



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

Processo Ideal de Redução

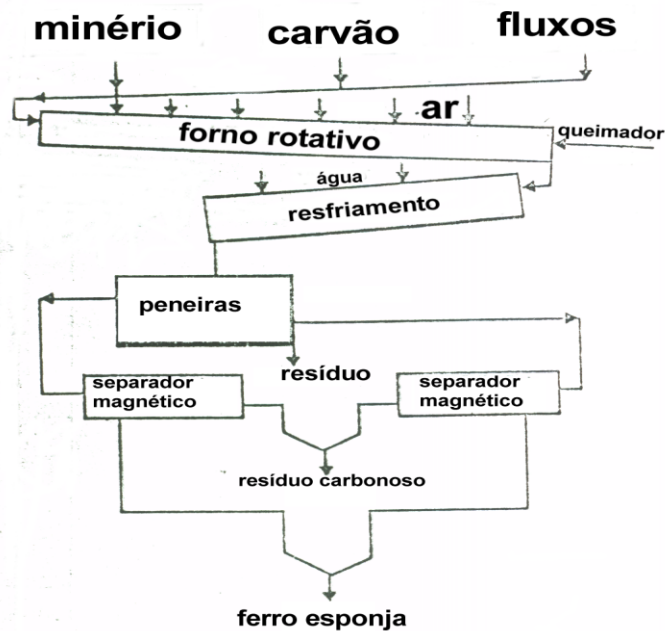
- usar finos de minério diretamente
- usar qualquer tipo de carvão
- eliminar etapas do processamento
- ser o mais contínuo possível
- minimizar a dissolução de carbono e a incorporação de silício, permitindo eliminar etapas de refino
- adaptável para diferentes matérias primas e diferentes níveis de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

Processos de Redução Direta

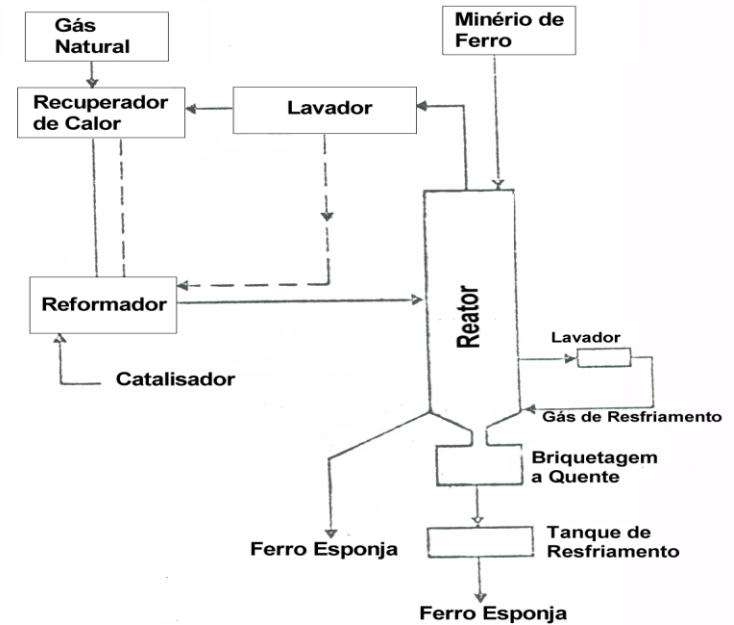
- a redução do minério de ferro a ferro metálico é efetuada sem que ocorra a fusão da carga do reator.
- o produto metálico é obtido na fase sólida
- é chamado de ferro-esponja (DRI, em inglês, iniciais de Direct Reduced Iron)
- pode ser briquetado a quente, obtendo-se o briquete (HBI)
- o ferro-esponja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

Processos de Redução Direta

Processo a Carvão



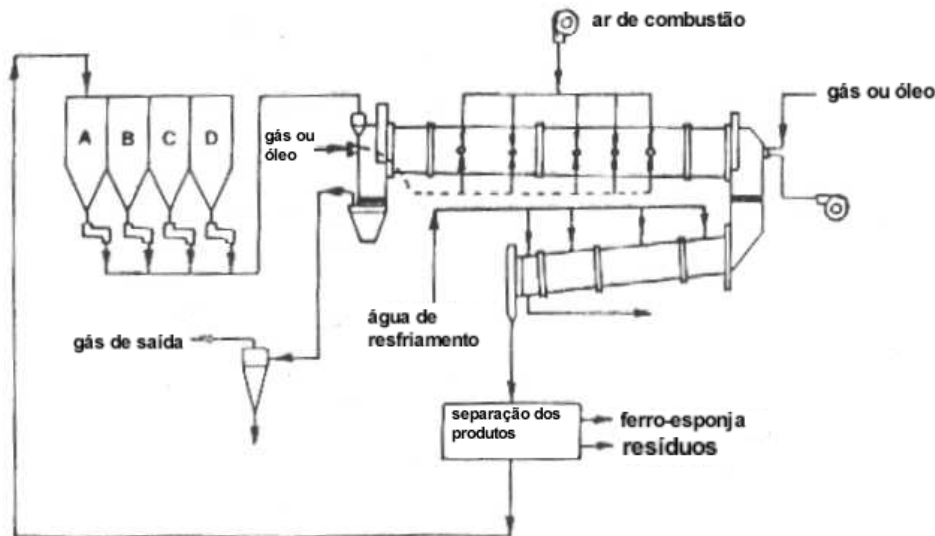
Processo a Gás Natural



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: $Fe_nO_m + m/2 C = n Fe + m/2 CO$



A: carvão retornado; B: Carvão novo
C: dolomita/calcáreo; D: minério/pelotas

Forno rotativo-processo a carvão



Processos a Gás Natural

Gás Natural – basicamente metano, CH₄

Bom combustível

Decompõe-se acima de 500 °C

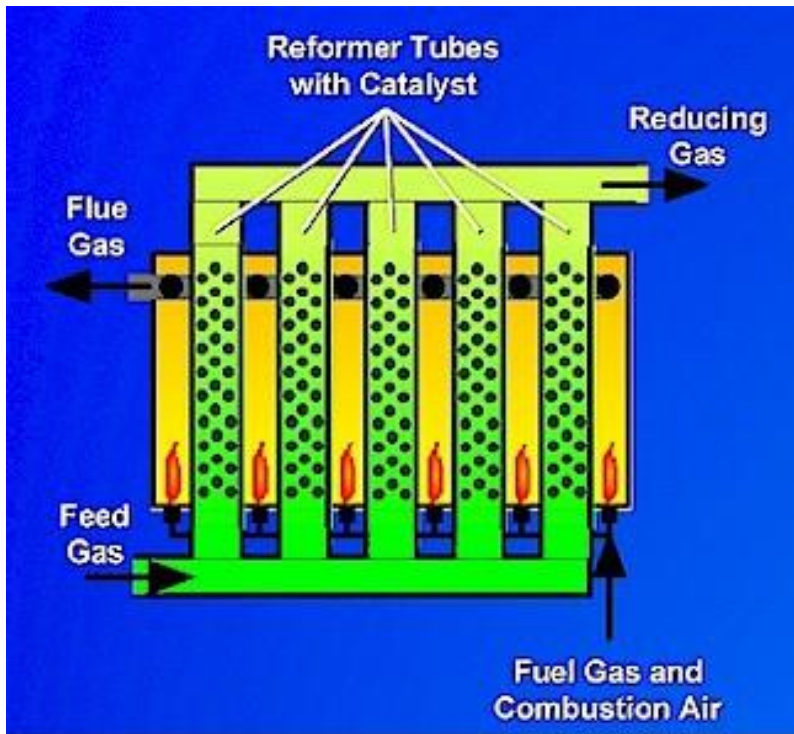
Como redutor, precisa ser transformado em monóxido de carbono (CO) e hidrogênio H₂

processos industriais que utilizam gás natural

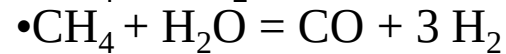
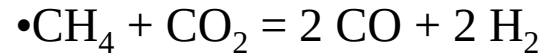
processos em reatores verticais, MIDREX e HyL III

processos em leito fluidizado (FIOR, Finmet)

Reforma de gás natural



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

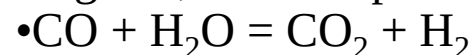


• reações endotérmicas (favorecidas a altas temperaturas)

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

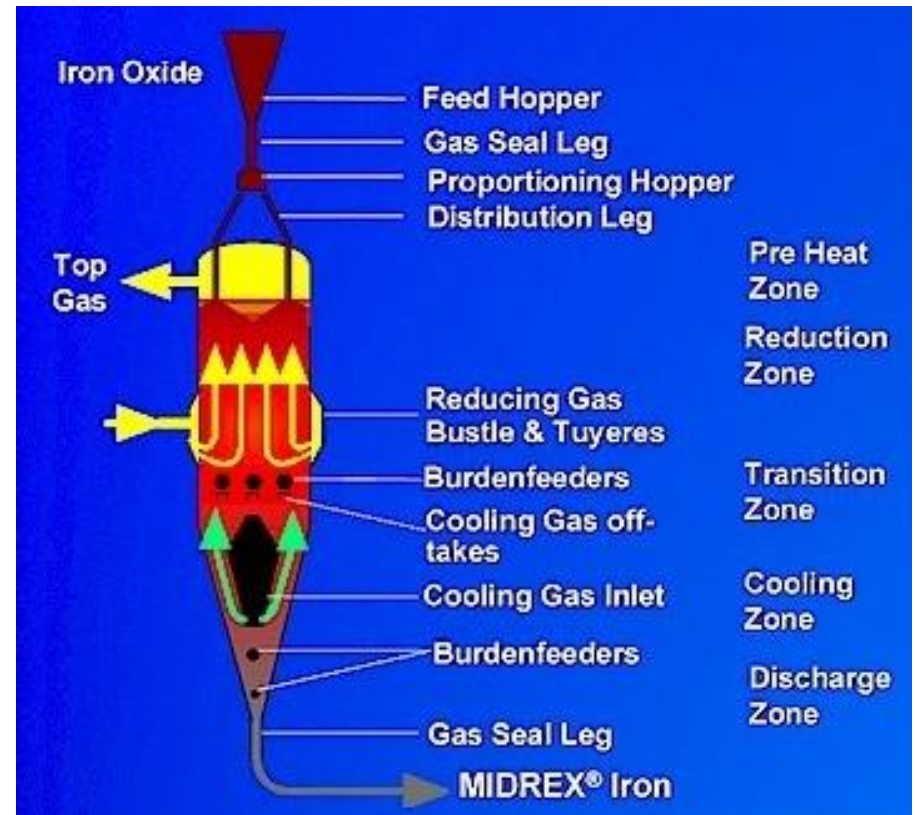
• Em redução direta, os produtos da redução contêm CO_2 e H_2O , podem ser recirculados e usados nas reações de reforma.

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



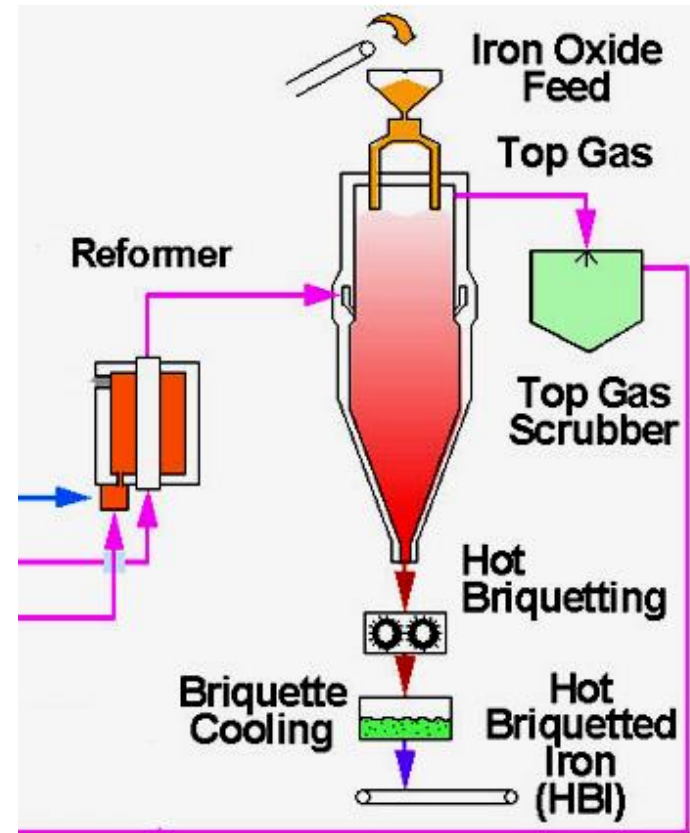
Processo MIDREX

- 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

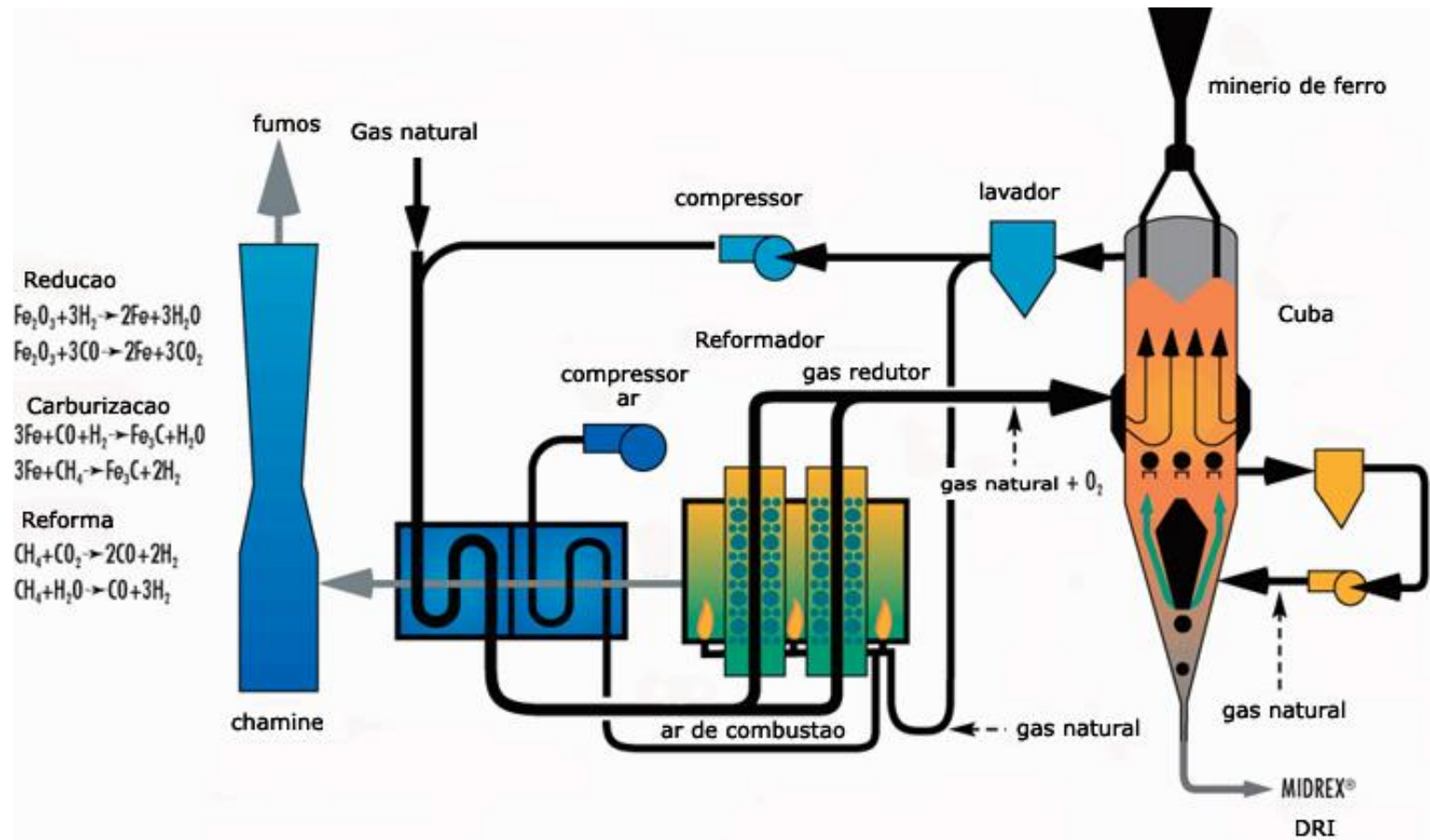


Processo MIDREX

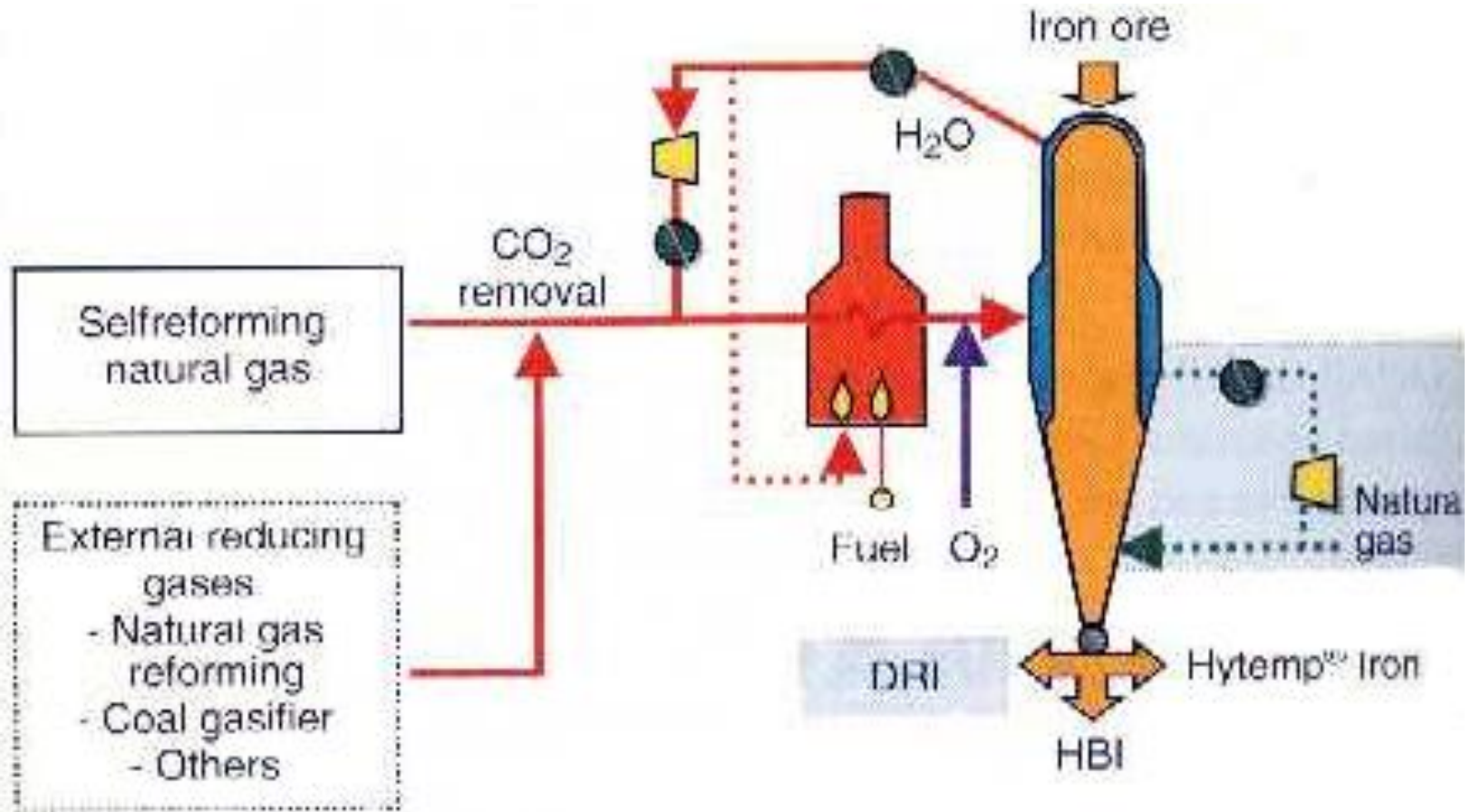
- carbura o ferro-esponja entre 1,4% e 1,7 % de carbono, diminui a possibilidade de reoxidação e auxilia na etapa posterior de fusão em forno elétrico.
- pode-se fazer a briquetagem a quente do ferro-esponja,
- O grau de metalização do ferro-esponja, é definido como
- $G_m = \left[\frac{\% \text{Fe metálico}}{\% \text{Fe total}} \right] \times 100$
- 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 HyL (Energiron)

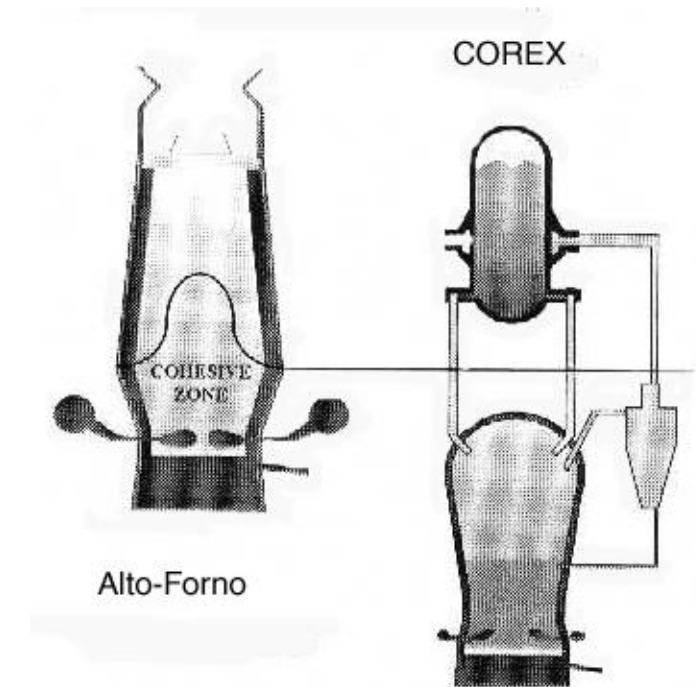


Ferro-esponja (DRI) Briquetes a quente (HBI)



Processo COREX

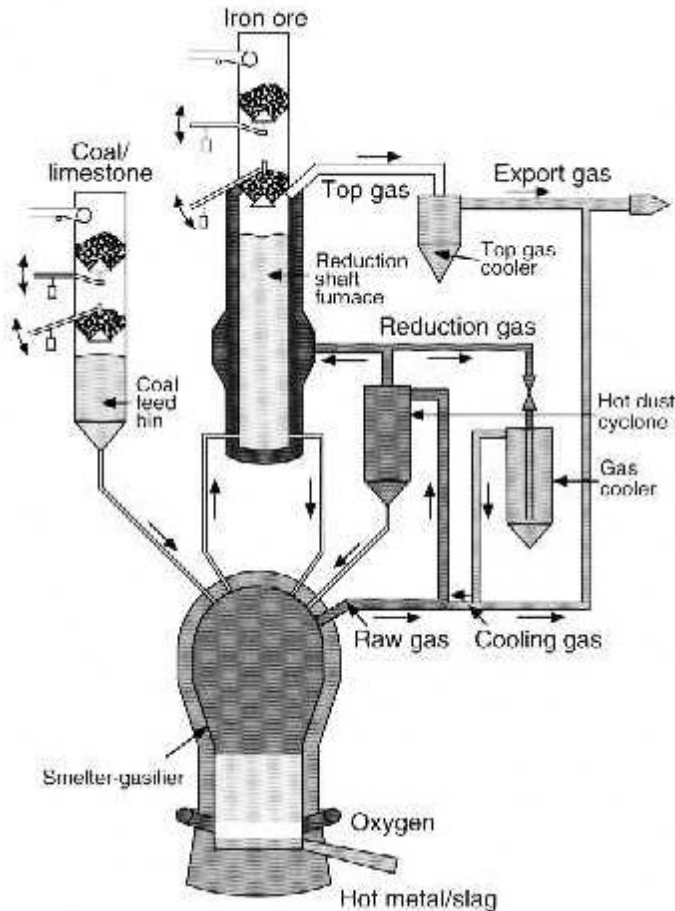
- principal conceito: divisão do alto-forno em dois: um reator realiza a redução quase total do minério de ferro a ferro metálico, no estado sólido, e este material reduzido é carregado em reator que realiza a fusão do ferro metálico;
- a energia para o processo é fornecida pela queima de carvão no mesmo 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, o gás proveniente do reator de fusão 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.

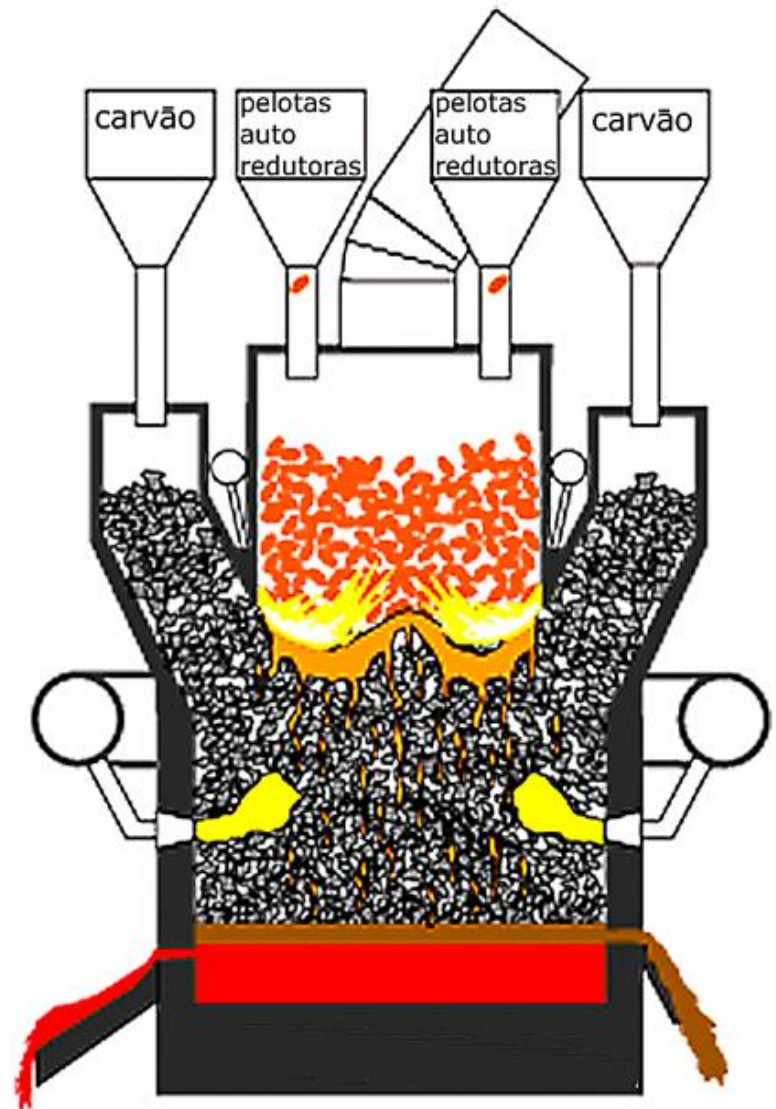
—o gás tem alto poder calorífico, e pode ser usado para geração de eletricidade, como gás redutor para produção de ferro-esponja ou para aquecimento em geral.

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.
- apresenta vantagens cinéticas significativas sobre a redução convencional por gases.
- 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 (cimento Portland, escória de alto-forno, etc) que forneça resistência a frio
- mais promissores: processo Tecnored, desenvolvido no Brasil, e o processo ITmk3.

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

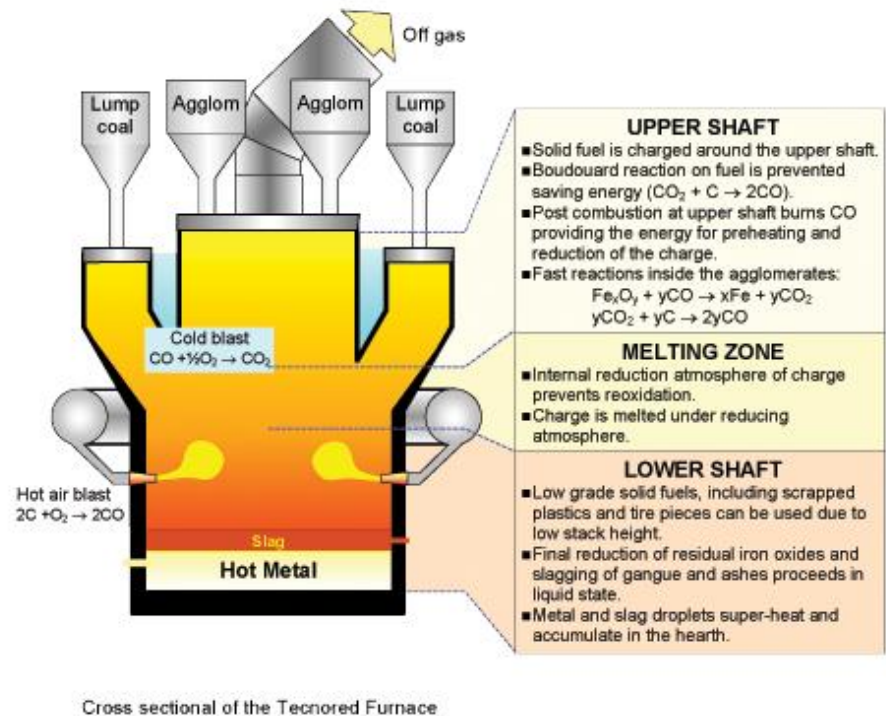


Processo Tecnored

—ventaneiras secundárias injetam ar frio para gerar calor adicional pela queima dos gases ascendentes, gerando zona de alta temperatura onde as pelotas fundem-se.

— material líquido percorre a cama de material carbonoso, depositando-se no cadinho, ganga forma um escória e o metal é vazado de tempos em tempos como um ferro gusa.

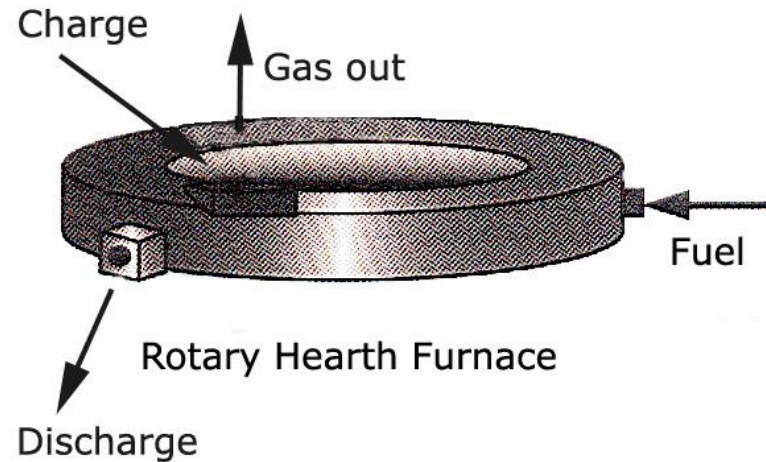
— altura da carga na cuba central entre 2 e 3 m, pelota necessita certa resistência mecânica, muito inferior daquela requerida por um alto-forno.



Processos de Soleira Rotativa

Processo Fastmet

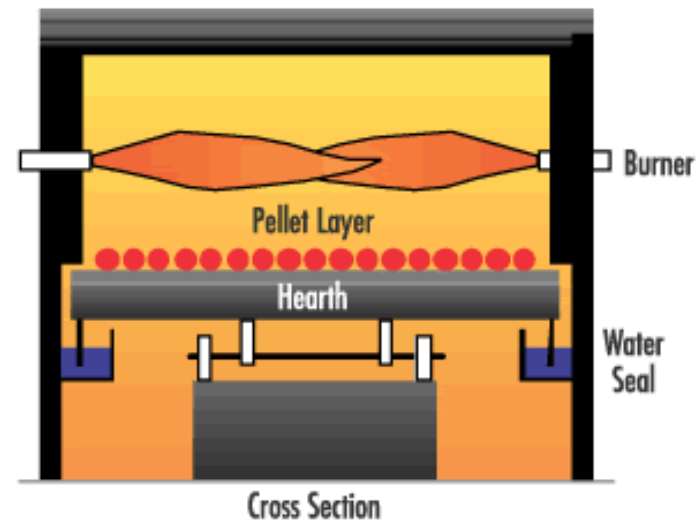
- emprega forno de soleira rotativa para a redução de pelotas auto-redutoras
- camadas de apenas 2 ou 3 pelotas sobre esteira
- pelotas não sofrem solicitação mecânica, não necessitando ter alta resistência
- a pelota não precisa de aglomerantes hidráulicos, que implicam em tempos de cura longos (7 a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



Processos de Soleira Rotativa

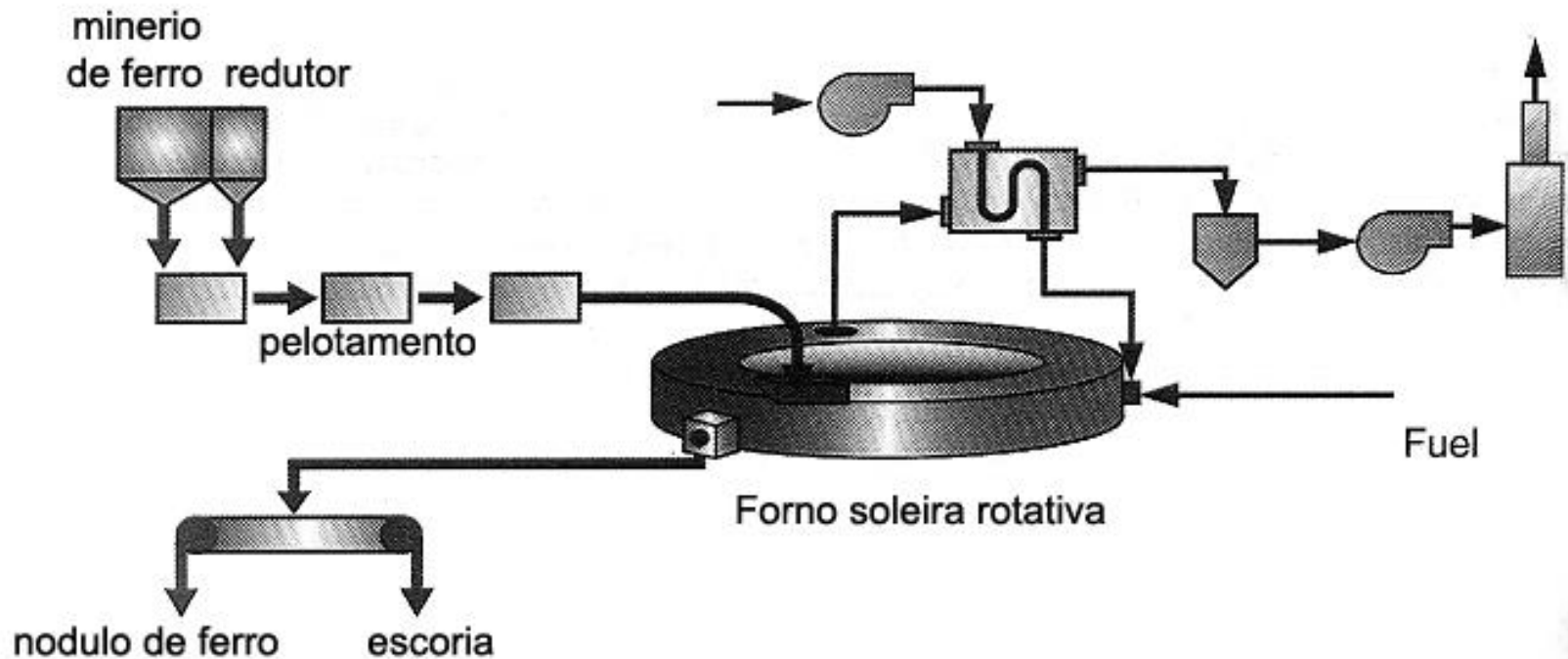
Processo Fastmet

- 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



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

