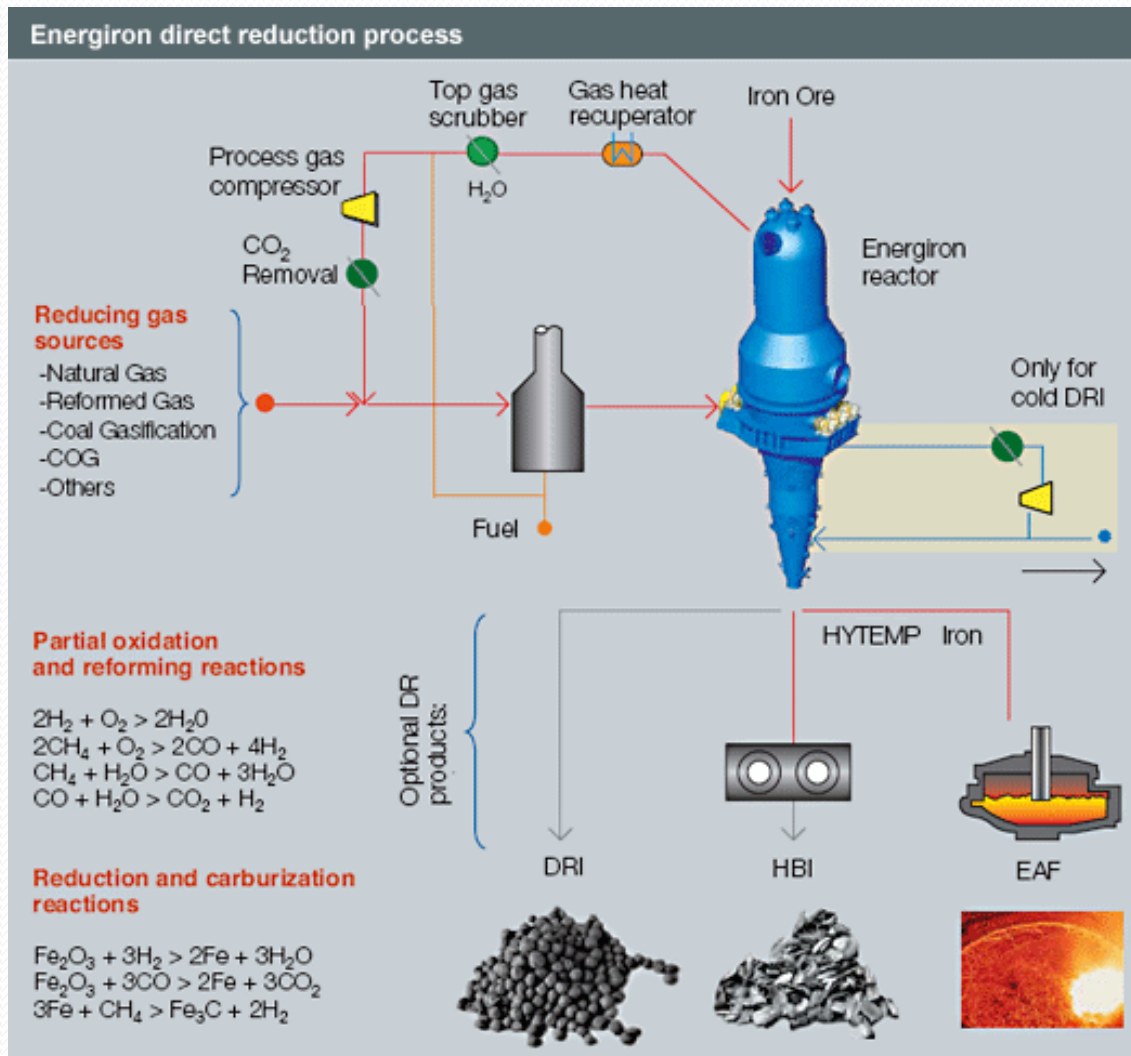
Processo MIDREX

- gás redutor: 95% de (CO+ H₂) entre 860 e 900°C
- ascende em contra-corrente com a carga (minério bitolado ou pelotas)
- gás de topo 70% de (CO+H₂), mais CO₂ e H₂O. Retorna ao reformador como gás reagente e/ou combustível.
- ferro-esponja resfriado antes da descarga, carburado com 1,4% e 1,7 % de carbono, diminui a possibilidade de reoxidação e auxilia na fusão.
- Grau de metalização do ferro-esponja:
- $G_m = [\%Fe \text{ metálico} / \%Fe \text{ total}] \times 100$
- 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

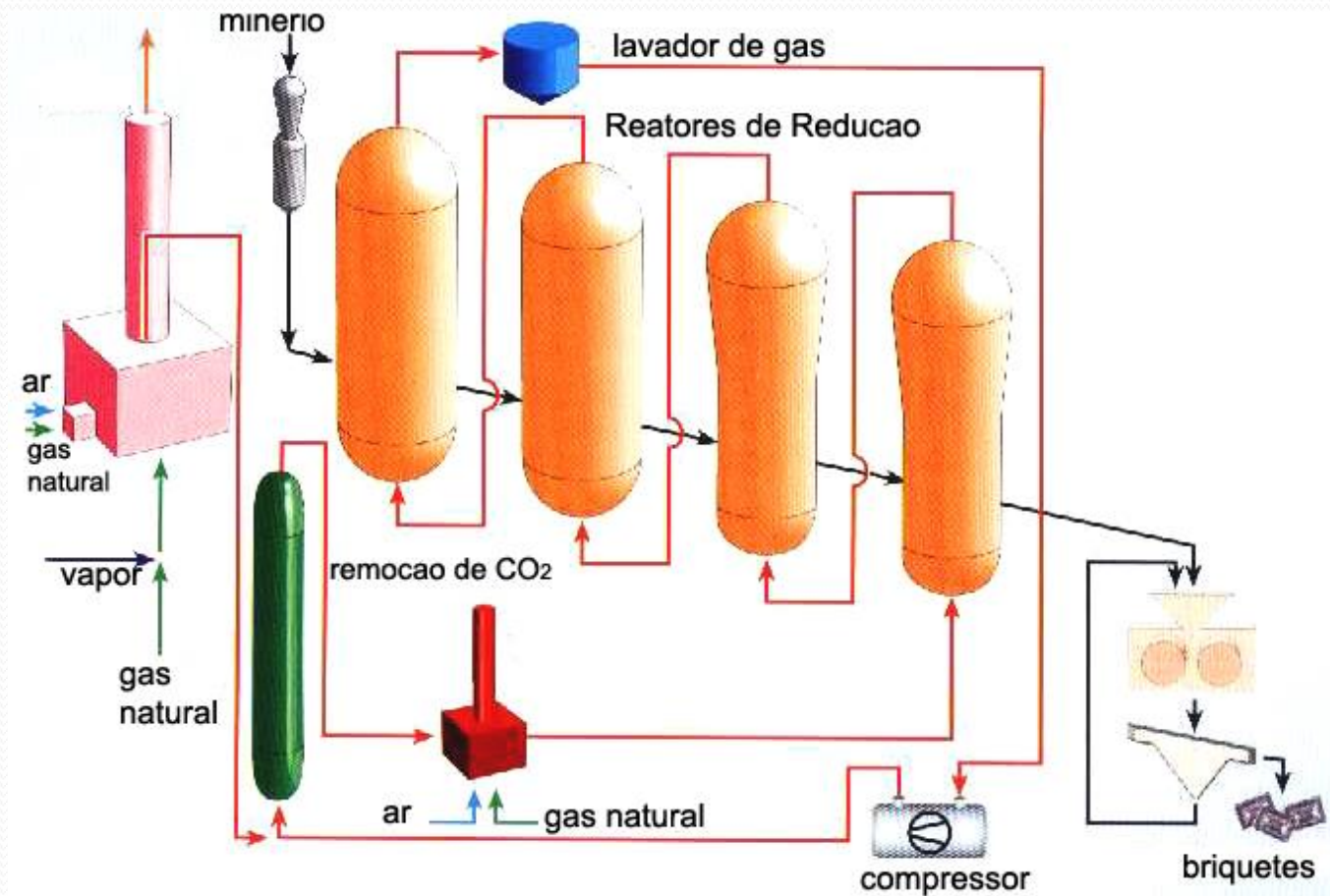


Processo Energiron (HyL)



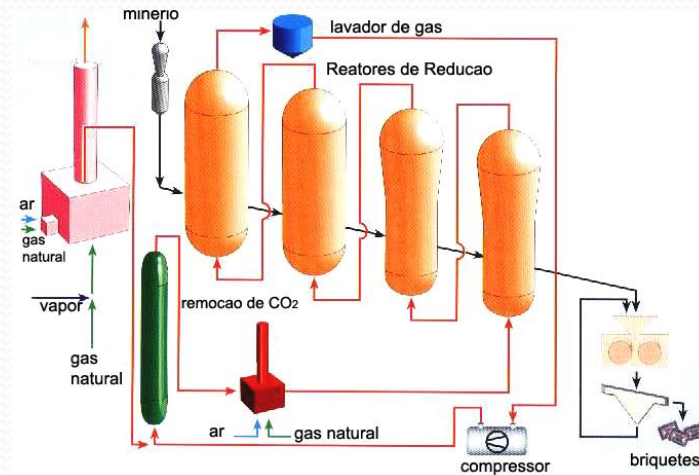
Processos em Leito Fluidizado- FINMET

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



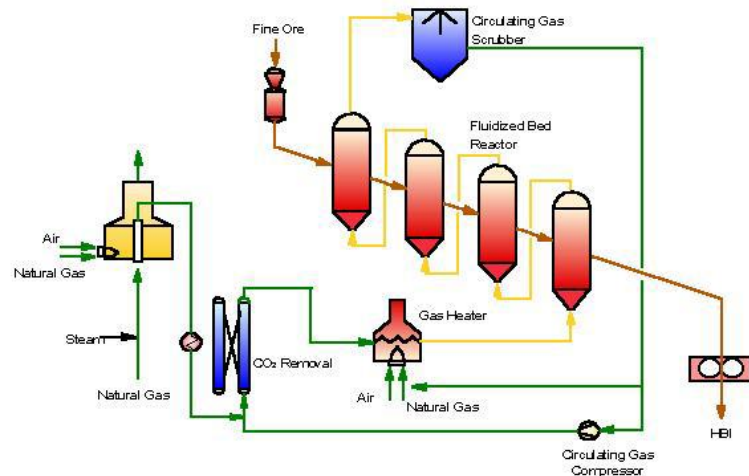
Processos em Leito Fluidizado- FINMET

- 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
- ótimo contato gás-sólido, altas velocidades de reação,
- os reatores de redução trabalham a pressões entre 10 e 12 bar



Processos em Leito Fluidizado

- 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.
- Gás de processo é gás natural reformado aquecido a 830°C antes de entrar na série de reatores em direção oposta àquela do minério.
- O produto é o HBI.

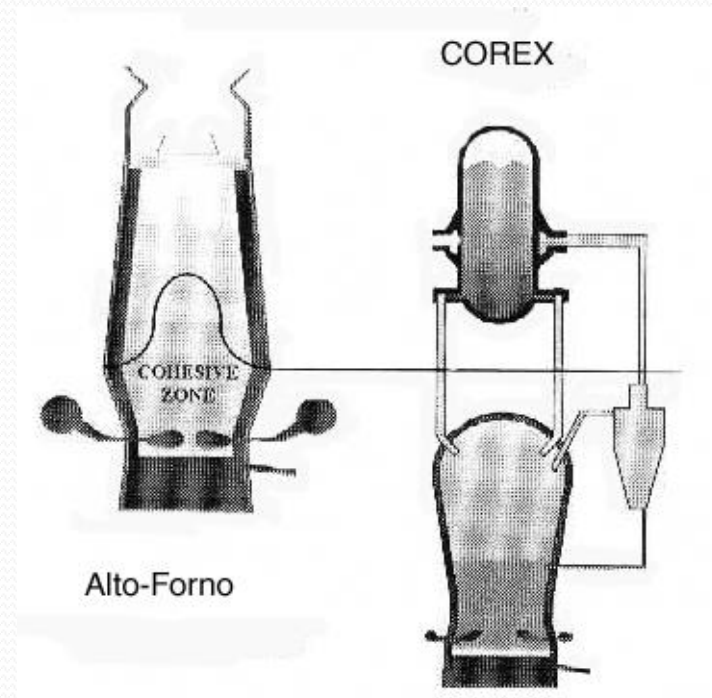


Ferro-esponja (DRI) Briquetes a quente (HBI)

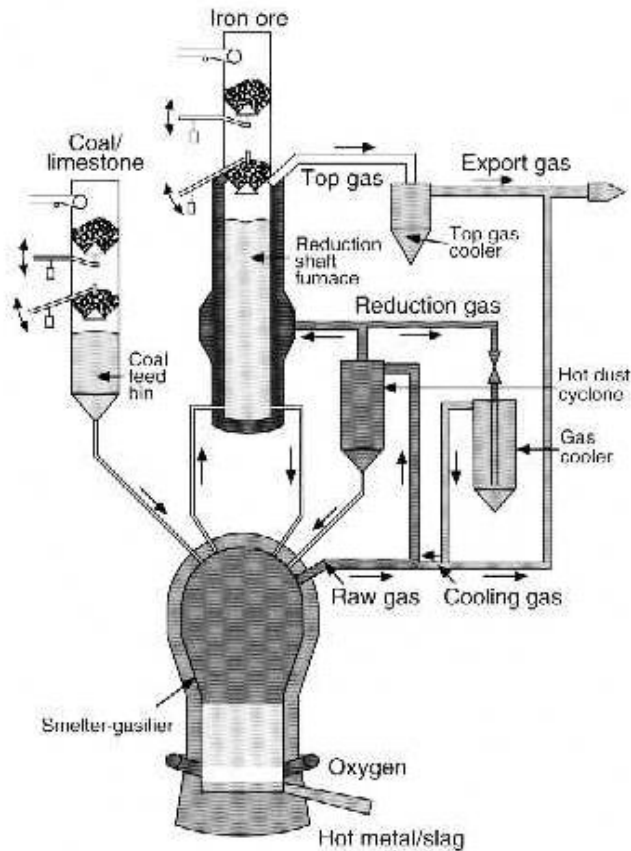


Processo COREX

- Conceito: divisão do alto-forno em dois: um reator realiza a redução do minério de ferro a ferro metálico, que é carregado em reator que realiza a fusão;
- energia gerada por queima de carvão no reator de fusão, gerando o gás redutor para o reator de redução.
- 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.

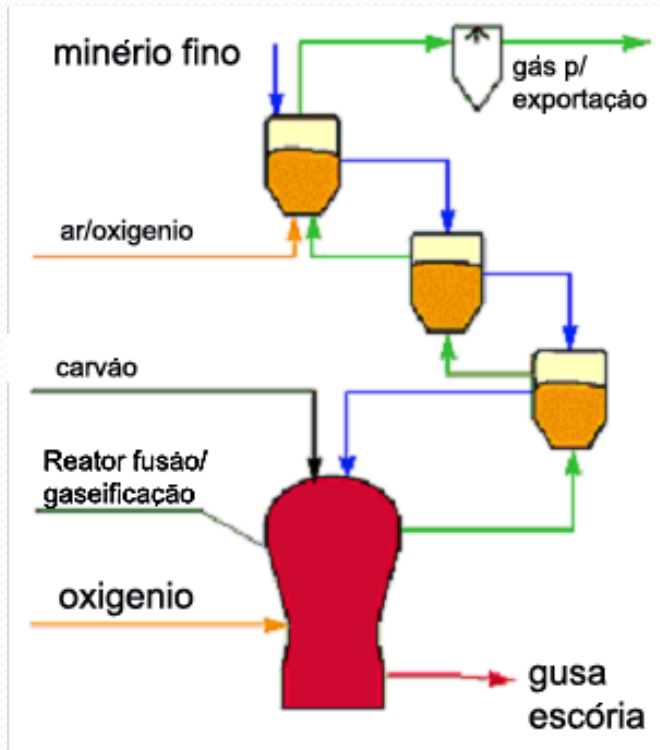


Processo COREX

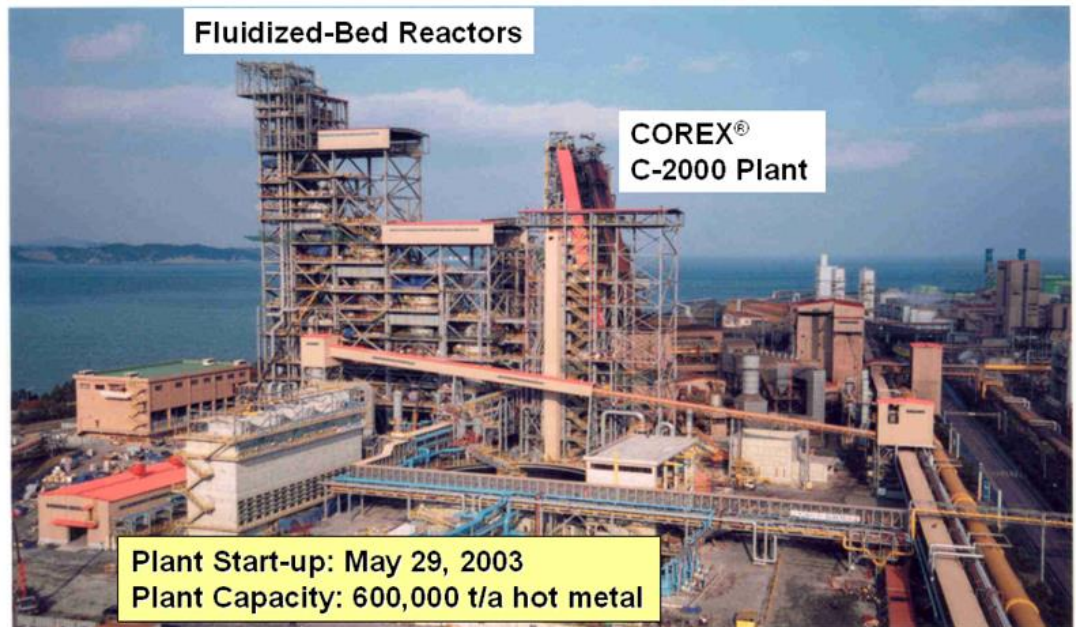


- Utiliza oxigênio puro ao invés de ar quente usado nos altos-fornos.
- O gás produzido é constituído basicamente de CO e H₂, deixa o reator entre 1000 e 1050°C, destruindo qualquer sub-produto indesejável da gaseificação do carvão.
- Antes de entrar na cuba de redução, é resfriado a 800-850 °C, e despoeirado.
- 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, e pode ser usado para geração de eletricidade, como gás redutor para produção de ferro-esponja ou para aquecimento em geral.

Finex: Corex com redução por leito fluidizado

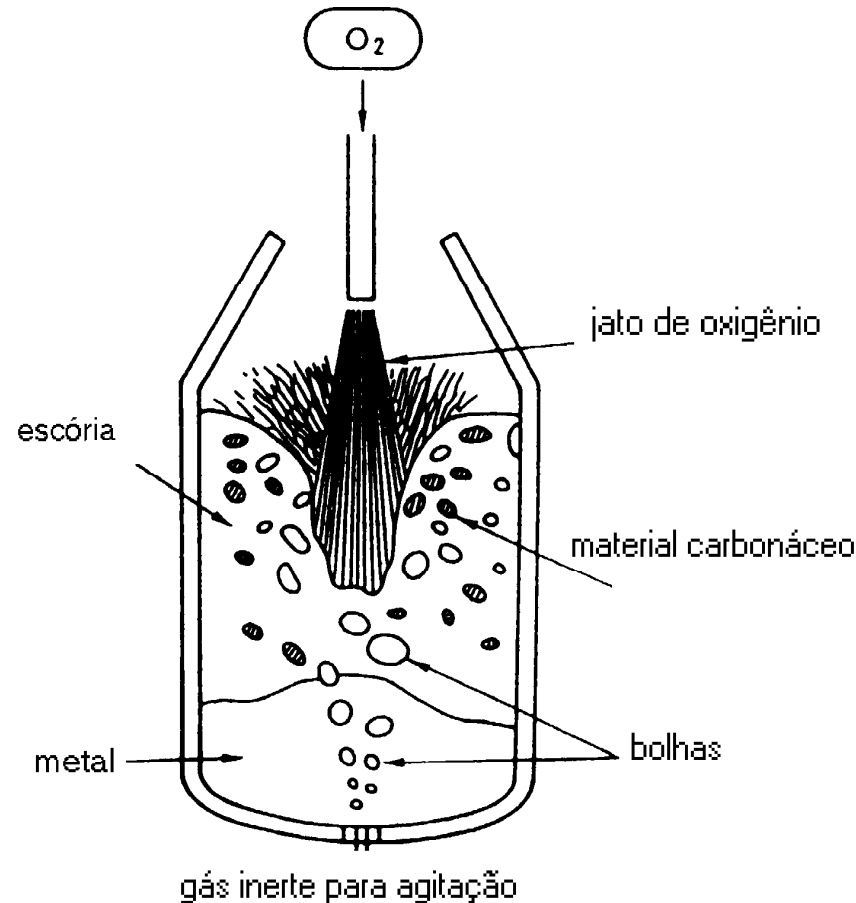


FINEX® F-2000 Demonstration Plant, POSCO/Korea



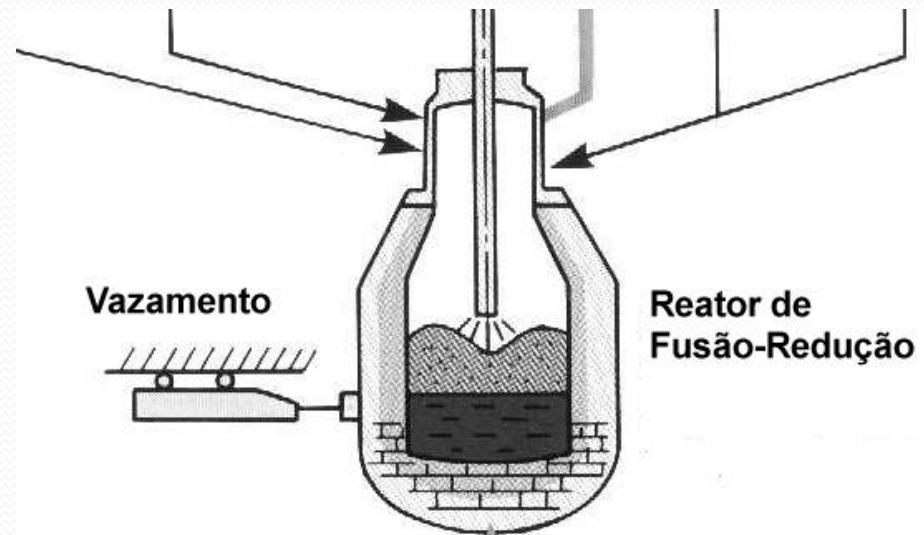
Processos de Redução em Fase Líquida (fusão-redução, smelting-reduction, in-bath process)

- 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.

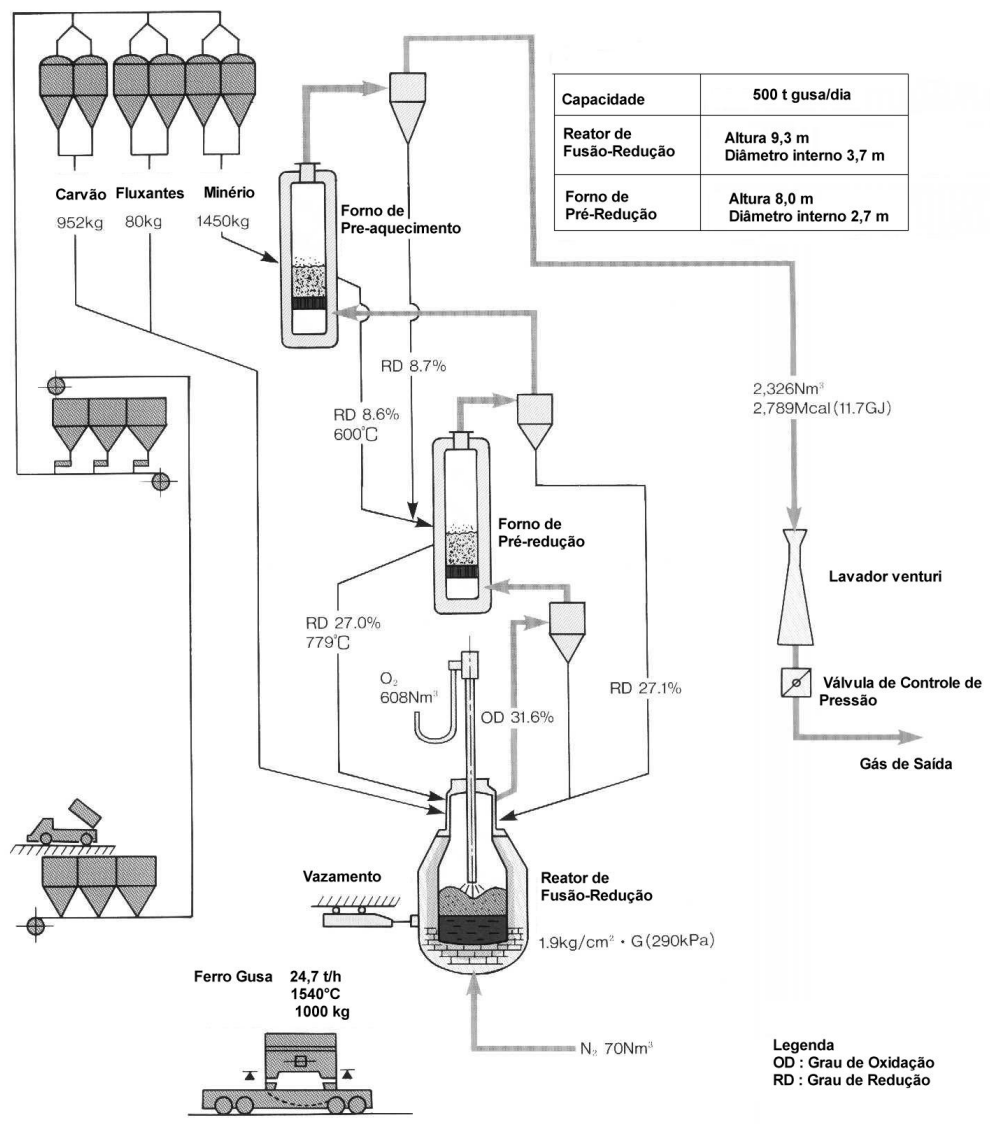


Processos de Redução em Fase Líquida (fusão-redução)

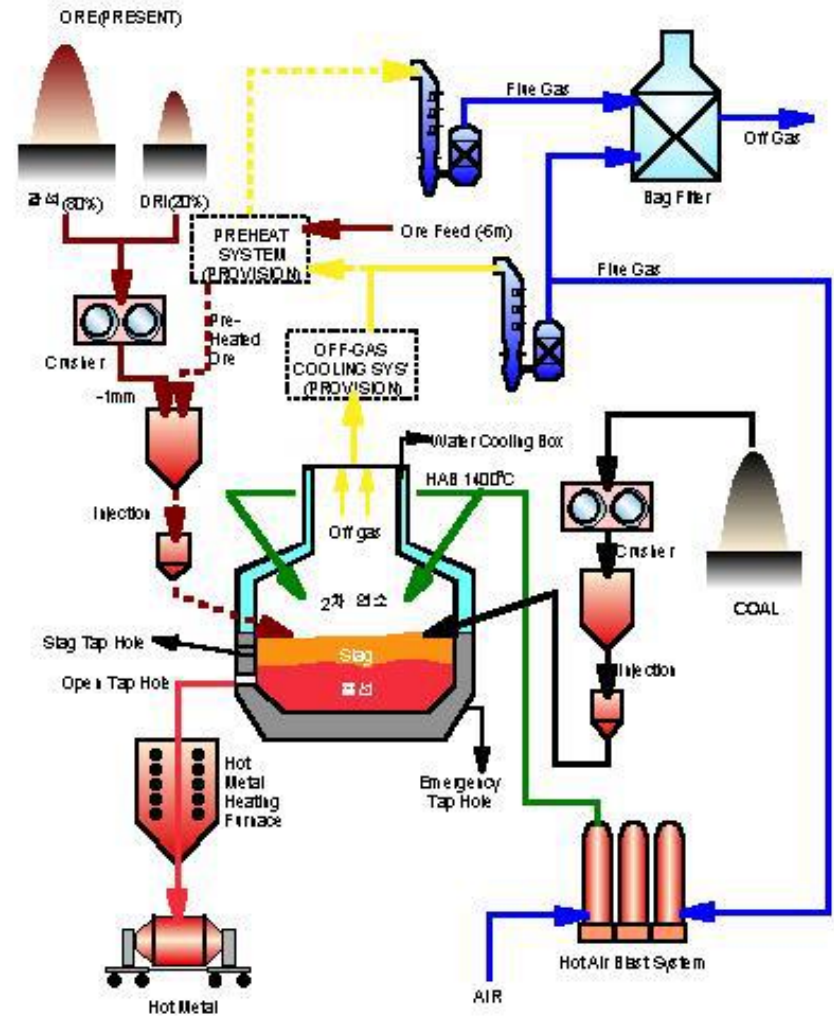
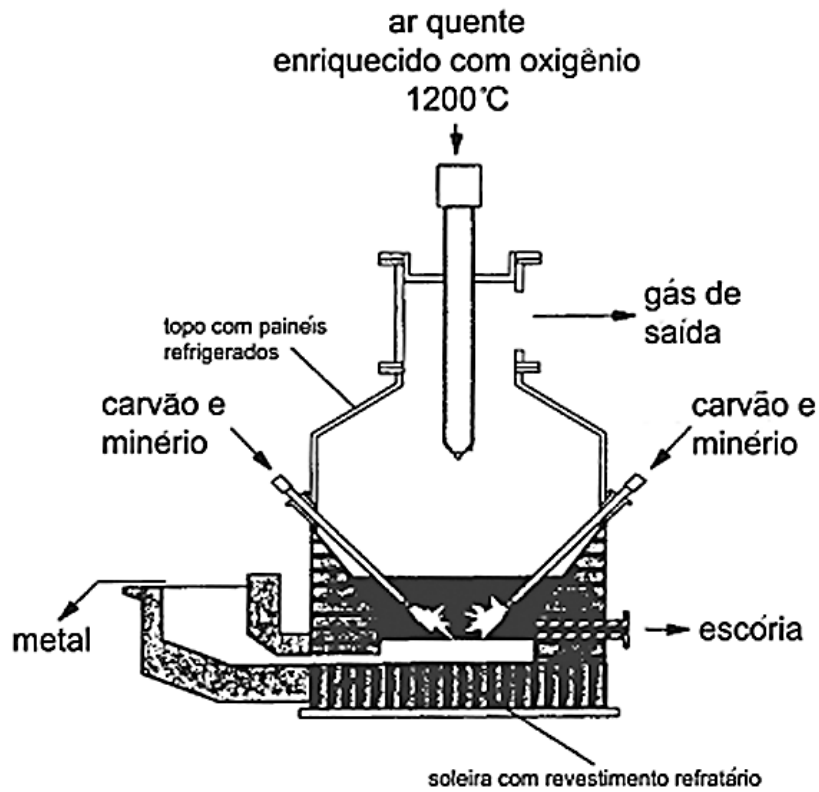
- ganga do minério, a cinza do carvão e óxidos de ferro formarão escória
- o carbono dissolvido no banho ou do carvão reduz os óxidos de ferro dissolvidos na escória
- gera grandes quantidades de monóxido de carbono
- evolução gasosa através da escória faz com que esta forme um sistema espumante, com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



Fusão-redução Processo DIOS Direct Iron Ore Smelting



Fusão-Redução: Hismelt High Intensity Smelting

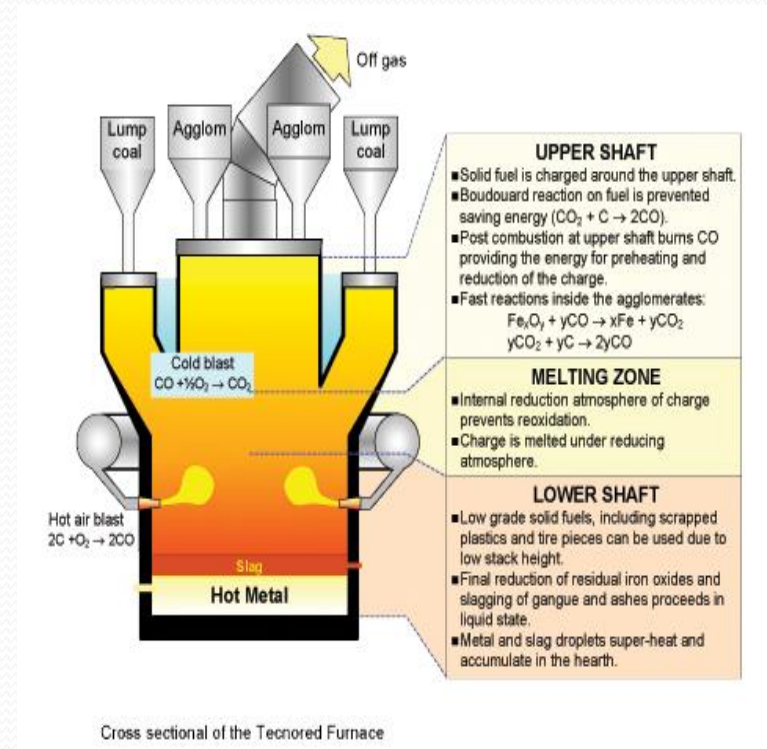


Processos de Auto-Redução

- 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.
- 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.
- 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
- mais promissores: processo TecnoRed, desenvolvido no Brasil, e o processo Fastmet.

Processo Tecnoored

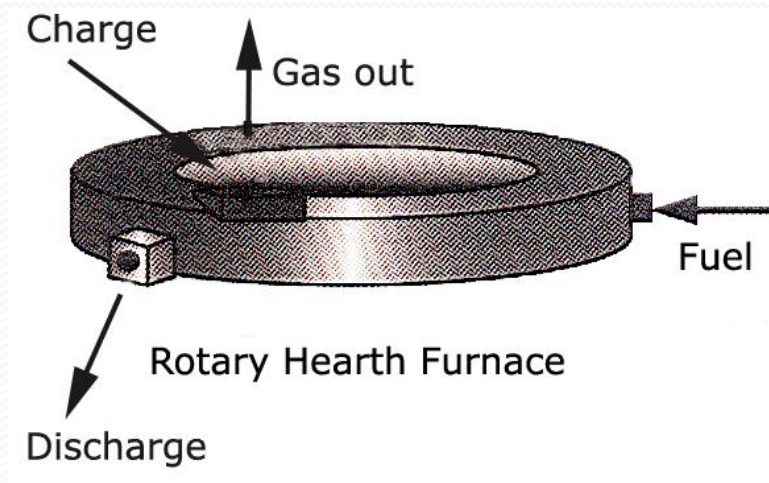
- pelotas auto-redutoras aglomeradas a frio em forno de cuba semelhante a um forno cubilo modificado
- combustível sólido carregado lateralmente
- Ar quente pelas ventaneiras, queimando material carbonáceo e gerando gases quentes que fornecem o calor necessário para a redução dos óxidos de ferro pelo carbono
- material líquido percorre a cama de material carbonoso, ganga forma escória e o metal, que absorve carbono na descida, é vazado de tempos em tempos como um ferro gusa.
- 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

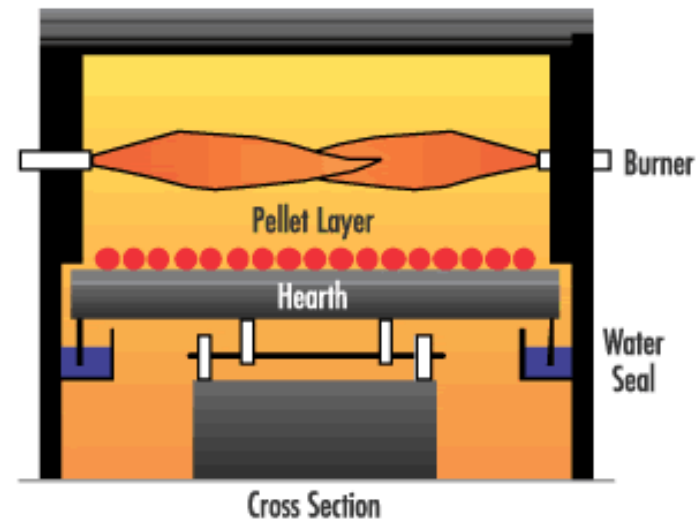
- emprega forno de soleira rotativa para a redução de pelotas auto-redutoras
- camadas de apenas 2 ou 3 pelotas sobre esteira
- pelotas não sofrem sollicitação mecânica, não necessitando ter alta resistência
- a pelota não precisa de aglomerantes hidráulicos, que implicam em tempos de cura longos (7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



Processos de Soleira Rotativa

Processo Fastmet

- pelotas cruas são imediatamente transferidas para secagem e em seguida carregadas no forno de soleira rotativa.
- forno aquecido por queima de gás, ou carvão pulverizado, entre 1250 e 1350 °C
- reações muito rápidas, tempos de residência de 9 a 12 minutos
- pelotas metalizadas são descarregadas a entre 900 e 1000°C.
- pelotas podem ser submetidas a briquetagem a quente, briquetes de ferro (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

