

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO

ESCOLA POLITÉCNICA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA METALÚRGICA E DE MATERIAIS

CURSO DE ENGENHARIA METALÚRGICA

Autora Elisa Kimus Dias Passos

## **Avaliação das Rotas Alternativas de Produção de Ferro Gusa**

Aprovado por:

---

Prof. Flávio Teixeira da Silva - PEMM-COPPE/UFRJ

(Orientador)

---

Prof. Achilles Junqueira Bourdot Dutra - PEMM-COPPE/UFRJ

---

Engenheiro Marco Antônio Bulhões Marcial - Gerente de Projeto –  
Promon Engenharia Ltda.

Rio de Janeiro, Junho/2009

PASSOS, ELISA KIMUS DIAS

AVALIAÇÃO DAS ROTAS ALTERNATIVAS DE PRODUÇÃO DE  
FERRO GUSA

[RIO DE JANEIRO] 2009

(DEMM-POLI/UFRJ, ENGENHARIA METALÚRGICA, 2009)

p.63

Projeto de Formatura – Universidade Federal do Rio de Janeiro

Escola Politécnica, Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Curso de  
Engenharia Metalúrgica

1- Gusa

2- Processos Alternativos

3- Carvão

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a minha mãe, Lúcia de Fátima Kimus Dias, por todo carinho e dedicação durante todos esses anos.

Aos meus avós, José Augusto Dias e Yeda Cândida Kimus Dias, que desde o vestibular, estiveram do meu lado, me dando força e coragem para enfrentar o desafio e realizar o meu sonho de estudar na UFRJ.

Ao meu namorado, Diego Felix de Almeida, que compartilhou comigo tantos momentos difíceis durante minha vida universitária. Sem o seu amor e amizade tudo teria sido muito mais difícil.

Aos meus professores que sempre me colocaram diante de desafios permitindo e apoiando o meu desenvolvimento e amadurecimento acadêmicos, com suas mentes brilhantes e frases inesquecíveis que certamente estarão presentes em grandes momentos da minha vida.

Ao Professor Flávio Teixeira da Silva, não só pela orientação criteriosa para a concepção deste trabalho, como também pelo carinho que sempre me dedicou e, fundamentalmente, por suas aulas fantásticas que fizeram com que eu me apaixonasse pela Siderurgia.

Aos profissionais da Promon Engenharia que sempre me apoiaram e contribuíram para o meu crescimento profissional.

Ao meu supervisor de estágio, Marco Antônio Bulhões Marcial, pelas grandes lições aprendidas, por seu exemplo de líder e brilhantismo profissional e, em especial, pelo sorriso incentivador diante das minhas dúvidas.

Ao meu orientador acadêmico, Achilles Junqueira Burdot Dutra, pelo incentivo, simpatia e presteza no auxílio quando necessário.

Aos meus amigos por fazerem os meus dias mais alegres.

Agradeço, ainda, àqueles, conhecidos ou não, que a todo momento me ensinam a ser uma pessoa melhor.

E ao meu pai que, onde quer que esteja, sei que protege e ilumina minha vida.

Resumo do projeto de formatura apresentado ao DEMM/UFRJ como parte integrante dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Engenheira Metalúrgica.

## AVALIAÇÃO DAS ROTAS ALTERNATIVAS DE PRODUÇÃO DE FERRO GUSA

Elisa Kimus Dias Passos

Junho/2009

Orientador: Flávio Teixeira da Silva

Palavras-chave: Ferro Gusa, Processos Alternativos, Carvões não Coqueificáveis

O presente trabalho se dedica a descrever as principais tecnologias de produção de ferro gusa líquido que estão sendo desenvolvidas no mundo com objetivo de otimizar os processos de redução de minério de ferro através de utilização de matérias-primas de menor custo e processos mais eficientes. Essas novas rotas trazem inovações como a não utilização de plantas de sinterização e coqueificação altamente poluentes, as quais geram poeiras e gases SO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub> (dioxinas e furanos), bem como a utilização de carvões não coqueificáveis como fonte térmica e de agente redutor. A utilização de oxigênio em substituição ao ar gera um gás de processo contendo excesso de agente redutor, o qual pode ser utilizado na geração de energia ou como redutor numa planta de redução direta anexa ao reator em questão.

## Índice

<b>1. Introdução.....</b>	<b>1</b>
<b>2. Minério de Ferro e a Redução dos Minérios de Ferro.....</b>	<b>3</b>
<b>3. A Fusão Redutora em Alto-Forno .....</b>	<b>4</b>
<b>4. As Rotas Alternativas de Produção de Ferro Gusa .....</b>	<b>7</b>
4.1    Processo COREX® .....	7
4.2    Processo TECNORED® .....	11
4.3    Processo OXYCUP® .....	18
4.4    Processo FINEX® .....	22
4.5    Processo DIOS® .....	25
4.6    Processo HISMELT® .....	27
4.7    Processo AUSIRON® .....	32
4.8    Processo PRIMUS® .....	34
4.9    Processo ROMELT® .....	37
4.10   Processo ULCOS® .....	38
<b>5. Análise dos Processos .....</b>	<b>43</b>
5.1    Quanto à natureza das matérias primas da alimentação .....	44
5.2    Quanto ao Tipo de Reator e a Natureza da Redução.....	46
5.3    Quanto às Emissões (Poeiras e Gás) .....	48
5.4    Quanto ao Custo de Capital.....	50
5.5    Quanto ao Consumo de Matérias-Primas (Carvão e Oxigênio).....	53
5.6    Quanto à composição química do ferro gusa .....	54
<b>6. Considerações Sobre o Confronto Fusão Redutora X Redução Direta .....</b>	<b>55</b>

<b>7. A Influência da Crise Econômica no Investimento em Tecnologias.....</b>	<b>56</b>
<b>8. Considerações Finais.....</b>	<b>59</b>
<b>9. Referências Bibliográficas:.....</b>	<b>61</b>

## **1. Introdução**

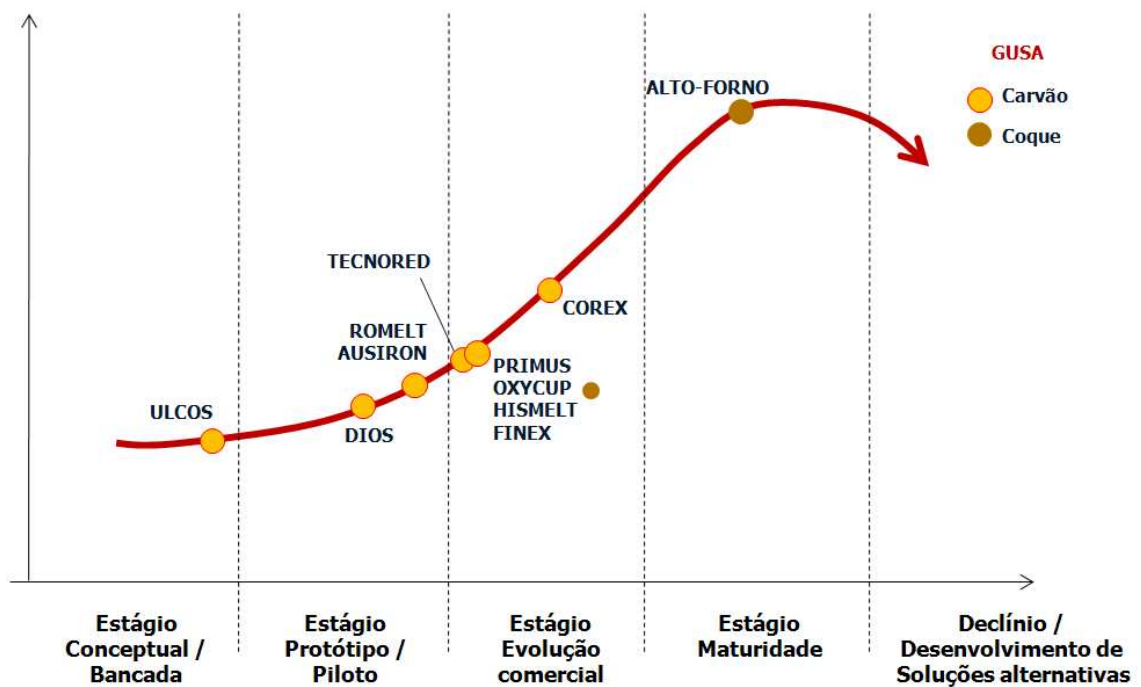
O setor siderúrgico está caracterizado por uma forte competição internacional, forçando as empresas a realizarem contínua redução de custos e melhorias nos índices de qualidade de seus processos e produtos. Principalmente no que diz respeito ao processo de redução do minério de ferro, que responde por grande parte do custo de produção do aço, muitas empresas têm focado os seus esforços na melhoria nesta área. A cada dia crescem as exigências por melhoramentos nos custos operacionais, na qualidade dos produtos e principalmente em medidas que reduzam os impactos ambientais causados pelos processos siderúrgicos.

O alto-forno, consagrado em todo mundo como principal forno de redução de minério de ferro, apesar de sua alta produtividade, apresenta características que não correspondem às expectativas do mercado atual. O alto-forno é inflexível, operando com um carregamento metálico e de coque com especificação definida, o que acarreta em impactos nos custos de produção. Altos preços são pagos por essas matérias primas, para que as mesmas possam cumprir as especificações desejadas [6].

Investimentos altos em modernização de alto-fornos para um pequeno incremento na sua capacidade de produção são dificilmente justificáveis [6]. O custo para construir um alto-forno novo ou reformar o atual é muito alto e o custo para manter coquerias nos padrões de níveis de emissão cada vez mais exigentes podem não compensar.

No entanto novas tecnologias de redução vêm sendo desenvolvidas em diversas partes do mundo para reduzir minérios de ferro de forma limpa e de menor custo. A figura 1 ilustra o estágio de evolução destas novas tecnologias em comparação ao alto-forno.





**Figura 1** – Estágio de evolução das tecnologias alternativas a fusão redutora em alto-forno [15].

A alternativa denominada de Fusão Redutora, também conhecida como fusão em banho metálico, é o processo onde o óxido de ferro é reduzido a ferro metálico no interior de um banho de ferro líquido e escória.

A alternativa denominada Auto-Redução pode produzir tanto metal líquido quanto ferro-esponja. Esse processo baseia-se em reações sólido-sólido entre o óxido de ferro e o carbono, com a participação de intermediários gasosos gerados no interior dos aglomerados auto-redutores [16]. As reações são rápidas devido ao contato íntimo entre as partículas e pela ausência de nitrogênio na fase gasosa.

O principal objetivo desse projeto foi o de analisar as diferenças entre as diferentes rotas de processamento e a partir daí poder avaliar os seus respectivos potenciais de

desenvolvimento. É importante salientar que alguns desses processos já existem em escala comercial e outros apenas em escala piloto ou de laboratório.

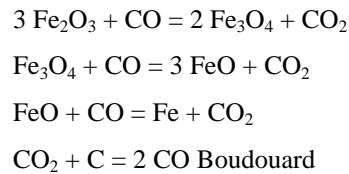
## **2. Minério de Ferro e a Redução dos Minérios de Ferro**

O minério de ferro é uma rocha rica em óxidos ferrosos de onde se pode extrair ferro metálico de forma economicamente viável. O ferro geralmente encontra-se na forma de óxidos como hematita ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), magnetita ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ), limonita ( $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ ) ou como o carbonato siderita ( $\text{FeCO}_3$ ). O minério de ferro, assim como outros minérios, não tem utilidade na forma em que é encontrado na natureza. Os óxidos presentes no minério precisam ser reduzidos para obtenção do metal.

O minério de ferro é abundante no mundo, porém suas jazidas concentram-se em alguns países, sendo que cinco possuem 77% das ocorrências totais. O Brasil detém 8,3 % das reservas totais, a quinta maior do mundo, equivalente a 17 bilhões de toneladas. O nosso minério alcança o teor de 66% de ferro, enquanto a média mundial é de 45%. A produção se concentra nos estados de Minas Gerais, Pará e Mato Grosso do Sul.

Do total de minério de ferro processado no mundo, 78% correspondem à produção de finos para pelotização e sinterização. O minério de ferro apresenta uma grande importância para a balança comercial brasileira, tanto como insumo mineral quanto como matéria prima para a produção siderúrgica (produtos semi-acabados e acabados).

A redução do minério de ferro é feita em fornos de alta temperatura, com o intuito de favorecer a cinética da redução bem como as reações de escorificação da ganga. Para que essas reações ocorram, é necessária a participação do coque ou do carvão vegetal como fonte térmica e de agente redutor. O monóxido de carbono produzido reage com o óxido de ferro produzindo ferro metálico e dióxido de carbono. As principais reações de redução que ocorrem durante esse processo são:



### 3. A Fusão Redutora em Alto-Forno

O alto-forno é um forno de cuba com 20 a 30 metros de altura, revestida de material refratário, no qual é produzido o ferro gusa líquido tendo como impurezas dissolvidas principalmente o carbono (4,0-4,5%) e outras impurezas menores.

O processo de fusão redutora de óxidos de ferro no alto-forno é constituído das seguintes etapas: pesagem da carga (minério e/ou aglomerado + coque + fundentes), alimentação da carga, redução da carga metálica em contra corrente com o agente redutor, produção de ferro gusa líquido, escorificação das impurezas e coleta e limpeza do gás de topo. O tempo de residência do processo é de 6 a 8 horas, dando origem a um ferro gusa e uma escória. O gusa é vazado no carro torpedo e transferido para aciaria para sua conversão em aço.

O processo de redução dos óxidos de ferro se inicia na região da cuba, onde ocorrem as reações de redução indireta dos óxidos de ferro. Com o aumento da temperatura e do poder redutor do gás, ocorrerá a fusão do metal e a escorificação das impurezas. Neste estágio, o teor de óxido de ferro dissolvido na escória é razoavelmente elevado; no entanto, ao percolar o volume de coque na região do homem morto, esse óxido de ferro é reduzido a ferro metálico fazendo com que os teores de óxido de ferro dissolvidos na escória sejam extremamente baixos.

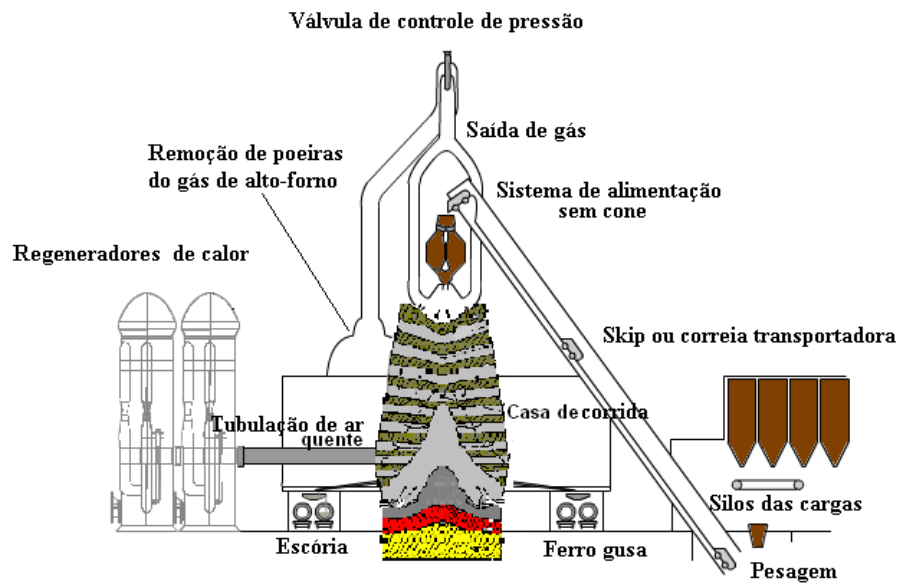
Na região das ventaneiras, o ar pré-aquecido injetado a temperaturas variando entre 900-1350° C reage com o carbono do coque gerando calor e agente redutor.

Durante a redução, observa-se a contínua geração o de um gás de baixo poder calorífico denominado gás de alto forno. Esse gás ao sair pelo topo forno segue para a unidade de limpeza de gases para retirada de material particulado e posteriormente acumulado num gasômetro.

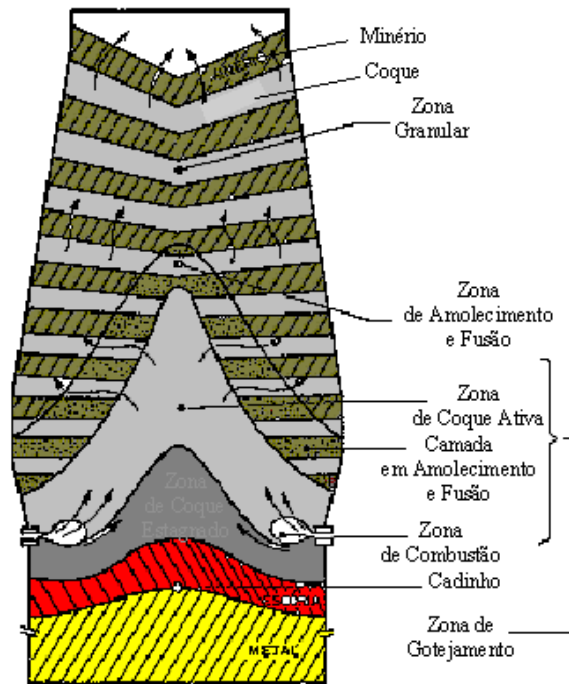
Uma evolução tecnológica do processo de fusão redutora foi através da injeção de carvão pulverizado pelas ventaneiras denominado PCI. A injeção de finos substituindo parcialmente o coque (entre 180 e 200 kg/t de gusa) possibilitou uma economia substancial no processo (insumo importado que corresponde a 65% dos gastos com a produção de gusa).

Para a produção de uma tonelada de ferro-gusa são necessários, em média, 1700 kg de minério de ferro (na forma de sinter, pelota ou do próprio minério), 400 a 600 kg de coque ou outro combustível à base de C, 140 kg de cal (CaO) ou magnésia (MgO) e 1600 a 2000 kg de ar. Os alto-fornos produzem matéria-prima (ferro gusa) para 90% da produção mundial de aço, estimada em 1,2 bilhões de toneladas.

A figura 2 ilustra as diferentes unidades relacionadas ao processo de fusão redutora em alto-forno e a figura 3 a distribuição da carga e as diferentes zonas no interior do forno.



**Figura 2** – Alto forno e equipamentos auxiliares.



**Figura 3** – Distribuição da carga e zonas do alto forno

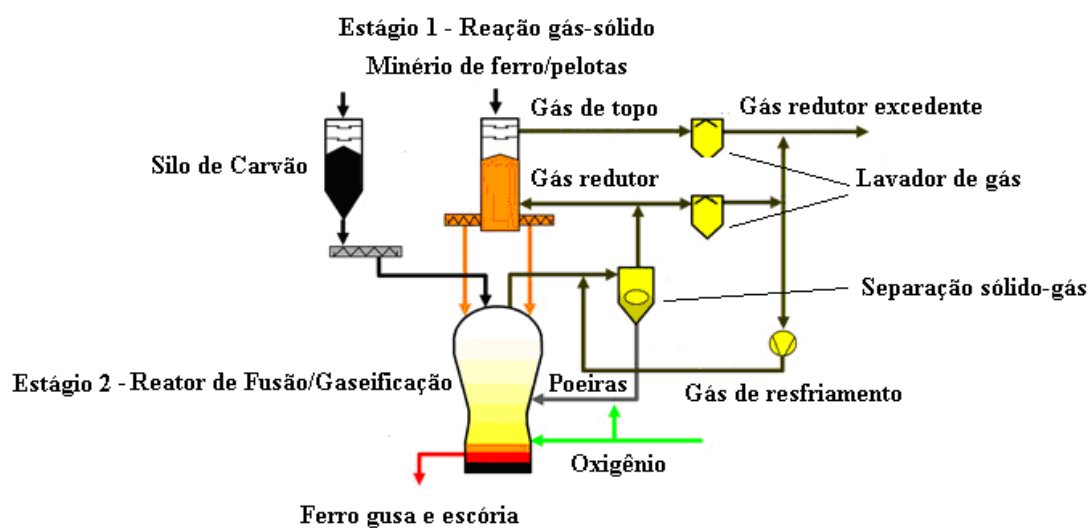
## **4. As Rotas Alternativas de Produção de Ferro Gusa**

### **4.1 Processo COREX®**

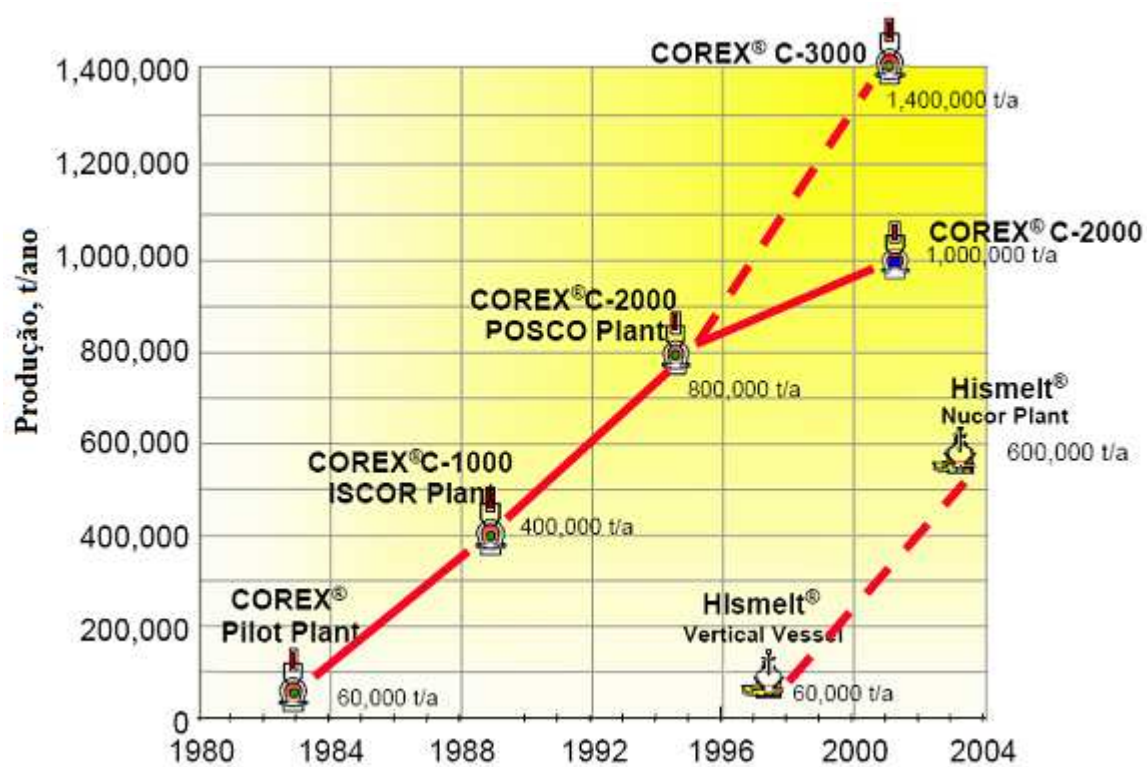
O processo COREX® é atualmente a única rota alternativa de produção de gusa considerada comercial. Essa tecnologia foi desenvolvida no final dos anos 70 pela Voest-Alpine Industrieanlagenbau (VAI) - Siemens VAI [27]. Sua primeira instalação foi implantada em 1989 e atualmente existem as seguintes plantas industriais:

- COREX® C-1000 – Planta de produção nominal de 1 tonelada de metal por dia da planta ISCOR na África do Sul, pertencente ao grupo ARCELOR-MITTAL. A planta é a única no mundo com sucesso na combinação de processos COREX® e MIDREX®, tornando-se líder no controle de emissões e gestão ambiental. Produção de 600.000 t/a.
- COREX® C-2000 – Planta de produção nominal de 2 toneladas de metal por dia. A POSCO possui 2 plantas de 750.000 t/a.
- COREX® C-2000 – Planta com produção nominal de 2 toneladas de metal por dia. A planta da JSW Limited na Índia tem 2 unidades instaladas de 800.000 t/a.
- COREX® C-3000 - Em novembro de 2007 foi construída a primeira planta C-3000 com produção nominal de 1,5 milhões de tonelada/ano na China, pela empresa Baosteel.

A figura 4 ilustra o fluxograma do processo COREX® e a figura 5 a evolução da capacidade de produção dos reatores COREX® e HISMELT®.



**Figura 4** – Fluxograma do processo COREX® [27].



**Figura 5** – Evolução das capacidades dos reatores COREX® e HISMELT® [2].

A alimentação do processo COREX é constituída de minério grosseiro (lump), sinter ou pelotas e a fonte de material carbonoso é carvão não coqueificável, pois o processo não requer a resistência mecânica na zona coesiva para garantir a permeabilidade, como é necessária nos altos-fornos. O carvão é injetado através de um sistema de tremonhas em temperatura em torno de 1000° C. Esse carvão fornece todas as outras características necessárias ao processo da mesma forma que o coque, atuando na redução do minério, geração de gás e carburação do metal. Os sub-produtos da gaseificação do carbono como alcatrão, fenóis, etc. não são emitidos na atmosfera pois são craqueados em CO e H<sub>2</sub> no reator inferior. Assim não há geração de sub-produtos altamente poluentes.

O processo COREX® possui dois estágios. No primeiro estágio (reator superior), ocorre a redução dos óxidos de ferro provenientes do minério, sinter, pelotas ou uma mistura deles em contracorrente com o gás redutor, produzindo ferro esponja (DRI). O gás redutor é oriundo do segundo estágio denominado fusão/gaseificação e tem composição aproximada de 65-70% de CO, 20-25% de H<sub>2</sub>, 2-4% de CO<sub>2</sub>, finos de carvão, cinzas e poeira de ferro [29]. Essa poeira é removida do gás em ciclone e recirculada no processo.

Devido à elevada temperatura do gás redutor que evolui do segundo estágio, é necessário o seu resfriamento com um gás de resfriamento antes de sua utilização no primeiro estágio (800-850°C) [29]. No estágio de fusão/gaseificação, são introduzidos carvão e oxigênio puro, que entram em combustão gerando um gás redutor de alta temperatura, fornecendo o calor necessário para fundir o metal e escorificar as impurezas.

Com a separação entre as etapas de redução e de fusão/gaseificação, obtém-se grande flexibilidade na utilização de diferentes tipos de carvão em substituição ao coque metalúrgico consumido nos altos-fornos [29]. O processo COREX® permite a utilização de vários tipos de carvões não coqueificáveis como combustível. O carvão



alimentado no processo é de granulometria grosseira e os finos gerados no transporte e estocagem podem ser alimentados diretamente no reator de fusão/gaseificação do COREX®. A planta COREX® da POSCO mostrou que é possível operar o reator com 0% de coque. Por outro lado, outras plantas operam com 2-10 % de coque de baixa qualidade, cujo custo é similar ao dos finos de coque.

Apesar de ocorrer uma redução no estado sólido formando ferro esponja em uma etapa intermediária, o produto final do processo é um gusa líquido que é vazado convencionalmente em carros torpedos, como nos altos-fornos. As principais características desse gusa são alta temperatura (1480 – 1510° C) e baixos teores de enxofre, nitrogênio e de impurezas. A qualidade desse ferro gusa é similar ao do obtido pelos altos fornos; no entanto, o processo COREX® tem um consumo específico de carvão superior ao alto-forno (1000kg/t de gusa no COREX® e 700kg/t no alto-forno) [22], gerando um gás de elevado poder redutor oriundo do reator de fusão/gaseificação. O consumo desse gás na etapa de redução primária e o excedente gás de topo de médio poder calorífico determina a eficiência energética do processo. Acredita-se que a planta COREX® C-3000, idealizada para uma usina integrada, possa substituir o alto-forno ou se tornar fonte de ferro primário para mini mills.

O gás de topo do primeiro estágio e o gás de resfriamento são limpos no lavador de gases e uma lama é gerada [29]. Esse gás pode ser utilizado em diversas aplicações, como fonte de energia elétrica, produção de DRI e aquecimento nas unidades da usina ou comercializado, pois possui um poder calorífico da ordem de 7, 500 – 8000 kJ/m³.

O carvão alimentado no reator possui relativamente alto teor de enxofre que é transferido para escória como no alto-forno, evitando assim emissões para a atmosfera. A emissão de enxofre do COREX® (10-70 ppm H<sub>2</sub>S) depende do tipo de carvão. O uso de O<sub>2</sub> puro ao invés de ar na gaseificação do carvão evita a formação de NO<sub>x</sub> e cianeto (CN) gerando um ganho adicional em energia para o processo. A planta de COREX®

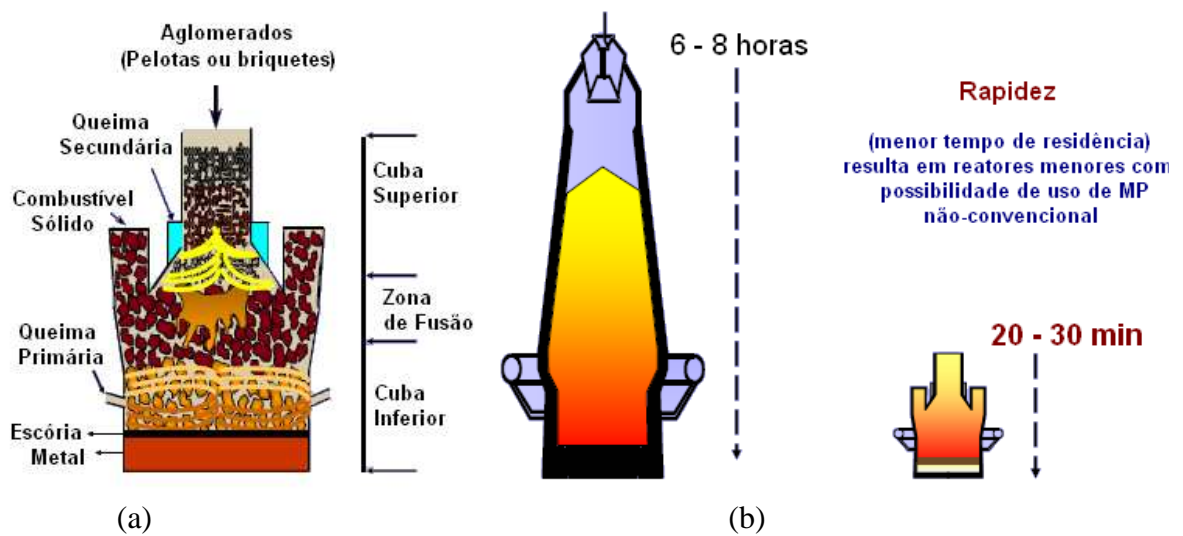
emite uma quantidade insignificante de NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub>, poeira, fenóis, sulfetos e amônia [29]. Devido à alta temperatura do reator de fusão-gaseificação, uma porção dos hidrocarbonetos provenientes da volatilização do carvão são imediatamente convertidos a monóxido de carbono e hidrogênio.

Pelo fato do processo COREX® não necessitar as unidades de sinterização e coqueificação, o custo da fabricação de metal é bem menor. Dependendo das condições locais, pode-se ter uma redução de mais de 20% nos custos do ferro gusa em relação aos processos convencionais [27].

## **4.2 Processo TECNORED®**

A Tecnologia TECNORED® é uma alternativa para a produção de gusa líquido para aciarias elétricas, convertedores, fundições e para produção de grânulos e pães de gusa. Essa tecnologia desenvolvida pela Tecnologos, numa parceria com a PUC/RJ e a USP, é genuinamente brasileira.

O Processo TECNORED® pode resolver alguns problemas enfrentados pelas siderúrgicas como, por exemplo, a implantação de unidades de pequeno porte para suprir capacidades ociosas de convertedores, contrabalançar paradas programadas de altos-fornos ou fornecer metal líquido para mini-mills. O processo produz ferro gusa líquido e escorifica as impurezas presentes no minério e nas cinzas do coque. A grande vantagem da produção de gusa líquido em relação ao ferro esponja está relacionada a diminuição do consumo de energia e aumento de produtividade na produção do aço. A figura 6 ilustra esquematicamente o reator TECNORED® e uma comparação entre os tempos de operação entre esse processo e o alto-forno.



**Figura 6** – (a) – Detalhes do reator TECNORED®. (b) – Comparação dos tempos do processo de fusão redutora em alto forno e do processo TECNORED® [9].

O processo TECNORED® foi projetado nas seguintes versões:

- **Smelter** – Principal versão - Compreende as etapas de redução e fusão dos aglomerados autoredutores num tempo muito curto (20 a 30 minutos) [14].
- **Finisher** – Utiliza como matéria prima o ferro esponja (DRI ou HBI), aproveitando sua eficiência térmica e a condição fortemente redutora na parte inferior da cuba, fundindo a carga e eliminando o teor de oxigênio residual do ferro esponja [14].
- **Melter** – Utiliza cargas metálicas usuais e não-usuais como resíduos automotivos e sucata, otimizando a utilização da carga metálica [14].

- **TRIOS** (TECNORED® Residual Iron Oxide Smelter) - Versão da tecnologia que permite utilizar os enormes passivos acumulados do setor siderúrgico [14].

A primeira unidade semi-industrial do Processo TECNORED® foi iniciada em 2006 pela Aço Villares, que detém 10% da Tecno-Logos. Sendo uma planta de demonstração, como objetivo difundir a nova tecnologia, iniciou sua operação no início de 2007 com uma produção de 75.000 t/ano de ferro gusa na fase I e 150.000 t/ano na fase II. A Aço Villares investiu R\$ 498 milhões nesse projeto.

O desenvolvimento do processo resultou de repetidas corridas experimentais em um módulo de verdadeira grandeza do forno e da utilização de modelos matemáticos e fluidodinâmicos e estudos de laboratório. A seguir são listadas as principais características do processo TECNORED® [10]:

- Flexibilidade no uso de matéria-prima;
- Dispensa de unidades de coqueria e sinterização;
- Maior eficácia para a reciclagem dos resíduos gerados pela unidade (siderurgia) ou por terceiros;
- Baixos custos fixos;
- Maior flexibilidade de produção para atender às variações de demanda;
- Maior compatibilidade ambiental;
- Baixo custo operacional, mesmo para escalas de produção mínimas;
- Baixo custo de instalação, ampliação e reforma;
- Boa adequação às instalações e procedimentos existentes;
- Uso otimizado da área disponível.
- Baixo custo com matérias-primas
- Alta produtividade e eficiência de energia no processo
- Metalização (~99%)

- Combustíveis de baixo custo reduzindo gastos com energia elétrica e com eletrodos.
- Alta eficiência energética
- Não utiliza oxigênio

O Processo TECNORED® baseia-se na redução em regime de contracorrente. Foi projetado e desenvolvido para ser um processo que não utiliza coque na sua produção. Diferente de outros processos de fusão redutora o TECNORED® processa toda a sua carga em apenas um estágio, sem necessidade de transferências entre reatores, resultando em uma operação simples e conseqüentemente baixos custos de manutenção.

A alimentação metálica é na forma de aglomerados auto-redutores de cura a frio que se metalizam rapidamente. A quantidade de carbono nesse aglomerado é calculada para garantir um elevado grau de metalização. A redução se limita às reações sólido-sólido via agentes gasosos, sem a participação da atmosfera do reator. A fonte térmica do processo é o carvão mineral não coqueificável, que é bitolado e carregado na cuba inferior pela laterais do forno [13]. A concepção e projeto do reator permitem um aproveitamento substancial do calor sensível e do calor latente.

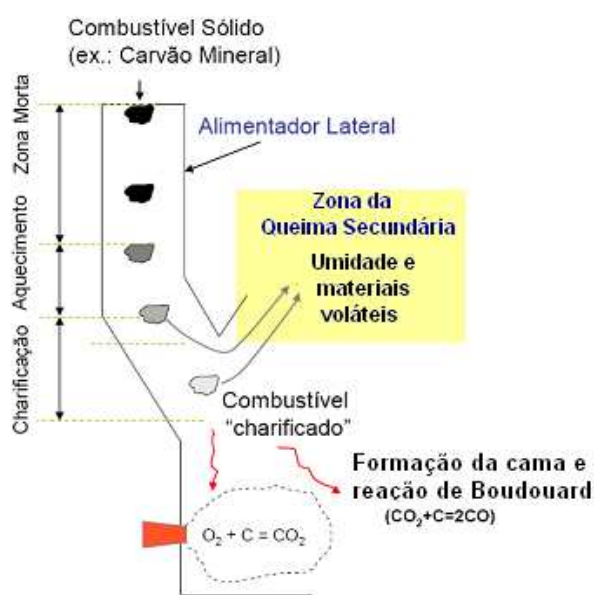
O processo TECNORED® permite a utilização de minérios de baixo teor, ou seja, de baixo custo, de forma limpa e eficiente. Permite também a utilização de materiais finos, minérios de baixo teor de ferro, carepas, pós, sucatas e lamas siderúrgicas. Esses materiais, misturados com fundentes e ligantes, são processados em discos tradicionais de pelotização produzindo aglomerados auto-redutores (briquetes ou pelotas) que são curados e secos em temperatura até 200° C para aumentar a sua resistência mecânica antes de sua alimentação no forno. A pressão interna do forno é em torno de 0,2 a 0,35 atm [7]. O tempo de redução/fusão é de cerca de 20-30 minutos. Os aglomerados produzidos são então reduzidos e fundidos no forno TECNORED®, produzindo metal líquido e escória com características similares às do alto-forno.

Devido às dimensões do reator, esses combustíveis sólidos não necessitam possuir elevadas propriedades mecânicas como exigido para o coque da fusão redutora em alto forno. Devido a geometria diferenciada do reator TECNORED® (alimentação separada do combustível e da carga) evita-se a reação de gaseificação de carbono na cuba superior do forno, o que acarreta numa economia de combustível e numa melhor distribuição térmica [13]. Nestas condições, a velocidade de redução das pelotas autoreduzoras é muito elevada, tornando-a totalmente metalizada em cerca de 30 minutos a cerca de 900° C.

O gás gerado na combustão do combustível sólido atravessa a carga em contracorrente.. Esse processo é viável, pois a alimentação lateral garante que na região da cuba ocorra a eliminação das matérias voláteis e posteriormente a reação de gaseificação (Boudouard) (figura 7). A granulometria do carvão deve ser cuidadosamente controlada para atender as diferentes exigências físico-químicas do processo, entre 40 e 80 mm o combustível sólido. Já os finos de carvão usados nos aglomerados autoredutores devem ter granulometria inferior a 1mm [12]. O ambiente interno dos aglomerados é altamente redutor, o que favorece a cinética das reações, resultando nas elevadas taxas de redução e, conseqüentemente, em tempos de residência até 20 vezes menores que os dos processos convencionais. A figura 8 ilustra o mecanismo da autoredução do minério de ferro.

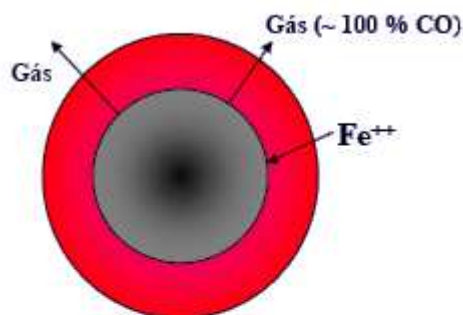
A produtividade do forno é afetada pelo alto teor de ganga (da fonte metálica e das cinzas do carvão). No entanto, a produtividade do processo TECNORED® é tão mais elevada (15t/m<sup>3</sup>/dia a 18/m<sup>3</sup>/dia) que a do alto-forno, que compensa esse aumento no teor de ganga. Além disso, o processo TECNORED® permite a utilização de matérias-primas ricas em zinco, geralmente provenientes de lamas de alto-forno e pós de aciaria elétrica. Outra grande vantagem do processo TECNORED® é possível

utilização de minérios com alto teor de alumina, o que não é possível nos altos-fornos convencionais devido a elevada temperatura de formação das escórias e de sua elevada viscosidade. No processo TECNORED®, a zona de gotejamento é curta, da ordem de centímetros, o que reduz a distância de percolação da escória até se acumular no cadinho [11]. O gusa é vazado no carro-panela e em seguida é retirada a escória.

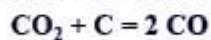


**Figura 7** – Destilação do carvão “charificação” no reator TECNORED® [12]

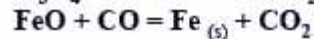
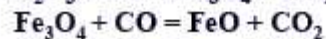
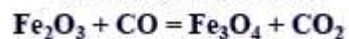
ACIMA DE  $\sim 800^{\circ}\text{C}$  ( $T_{\text{reatividade}}$ )



• Partículas de Carvão



• Partículas de Óxido



**Figura 8** – Mecanismo da auto-redução do minério de ferro [11].

Ao longo do desenvolvimento do processo TECNORED® foi constatado que, devido às suas características peculiares, o processo poderia ser explorado também para a redução de ferro esponja parcialmente reduzido e fusão de pré-reduzidos (DRI), assim como fusão de sucatas de baixa qualidade e cavacos de usinagem. Todos os finos gerados durante o processo podem ser integralmente reciclados. Os gases gerados no forno são lavados, secados e queimados para gerar energia térmica para o pré-aquecedor de ar de sopro primário do forno de redução, podendo ainda ser utilizado na co-geração de energia elétrica ou como combustível em outros equipamentos como fornos de reaquecimento, etc.

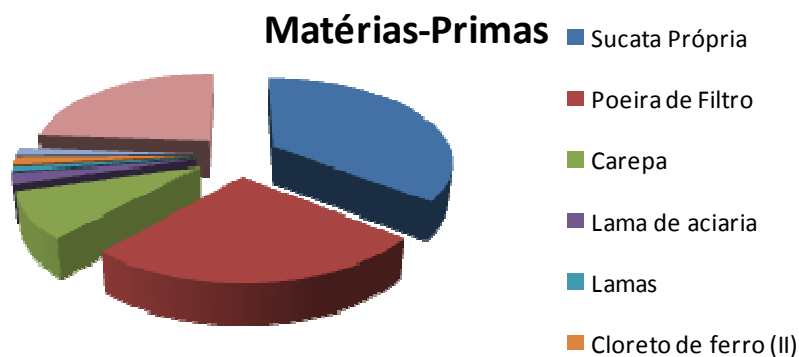


### 4.3 Processo OXYCUP®

O processo OXYCUP® começou a ser desenvolvido em 1999 pela ThyssenKrupp Steel AG. O grupo desenvolveu uma das mais avançadas plantas de reciclagem de resíduos minero-metalúrgicos do mundo.

O reator OXYCUP® é um forno de cuba que processa materiais como poeira, sucata e escória, produzindo um metal líquido de alta qualidade que é alimentado diretamente na cadeia produtiva. A reciclagem do processo tem taxa próxima de 99%, reduzindo os gastos da empresa com minérios importados [28]. O processo é muito eficiente visto que possui 0% de perdas.

A primeira etapa do processo é a preparação da mistura a ser utilizada no processo. A figura 9 mostra a proporção e as diferentes matérias primas utilizadas. Após a mistura, o material passa por um processo de compactação, formando briquete hexagonais de grandes dimensões e de cor acinzentada, como pode ser visto na figura 10.



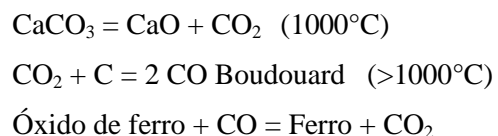
**Figura 9** – Distribuição de matérias-primas alimentadas no reator OXYCUP® [1]



**Figura 10** – C-Brick (Briquete auto-redutor alimentado no reator OXYCUP®) [1].

Esse briquete aglomerado a frio denominado C-Brick é produzido a partir da mistura das matérias-primas metálicas com agente carbonoso e cimento. Eles são curados à temperatura de 50° C durante 2-3 dias [18]. Muitos ensaios foram realizados para se obter o tamanho ótimo do C-Brick, levando-se em consideração a estabilidade do aglomerado e a quantidade de oxigênio necessário para reagir com ele [28]. Para evitar problemas relacionados à geração de finos e conferir boa permeabilidade no interior do reator com uma distribuição adequada dos gases do processo, definiu-se que os briquetes seriam maiores do que as convencionais pelotas ou briquetes.

O mecanismo de auto-redução dentro dos briquetes se dá primeiramente pela calcinação do carbonato, gerando CO<sub>2</sub> que reage com o carbono através da reação de Boudouard, formando o agente redutor CO que reduzirá os óxidos de ferro.



Os briquetes são alimentados no topo do forno junto com o coque e os carbonatos utilizados como fundentes. O coque com granulometria de 90 à 150mm, reage com ar aquecido à 600°C, injetado através de ventaneiras localizadas no cadinho do forno. Ao serem processados à temperaturas superiores a 1000°C [18], formam um ferro esponja que em seguida é fundido dando origem ao ferro gusa. Todo o zinco e grande parte dos alkalis saem do forno na forma de poeira e são concentrados em um filtro no sistema de despoeiramento.

Para suprir as exigências energéticas do processo, são utilizados ar enriquecido com oxigênio (20 à 30%) e injeção direta de oxigênio através de lanças, pois as reações endotérmicas de calcinação/redução consomem grande parte da energia gerada pela combustão do coque. Os gases oriundos da combustão do coque ‘cama de coque’ fornecem a energia necessária para a redução dos óxidos de ferro e a fusão da carga metálica. A carburação do metal líquido depende das dimensões do forno. O produto final do processo é um ferro gusa líquido que é vazado em carros-torpedo ou panelões.

O forno OXYCUP® (figura 11) se divide em três zonas principais:

- Zona superior onde ocorre a alimentação da carga;
- Zona intermediária onde ocorre o pré-aquecimento, redução e fusão dos aglomerados auto-redutores e a formação da escória;
- Parte inferior onde ocorre a separação do ferro gusa líquido da escória formada.

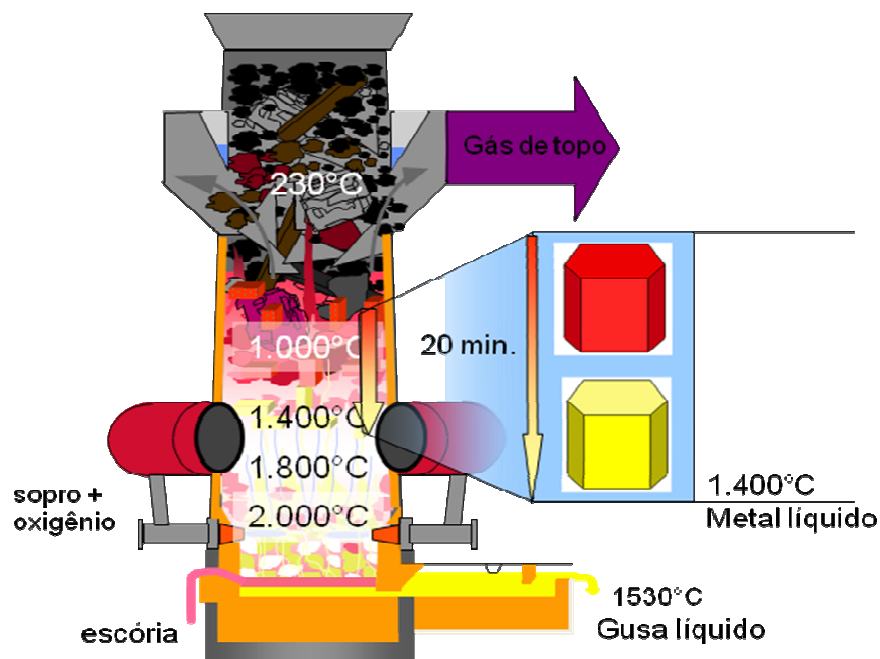
A empresa TKS (Thyssen-Krupp-Stahl) possui uma planta piloto na cidade de Duisburg, na Alemanha. Esta planta possui um forno OXYCUP® de 2.6m de diâmetro, com capacidade aproximadamente de 150.000 ton/ano de C-bricks misturados com 60.000 ton/ano de rejeitos de ferro e aço. Em 2006 também foram instaladas plantas

pilotos no Japão (60t/h) e no México (80t/h). O processo, segundo os seus promotores, se mostra extremamente eficiente para a utilização de resíduos siderúrgicos não recicláveis nos processos convencionais (fornos elétricos ou altos-fornos), como os resíduos ricos em zinco, produzindo metal líquido e recuperando o zinco no sistema de limpeza dos gases em concentrações vendáveis às empresas produtoras do metal.

As principais vantagens do processo:

- O processo não demanda grandes alterações, em usinas já existentes, para a sua implantação;
- Baixos custos de investimento;
- Processo similar aos altos-fornos;
- Uso de resíduos siderúrgicos como matéria-prima;
- Flexibilidade de produção.

Foram investidos no projeto OXYCUP® cerca de 25 milhões de euros. O gás gerado no processo OXYCUP® é recirculado na própria usina, enquanto a escória é utilizada na pavimentação de estradas.



**Figura 11** – Reator do processo OXYCUP® [18].

#### 4.4 Processo FINEX®

O processo FINEX® de redução de minério de ferro foi desenvolvido pela Posco e a Simens VAI para produzir ferro gusa. Similarmente ao processo HISMELT® (a ser visto adiante), as matérias primas utilizadas são finos de minério e de carvão não coqueificável. Os finos de minério são carregados em um reator de leito fluidizado junto com fundentes específicos como cal e dolomita. Os óxidos de ferro presentes no minério são reduzidos produzindo ferro esponja. Ao final da redução o ferro esponja é briquetado a quente (HBI) e transferido diretamente por gravidade para o silo de alimentação do reator de fusão. É durante a etapa de fusão dos briquetes que se adiciona carvão não coqueificável e a injeção simultânea no reator de carvão pulverizado e oxigênio. O gás redutor gerado a partir da reação de gaseificação do carvão ( $\text{CO} + \text{H}_2$ ) percola em contracorrente o leito fluidizado durante a etapa de reação sólido-gás.

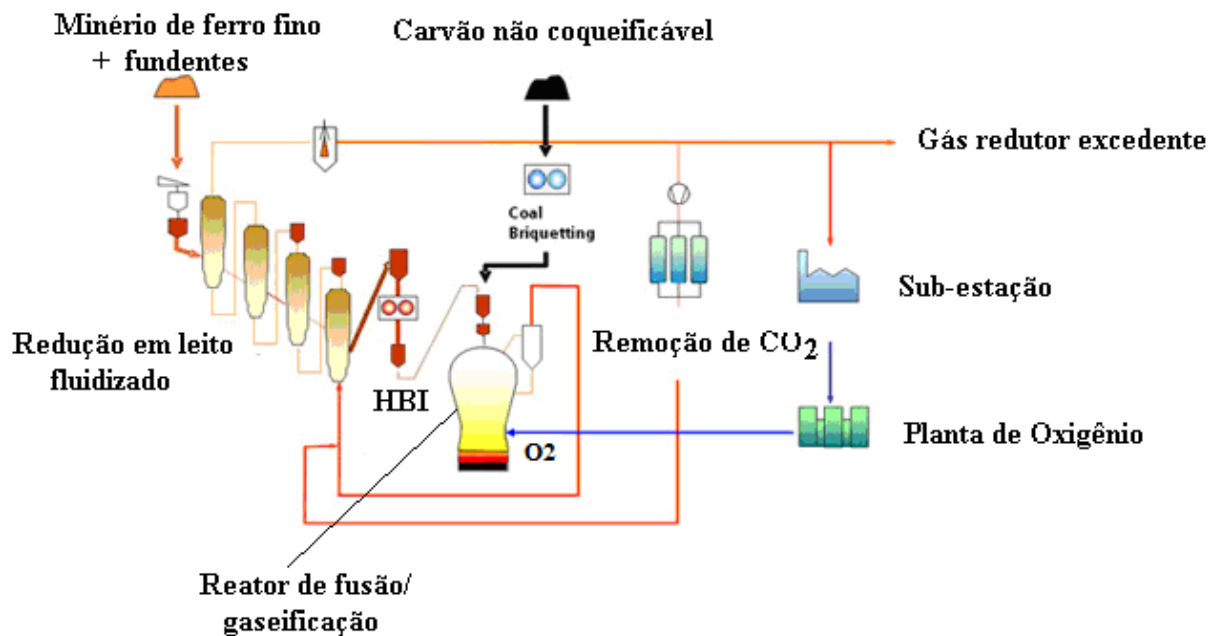
O calor gerado na combustão/gaseificação do carvão pelo oxigênio fornece a energia necessária para fundir o HBI. Os produtos finais da fusão são o ferro gusa e a escória líquida que são vazados exatamente no padrão do alto-forno e transferidos para um posterior processamento. O gusa produzido apresenta características e qualidade muito próximas ao gusa produzido pelo alto-forno ou pelo processo COREX®. O excesso de gás gerado no processo pode ser comercializado como sub-produto, podendo ser utilizado em aquecimento e geração de energia.

O custo de investimento e o custo operacional do processo FINEX® são muito menores que os do alto-forno, que assim como em outros processos alternativos, não utiliza plantas de aglomeração de minérios e nem coqueria. Uma planta de 1,5 milhões de toneladas por ano pode produzir gusa de forma muito mais eficiente que um alto-forno de 3 milhões de toneladas por ano. Em relação à planta de oxigênio e a planta de geração de energia, a redução dos custos em relação ao alto-forno é de cerca de 20% e 15%, respectivamente.

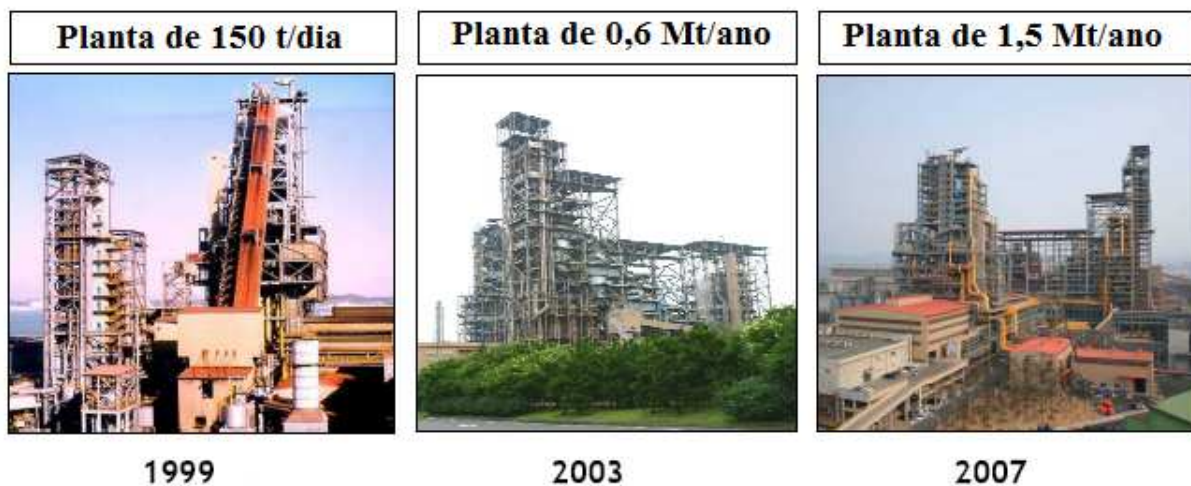
Um dos grandes atrativos do processo FINEX® é a redução dos impactos ambientais através da diminuição de emissões de SOx, NOx e poeiras. O enxofre contido no carvão é escorificado na forma de CaS através da reação com a cal presente no leito. A emissão de SOx é quase nula e as emissões de NOx dificilmente ocorrem, pois as reações ocorrem em meio redutor, diferentemente da atmosfera oxidante da sinterização e regeneradores de calor. No processo FINEX® também não há geração de dioxinas e furanos. Esse resultado se dá principalmente pela ausência de sinterização e coqueria, que são as maiores fontes de poluição.

Em 2003 foi construída a primeira planta piloto do processo FINEX® com capacidade de 600.000 toneladas por ano na planta Pohang Steel Works em Pohang, Coreia do Sul. Em maio de 2007 foi inaugurada a planta comercial FINEX® também na planta de Pohang com capacidade de 1,5 milhões de toneladas de gusa por ano. O

investimento foi de US\$ 1,14 bilhões. A figura 12 ilustra o fluxograma do processo e a figura 13 a evolução das plantas FINEX® (1999-2007).



**Figura 12** – Fluxograma do processo FINEX® [21].



**Figura 13** – Evolução da planta do processo FINEX® [21].

#### 4.5 Processo DIOS®

Em 1988, a Japan Iron e a Steel Federation iniciaram o desenvolvimento e pesquisa no programa chamado DIOS®, Direct Iron-Ore Smelting. Estavam envolvidos no projeto oito produtoras japonesas de aço (incluindo NSC, NKK e Kawasaki) [22] e um centro de pesquisa em mineração de carvão com o apoio do ministério internacional das indústrias. O projeto visava ao desenvolvimento de uma planta piloto com produção de 500 t/dia de metal através de um conversor onde o minério seria fundido com oxigênio e carvão no interior de um banho metálico. O objetivo do projeto era desenvolver um processo com maior eficiência energética utilizando carvão ao invés de coque e energia elétrica. A planta piloto DIOS® foi projetada para entrar em operação em julho de 1993. Só que isto não ocorreu.

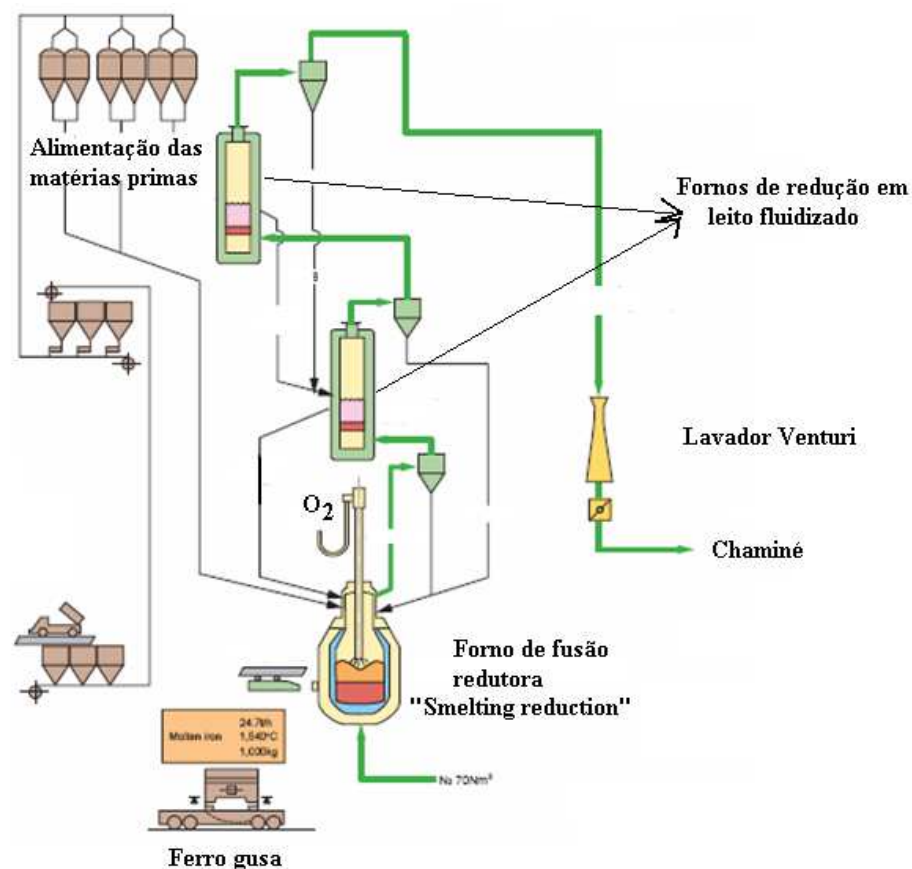
As principais características do processo DIOS® são: utilização de leito fluidizado para redução de finos de minério, fusão redutora em banho metálico e reforma do gás de topo pela adição de finos de carvão. O conversor é considerado um reator mais eficiente que os fornos de cuba, pois sua taxa de reação é muito alta devido a altas temperaturas e intensa agitação. Nele o carbono é repostado com adição contínua de carvão, e a combustão exotérmica do carbono é balanceada pelas reações endotérmicas da redução.

O processo DIOS® utiliza uma única lança de topo para injeção de oxigênio. Possui um sistema de reatores de leito fluidizado, que utilizam os gases de topo do reator de fusão para o aquecimento e pré-redução dos finos de minério de ferro. No reator de fusão a redução se completa em presença de fases líquidas (metal e escória) [16]. Uma pequena quantidade de finos de carvão é injetada no gás de topo para resfriá-lo e enriquecê-lo com CO e H<sub>2</sub> para ser consumido na etapa de pré-redução. O carvão é carregado no forno por gravidade e o oxigênio é injetado no forno para combustão do carvão primário e posterior consumo do mesmo [7].



Vantagens do processo DIOS®:

- Uso direto de finos de minério;
- Baixo custo de investimento;
- Não utiliza coqueria e sinterização;
- Produção econômica em plantas de menor escala;
- Redução de impacto ambiental;
- Processo de fusão direta;
- Uso de carvão não coqueificável como agente redutor e combustível;
- Baixo consumo de energia.



**Figura 14** – Fluxograma do processo DIOS® [3].

#### **4.6      Processo HISMELT®**

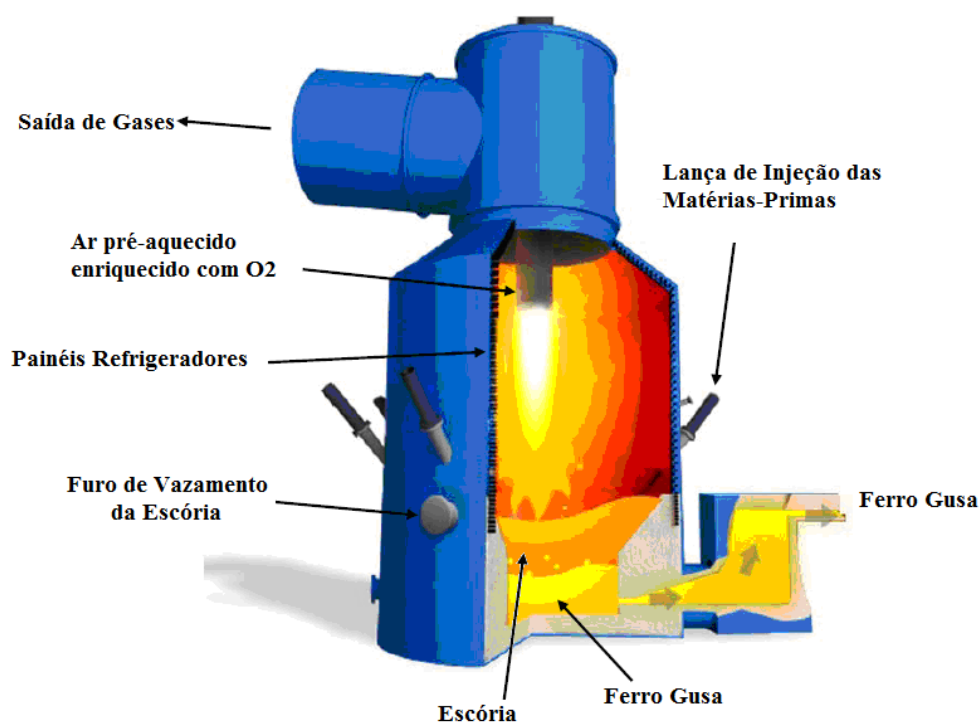
O processo HISMELT® é uma tecnologia desenvolvida pela HISMELT® Co., subsidiária da Rio Tinto Group, líder em extração, desenvolvimento e processamento de recursos minerais no mundo. A tecnologia foi desenvolvida para processar finos de minério de ferro, com mínima preparação das matérias-primas e utilização de carvão não coqueificável.

Em 2003 foi construída a primeira planta piloto HISMELT® em Kwinana – Austrália, através da formação de uma “joint venture” entre as empresas Rio Tinto (60%), Nucor Corporation (25%), Mitsubishi Corporation (10%), e Shougang Co. (5%) [8]. A planta tem capacidade para produzir de 800.000 t/ano de ferro gusa líquido. Entrou em operação em novembro de 2005 visando uma produção de 105 t/hora e consumo de carvão de 700 kg/tonelada de gusa líquido. Em 2007 a planta teve uma produção de 80 t/hora e consumiu 810 kg/tonelada de carvão [8].

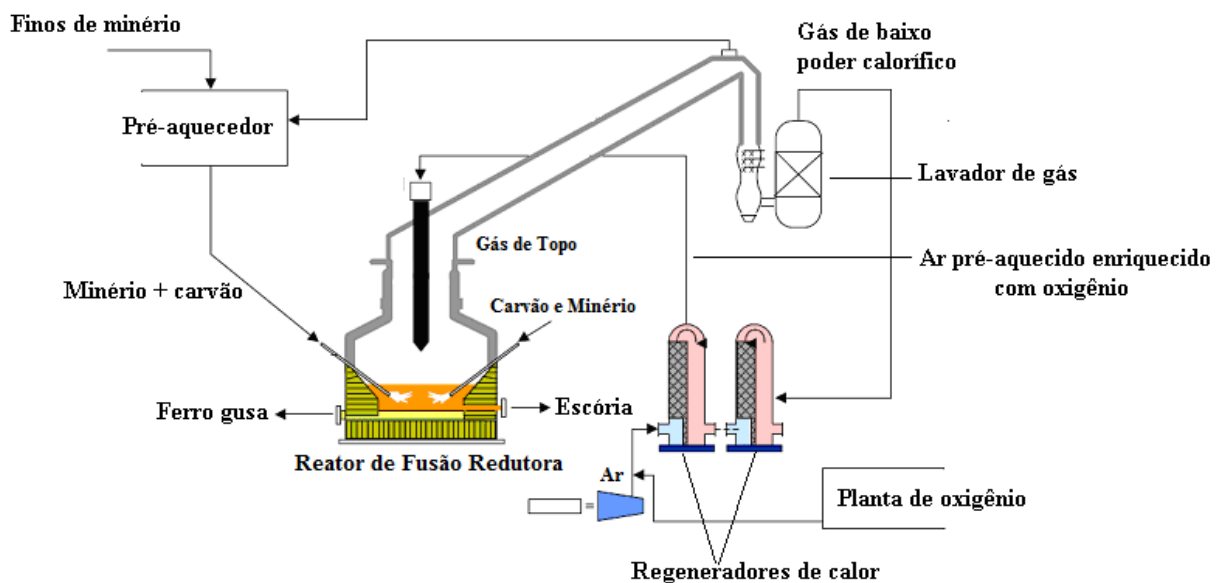
A HISMELT® Co. continua desenvolvendo a tecnologia para atingir uma melhor flexibilidade, menor custo e menor impacto ambiental. Atualmente existem duas licenças sendo assinadas na China: Laiwu Steel Group Ltd e Nanjing Iron e Steel Group Jiangsu Huaigang Co. Essas licenças permitem ao grupo desenvolver instalações de redução de minério usando a tecnologia HISMELT®. Os grupos podem replicar plantas HISMELT® de 800.000 toneladas/ano.

Diferentemente dos demais processos de fusão em banho metálico, a redução dos óxidos e a gaseificação do carvão ocorrem no próprio banho. O processo utiliza ar pré-aquecido (1200°C) enriquecido com 35% de oxigênio e utiliza como carga metálica finos de minério e de carvão [16]. Os finos são injetados no banho metálico por lanças submersas e não pelo topo do reator. Por operar com escória básica e rica em FeO, o processo é capaz de remover grande parte do fósforo dissolvido no metal.

A mistura de finos de carvão, minério e fundentes é injetada num banho de metal fundido à temperatura próxima a 1450°C, sendo o nitrogênio utilizado como gás de arraste. Ao longo do vaso existem 2 lanças injetoras resfriadas com água, que injetam os finos de minério, carvão e fundentes. A dissolução e a fusão do material injetado são rápidas. Os finos de minério são reduzidos rapidamente ao entrarem em contato com o carbono dissolvido no banho. O resultado é a formação de um gusa e uma escória. A energia liberada na combustão é retornada ao banho através da interface escória-metal [7]. O produto primário é o gusa líquido que é vazado continuamente, sendo separado posteriormente da escória. A figura 15 ilustra o reator HISMELT® e a figura 16 o fluxograma geral do processo.

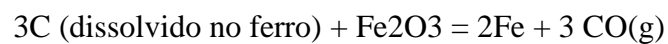


**Figura 15** – Detalhe do reator HISMELT® [8].



**Figura 16** – Fluxograma geral do processo HISMELT® [2].

Duas importantes reações químicas ocorrem nesse processo:



O ferro gusa produzido pode passar por processo de dessulfuração, caso seja necessário remover o enxofre. Outro fator que influencia a qualidade do ferro gusa é a escorificação do fósforo, garantindo baixo teor de fósforo no metal. São gerados aproximadamente 250-300 kg de escória/t ferro gusa. O processo HISMELT® permite a fabricação de gesso ( $CaSO_4$ ) como subproduto, caso o sistema de dessulfuração de gás esteja incorporado à planta.

O gás de topo do processo possui um relativamente baixo poder calorífico; no entanto, sendo enriquecido com gás natural, seria equivalente ao gás de topo do alto

forno. Esse gás após a etapa de despoeiramento, é utilizado como combustível no sistema de pré-aquecimento do minério, do combustível e do ar.

O HISMELT® é um processo interessante para as usinas siderúrgicas integradas devido a características como:

- Utiliza finos de minério;
- Não necessita processos de aglomeração;
- Utiliza carvões não coqueificáveis;
- Tem flexibilidade de matérias-primas e de produção;
- Produz gusa líquido com baixos teores de fósforo e de enxofre;
- Baixo custo operacional e de investimento;
- Ferro gusa de alta qualidade.

Quando aplicado em usinas semi-integradas como aciaria elétrica/mini-mills, o HISMELT® possui as seguintes vantagens:

- Menor dependência da variação do preço da sucata no mercado;
- Pode ser facilmente incorporado a uma aciaria elétrica tanto como gusa líquido quanto sólido.

O custo de instalação do HISMELT® é baixo, pois não necessita de construção de planta de sinterização e coqueria. Além disso, o HISMELT® utiliza os itens de uma

unidade de redução convencional como regeneradores de calor, sistema de injeção e planta elétrica. A flexibilidade operacional do processo é resultado da elevada cinética das reações. Essa característica permite uma alta produtividade sem necessidade de matérias-primas de alta qualidade. Diferentemente do alto-forno, o reator HISMELT® pode ser ligado e religado facilmente.

Os impactos ambientais gerados pelo processo HISMELT® são baixos, principalmente pela ausência das plantas de sinterização e coqueria. As emissões de CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub> e NO<sub>x</sub> são menores do que as indústrias convencionais menos poluidoras. A geração de furanos, dioxinas, alcatrão e fenóis é evitada.

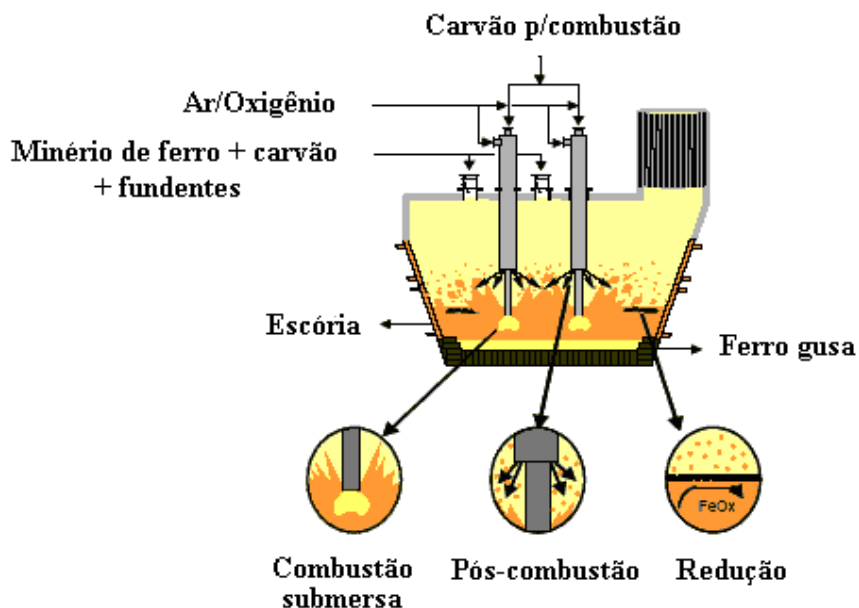
A tecnologia do processo australiano CRA-MIDREX® HISMELT® pode ser considerado a mais avançada das tecnologias de banho metálico para fusão redutora. A natureza de não-equilíbrio dos processos químicos e térmicos que ocorrem no interior do reator o diferencia do processo COREX®. Ele apresenta algumas vantagens operacionais em relação a outros processos devido à utilização de finos de carbono já dissolvidos no banho, o que acelera o processo de redução quando os óxidos entram em contato com o banho. Outra vantagem é a eficiência de transferência de calor devido à agitação causada pela injeção de finos no banho. A atmosfera relativamente oxidante e a baixa temperatura da escória no reator HISMELT® resultam em uma escorificação de 90-95% do fósforo presente na carga metálica. No alto-forno 100% do fósforo é transferido para o metal. Dessa forma o HISMELT® permite a utilização de minérios com alto teor de fósforo reduzindo custos e evitando a emissão desse poluente na atmosfera [5].

#### **4.7      Processo AUSIRON®**

O processo AUSIRON® é uma tecnologia de fusão em banho metálico de alta intensidade com aplicação em materiais ferrosos e não ferrosos. Baseado na tecnologia AUSMELT® foi desenvolvido utilizando a tecnologia de lanças submersas [4]. Sua planta piloto se localiza em Whyalla no sul da Austrália com capacidade de 15.000 toneladas de gusa por ano.

Os materiais ferrosos são diretamente processados em um reator de fusão, equipado com lanças múltiplas para a produção de metal líquido. Cada lança queima carvão com ar enriquecido com oxigênio e injeta essa mistura no interior do banho metálico. A combustão na ponta da lança deve ser controlada para evitar a oxidação do banho e otimizar ao máximo o fornecimento de energia.

O carvão, a carga metálica e fundentes são alimentados pelo topo do reator por gravidade. O material metálico se dissolve rapidamente no banho e o carvão reage com os óxidos de ferro contidos no banho [4]. Essas reações têm altas taxas devido à agitação causada pela turbulência gerada pela geração de gases durante a combustão submersa. A figura 17 mostra o reator de redução/fusão.



**Figura 17** – Reator do processo AUSIRON® [4].

Durante o processo ocorre uma pós-combustão dos materiais carbonosos na região acima da escória onde há injeção de ar enriquecido com oxigênio. Nesta região matérias voláteis oriundas do carvão, e monóxido de carbono são queimados produzindo calor.

O metal líquido e a escória são vazados separadamente pelo cadinho do forno. A geração de escória espumante reduz as perdas de calor pelas paredes e, em consequência, protege o sistema de resfriamento. O cadinho é revestido com material refratário na região do metal líquido e as paredes e o topo do reator são resfriados com camisa d'água “stave coolers” para resistir ao desgaste durante a operação e pela turbulência da escória.

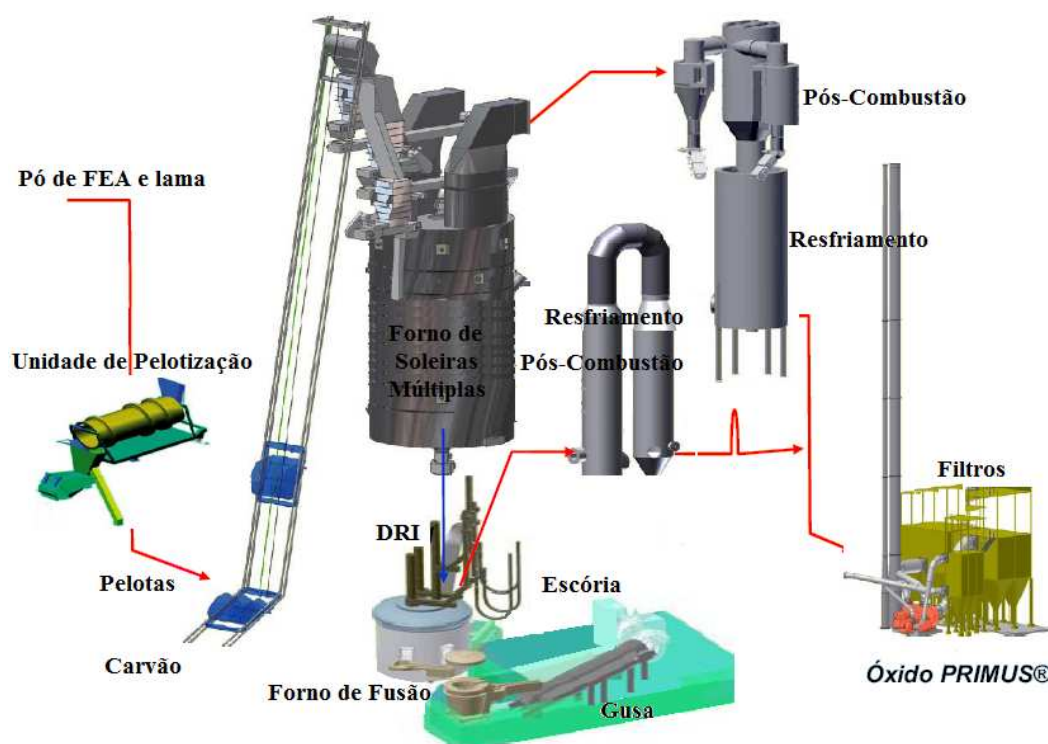


O AUSIRON® apresenta vantagens significativas em relação ao alto-forno, como por exemplo, a possibilidade de interromper a operação rapidamente e poder trabalhar sem carga por longos períodos a partir apenas da combustão submersa dos combustíveis. Durante essa interrupção, o forno pode ser drenado para retirada do metal e escória e a combustão na lança é usada para manter a temperatura do forno. A operação pode ser re-estabelecida rapidamente a partir do carregamento de escória sólida, que é fundida usando as lanças. A partir do momento em que o banho é formado, a lança já pode ser submergida e a fusão pode recomeçar.

#### **4.8 Processo PRIMUS®**

O Processo PRIMUS® é uma tecnologia desenvolvida pela Paul Wurth com o objetivo de reciclar subprodutos sidero-metalúrgicos e finos de minério, obtendo-se um pré-reduzido (DRI) com alto grau de metalização seguido da fusão desse produto. Esse processo utiliza como matéria-prima lamas de alto forno e aciaria, pó de alto forno e aciaria, carepa e pó de forno elétrico. Outros materiais, com algum teor de ferro contido, também podem ser considerados. Como redutor, o processo utiliza finos de carvão.

O processo PRIMUS®, assim como os processos alternativos avaliados ao longo desse estudo, não necessita de tratamento prévio das matérias primas como secagem, remoção de óleos, pelotização, sinterização, coqueificação nem separação e/ou recuperação de elementos tais como zinco e chumbo. O processo se baseia na combinação de um forno com múltiplas soleiras (forno de andares) e um forno elétrico a arco especialmente projetado para esse processo. Possui um projeto especial para tratamento do gás de topo, permitindo a redução da utilização de gás externo e recuperando eficientemente óxidos de metais não ferrosos (por exemplo, ZnO). A figura 18 ilustra um diagrama esquemático do processo PRIMUS®.



**Figura 18** – Diagrama esquemático do processo PRIMUS® [26].

No forno de soleiras múltiplas ocorre a secagem, aquecimento e pré-redução da carga metálica utilizando carvão como agente redutor e combustível do processo [26]. O produto final é um ferro esponja que será transferido para o forno elétrico a arco. Nas soleiras múltiplas também ocorre a eliminação do óleo, calcinação (carbonatos + hidróxidos) e a preparação do carbono reativo para a redução e carbonetação do metal no forno elétrico. No forno elétrico a arco ocorre a redução final dos óxidos, a remoção do zinco, fusão da carga, carburação e dessulfuração do metal [26].

A primeira planta industrial do processo PRIMUS® foi implantada em 1999 pela Primorec S.A. - ArcelorMittal Woier em parceria com a ProfilARBED Esch-Belval em Differdange, Luxemburgo. A planta entrou em operação em 2003, com capacidade de tratar 60.000 t/ano de finos e 15.000 t/ano de carepas de laminação [26].

O processo PRIMUS® possui alta eficiência devido às seguintes características [26]:

- Percolação do gás em contra-corrente;
- A pós-combustão do gás bruto é realizada nas soleiras numa câmara de pós-combustão;
- O CO contido no gás gerado no forno elétrico é tratado e reutilizado no processo, minimizando o consumo de gás;
- Recuperação de quase 100% do zinco, chumbo e outros metais não ferrosos da lama, pó e resíduos de não ferrosos;
- Alimentação direta de ferro esponja no forno de fusão PRIMUS®.

O processo PRIMUS® também apresenta baixo custo operacional pois [26]:

- Os finos de carvão não coqueificáveis são usados como redutor e fonte de energia para o sistema de soleiras;
- Não necessita de consumo de gás natural para processamento dos resíduos, somente uma pequena quantidade de gás natural é necessária para o início de marcha do sistema de soleiras;
- Baixo custo na preparação da matéria prima, pois, os finos e carepas após homogeneização são pelletizados a frio e o carvão não necessita moagem, peneiramento e nem etapa de secagem.

No início deste ano, foi feito o primeiro vazamento de ferro gusa da planta PRIMUS® construída na usina Dragon Steel Taiwan. A planta tem capacidade de tratar 100% de poeiras de forno elétrico a arco ou misturas de 60% de poeiras de forno elétrico e 40% de poeiras de conversor LD. A confiabilidade e segurança do processo PRIMUS® é baseada no uso de tecnologias já comprovadas como o forno de soleiras múltiplas, forno elétrico a arco, pelletização e tratamento de gás bruto. O Forno de

Múltiplas Soleiras opera a pressão atmosférica e o processo de pré-redução é feito em baixas temperaturas (max. 1000°C) [26].

#### **4.9 Processo ROMELT®**

O processo ROMELT® é um processo desenvolvido pelo Instituto de aço e ligas de Moscou (Moscow State Institute of Steel and Alloys) [31]. O processo é baseado em fusão redutora através da utilização de carvões não-coqueificáveis como combustível e agente redutor.

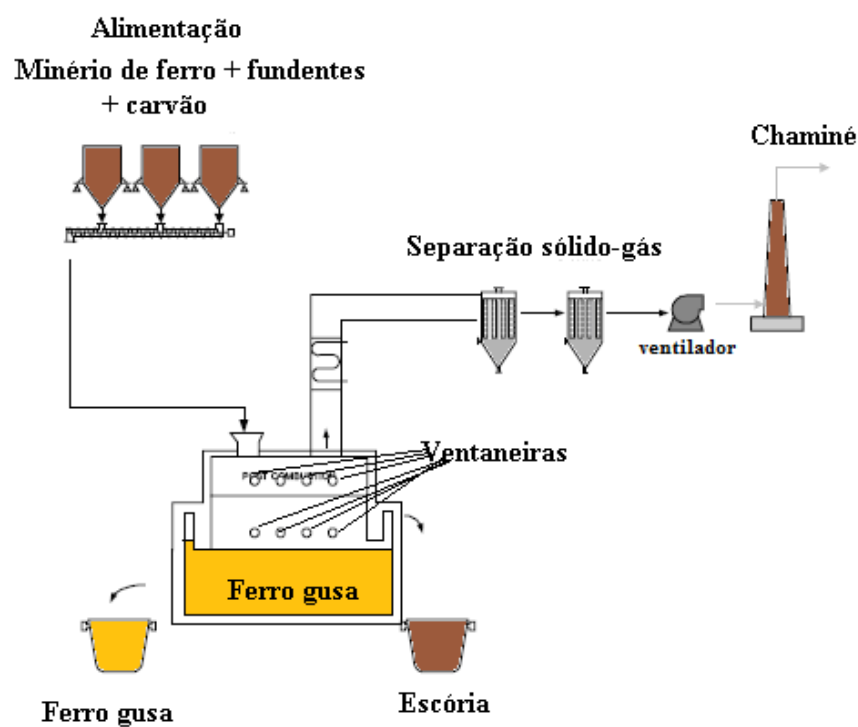
Os óxidos de ferro são carregados no forno ROMELT® e podem ser originários de qualquer material que contenha ferro, como finos de minério de ferro, poeira de alto-forno e de BOF, lamas siderúrgicas, carepa, escória de operações de redução de metais não ferrosos. Já o carvão utilizado deve conter cerca de 15-20% de materiais voláteis e no máximo 8% de cinzas. As matérias-primas (carvão, óxido de ferro e fundentes) são carregadas no forno por gravidade [7].

O ROMELT® possui um sistema de ventaneiras inferiores e superiores em cada lado do forno por onde é injetado oxigênio. As ventaneiras inferiores injetam oxigênio para agitar o banho e gaseificar o carvão. Já as ventaneiras superiores injetam oxigênio para queimar o carvão na pós-combustão [7].

O forno ROMELT® se divide em 4 regiões: Zona metálica, zona de escória, zona de agitação da escória e zona de combustão do gás. A redução da carga metálica se dá na zona de agitação da escória. Interação entre o metal e a escória ocorre tanto na zona agitada quanto na zona quiescente, pois nessas regiões ocorre a separação dos elementos menores entre as duas fases. A geração dos gases no banho ocorre preferencialmente na zona de combustão do gás (pós combustão), na qual ele reage com o oxigênio injetado

pelas ventaneiras superiores liberando energia. Esse gás contém predominantemente CO e H<sub>2</sub> e um pouco de N<sub>2</sub>. O metal líquido e a escória são vazados periodicamente através de furos de corrida [7].

A primeira planta do processo ROMELT® foi construída em 2005 na Índia em Nagarnar, 16km de Jagdalpur para tratar rejeitos de minas de minério de ferro da região de Bailadila [30]. A planta tem capacidade de 300.000 toneladas de gusa líquido por ano. A figura 19 mostra o fluxograma do processo ROMELT®



**Figura 19** – Fluxograma do processo ROMELT® [7].

#### **4.10 Processo ULCOS®**

ULCOS® (Ultra Low CO<sub>2</sub> Steelmaking) detentora da patente do processo ISARNA, é um consórcio entre 48 empresas europeias de 15 países e entre elas a Rio Tinto. Esse

consórcio visa principalmente pesquisas que reduzam a emissão de CO<sub>2</sub> nas usinas siderúrgicas. Participam desse projeto companhias de energia e engenharia, institutos de pesquisa e universidades [24].

ISARNA (antigo nome celta dado ao ferro) é uma nova tecnologia desenvolvida pela ULCOS® baseada na fusão redutora altamente eficiente de finos de minério de ferro utilizando um ciclone em conjunto com um reator de fusão. Todas as etapas do processo são diretamente acopladas, evitando perdas de energia durante o tratamento intermediário dos materiais e gases [24].

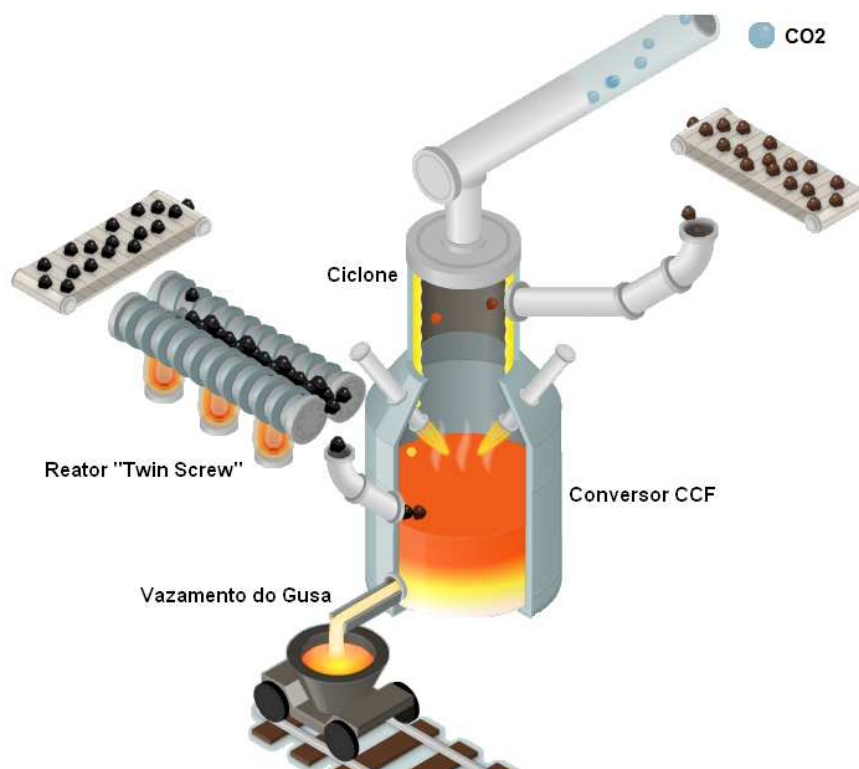
A tecnologia do ciclone foi desenvolvida pela CORUS®, um dos participantes da ULCOS®. Em 1990 uma série de plantas em escala piloto foram desenvolvidas demonstrando o sucesso dessa nova tecnologia.

Há um grande interesse em se combinar a tecnologia ISARNA com a HISMELT®, e operar essa combinação utilizando oxigênio puro. O projeto será renomeado para HISARNA [24].

O processo ISARNA resulta em uma baixa emissão de CO<sub>2</sub> em comparação com outros processos que utilizam carvão, e o uso de oxigênio puro facilita a captura e estocagem do CO<sub>2</sub>. Outras vantagens do processo ISARNA são sua compactibilidade, baixo custo de investimento e a habilidade de utilizar finos de minério diretamente e carvões não coqueificáveis [24]. O processo Isarna é baseado em fusão dos finos de minério de ferro em banho metálico, combinando pré-aquecimento e pirólise do carvão e um reator de fusão para a redução final do minério.

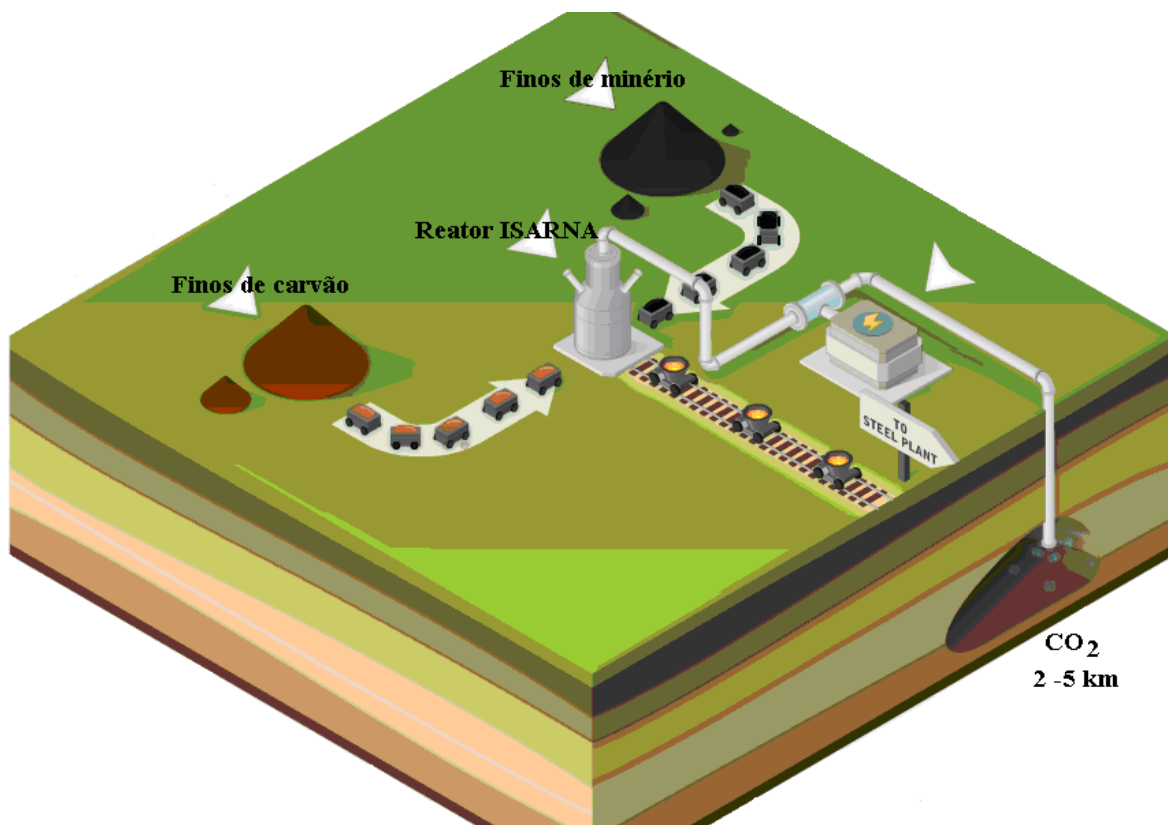
O calor necessário para o processo é fornecido pela combustão do CO na camada de escória. O oxigênio é alimentado tangencialmente no ciclone para queimar os gases e iniciar o movimento ciclone do gás. O minério também é alimentado tangencialmente e

funde assim que entra no forno. O minério fundido fica aderido à parede do ciclone e escoa em direção ao banho metálico para ser reduzido pelo CO [23]. A figura 20 ilustra o fluxograma do processo ISARNA.



**Figura 20** – Fluxograma do processo ISARNA [23].

A primeira planta piloto do processo ISARNA com capacidade para 65.000 toneladas de gusa/ano será construída na Saarstahl em Völklingen, Alemanha [24]. Ela requer flexibilidade e pequena quantidade de carvão, permitindo a substituição do carvão por biomassa, gás natural ou hidrogênio. Essa unidade está prevista para entrar em operação em 2010. O fluxograma da planta pode ser vista na figura 21.



**Figura 21** – Planta do processo ISARNA [23].

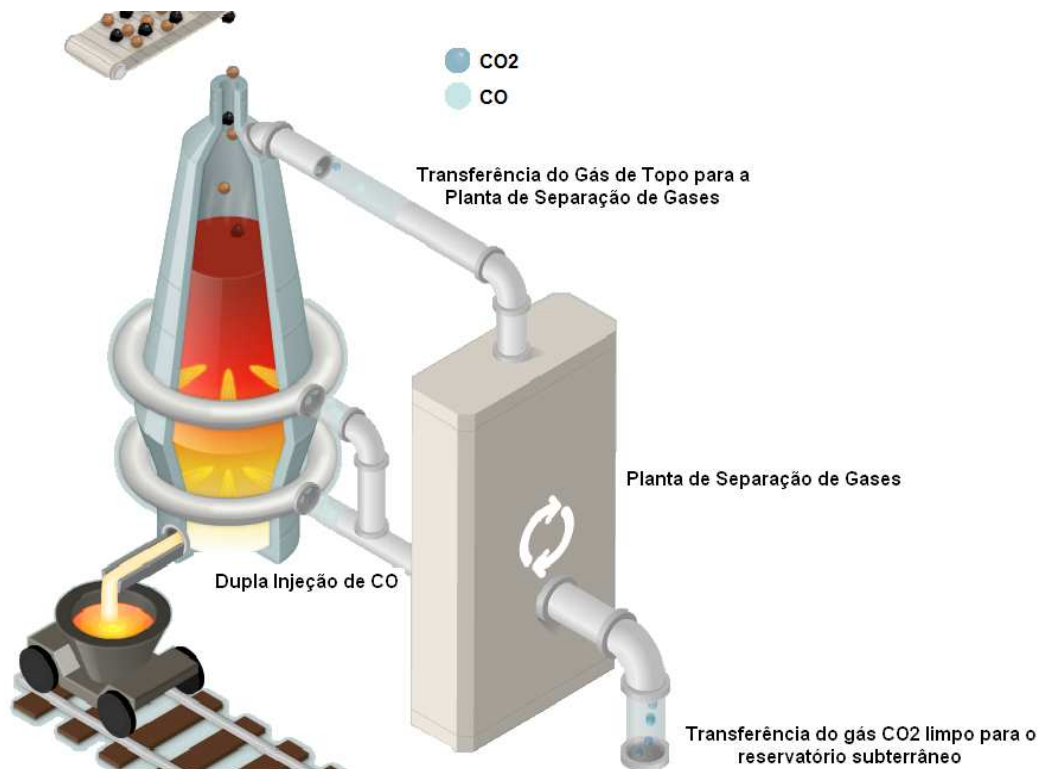
Outro processo desenvolvido pela ULCOS® é o Novo Alto-Forno baseado em Reciclagem do Gás de Topo (TGR-BF). Esse projeto é único no mundo e requer alto investimento. Foi concluído um acordo entre a ArcelorMittal, Corus e a ThyssenKrupp para desenvolver e industrializar a tecnologia TGR-BF, incluindo a construção de uma planta piloto em Eisenhüttenstadt (Alemanha) entre 2010 e 2014, período necessário para validar a tecnologia em um alto-forno de tamanho médio [20].



Uma demonstração em escala industrial será instalada em Florange (França) entre 2011 e 2015, quando será combinado com um experimento de captura de  $\text{CO}_2$  para reservatórios geológicos subterrâneos na região de Loraine. Ambos os projetos pertencem a ArcelorMittal, que tem nesses projetos o objetivo de demonstrar a viabilidade técnica e econômica tanto do TGR-BF quanto do Isarna. O custo aproximado para construir um projeto de implantação do TRG-BF é de 300 a 400 milhões de euros [20].

O TGR-BF se baseia na separação da mistura de gases  $\text{CO}_2$  e  $\text{CO}$  do alto-forno em uma planta de separação de gases e estes podem ser retornados para o forno, sendo usados como agente redutor [25]. Esse processo reduzirá a quantidade de coque necessária para o funcionamento do forno. Simultaneamente, o conceito de injeção de oxigênio puro ( $\text{O}_2$ ) no forno ao invés de ar pré-aquecido evita presença de nitrogênio nos gases, facilitando a captura e estocagem do  $\text{CO}_2$ . A reciclagem do gás de topo substitui a injeção de ar pré-aquecido no forno [25]. A figura 22 ilustra esquematicamente esse processo.

Para testar essa tecnologia de separação de gases foi construída uma planta piloto próximo ao Alto-Forno experimental LKAB na região de Lulea, Suécia. O alto-forno operou com oxigênio puro e re-injeção de gás  $\text{CO}_2$ . Essa combinação foi testada em 2007 e apresentou resultados satisfatórios [25].

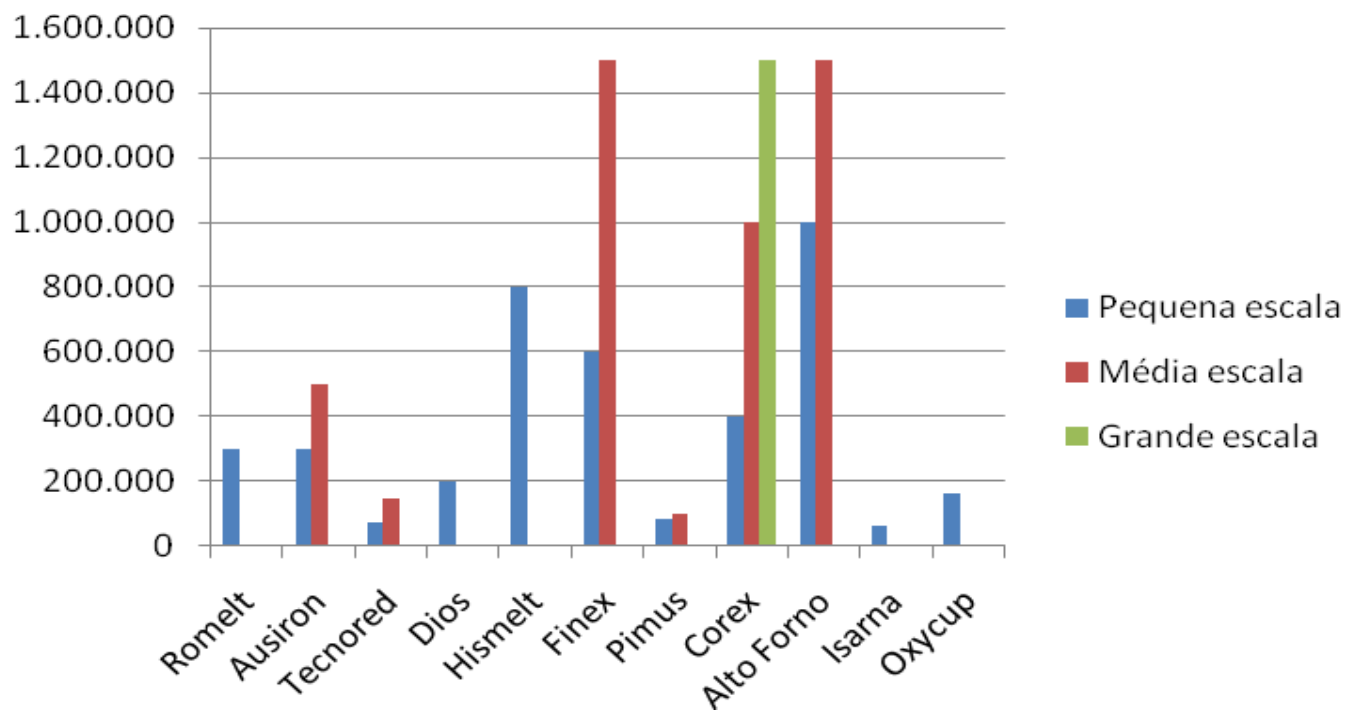


**Figura 22** – Fluxograma do processo TGR-BF [25].

## 5. Análise dos Processos

A capacidade de produção dos diferentes processos alternativos pode ser vista na figura 23. Como se pode observar, apenas os processos COREX®, FINEX® e HISMELT® possuem plantas com capacidade de produção entre 600.000 e 1.000.000 t/ano de ferro gusa. As demais plantas ainda possuem uma capacidade produtiva pequena. Isto não significa que as mesmas não possam vir a se tornar industriais. A escala de tempo, no entanto, fica bastante indefinida dependendo do custo e

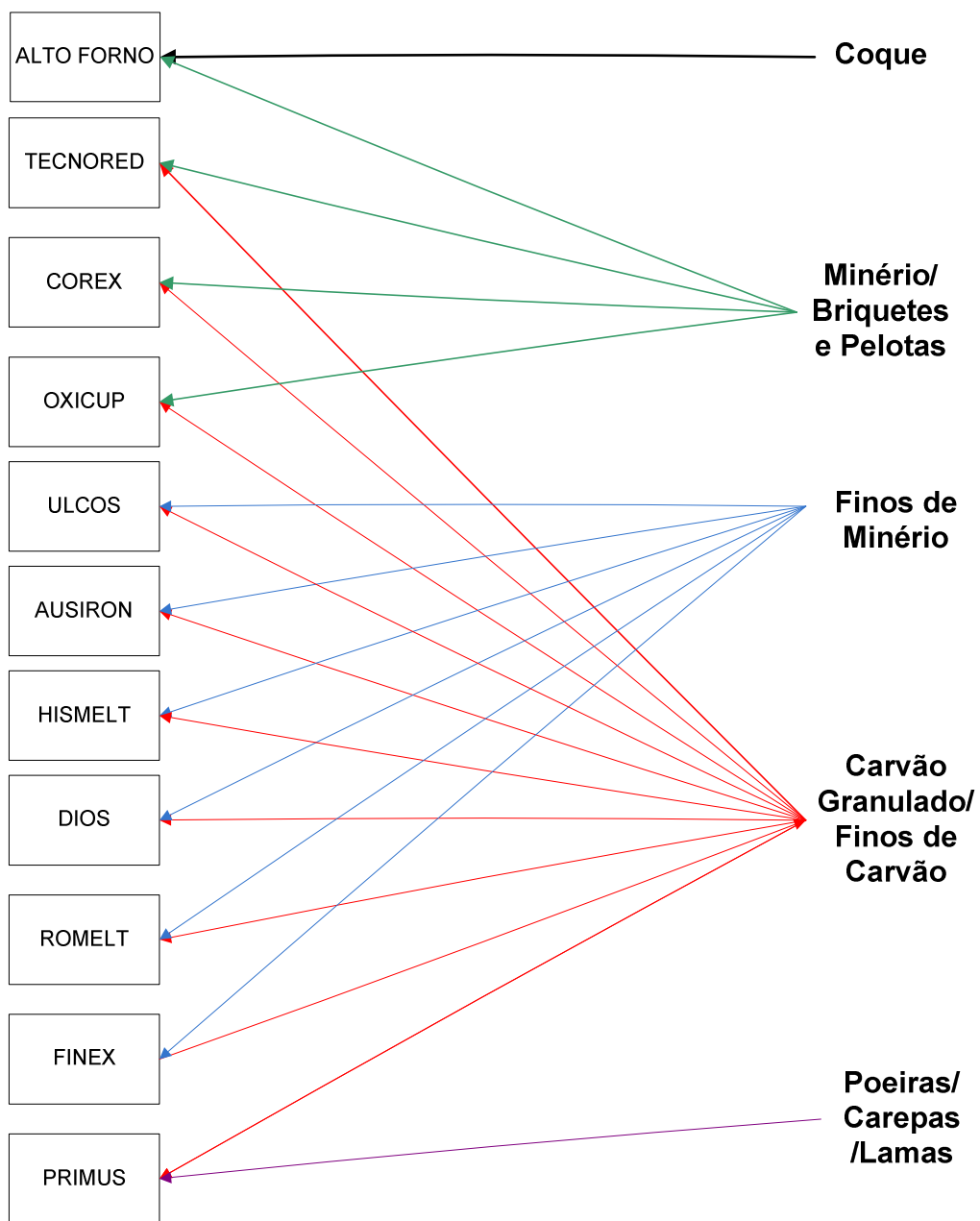
disponibilidade das matérias primas, da ampliação do comércio mundial e das restrições ambientais.



**Figura 23** – Capacidade de produção dos processos.

### 5.1 Quanto à natureza das matérias primas da alimentação

A figura 24 ilustra a natureza da alimentação nos processos alternativos de produção de ferro gusa:



**Figura 24** – Classificação dos processos alternativos à luz das matérias primas (carbonosas e ferrosas) [2].

As novas rotas de produção de gusa utilizam predominantemente carvão como fonte de combustível e agente redutor, o que os colocam em grande vantagem econômica e ambiental em relação ao alto forno. Além disso, a possibilidade da utilização de injeção de finos diretamente no interior do banho metálico é efetivamente uma alternativa altamente atraente.

## 5.2 Quanto ao Tipo de Reator e a Natureza da Redução

Os processos alternativos são classificados como “In bed” e “In bath” de acordo com o tipo de reator utilizado, como pode ser visto na figura 25.

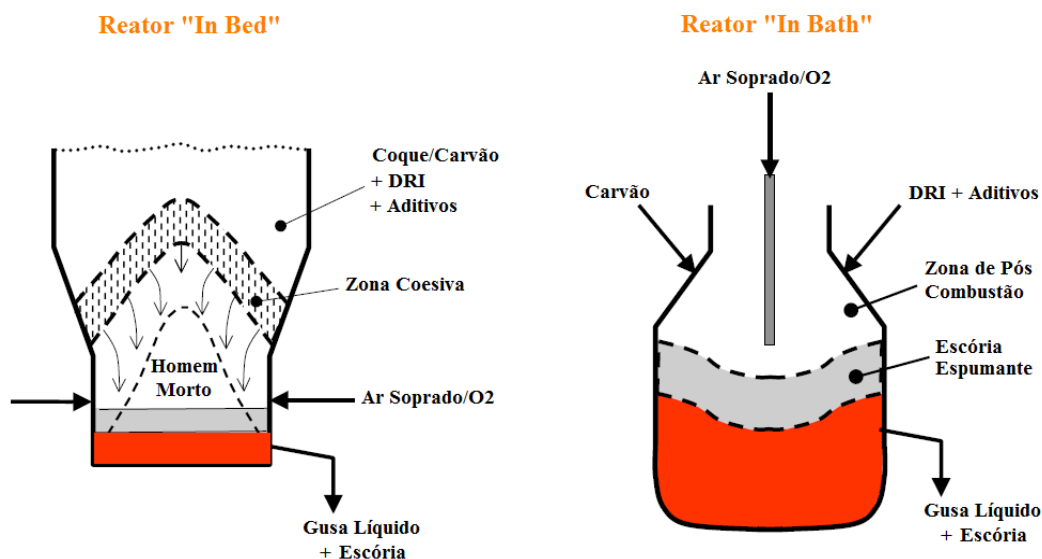
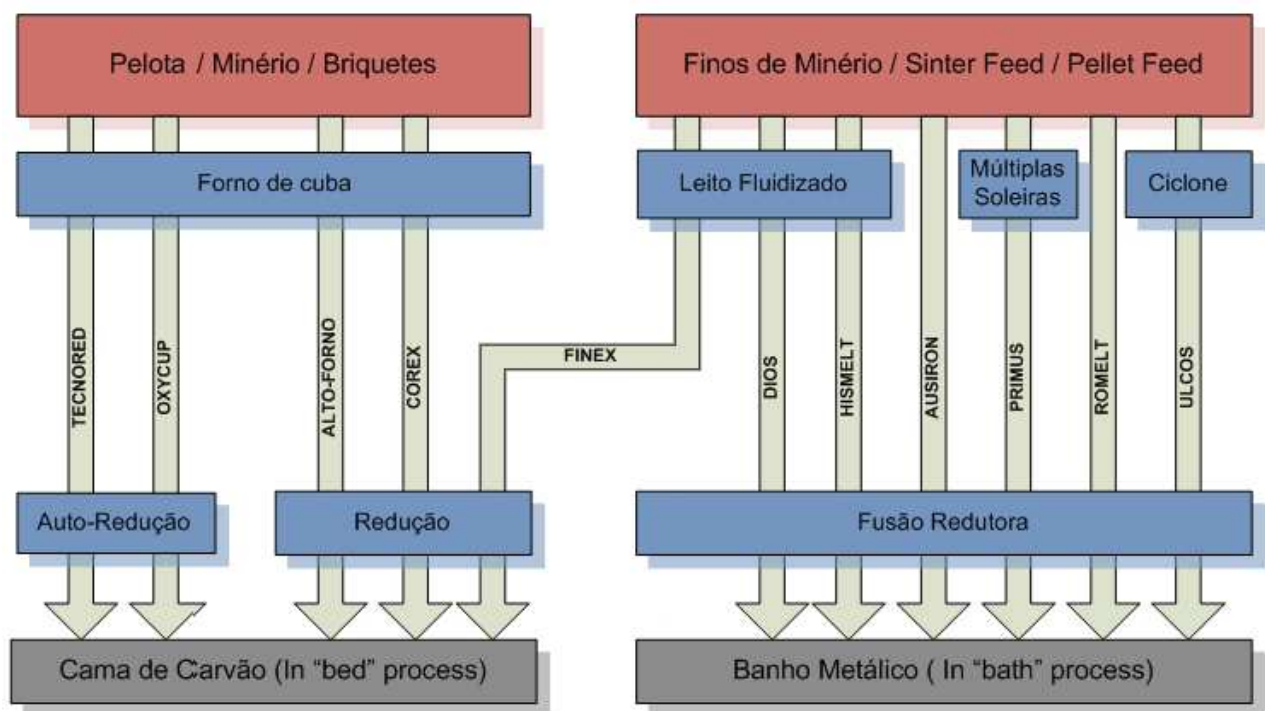


Figura 25 – Detalhes do Reator “In Bed” e do “In Bath” [2].

Os processos que utilizam forno de cuba, como o alto forno, se enquadram no mecanismo “In bed” que tem como característica a formação de uma cama de carvão sólido que sustenta a carga e gera calor e agente redutor quando da injeção de ar ou

oxigênio. Esses processos, em geral, apresentam maior produtividade que os processos que utilizam o mecanismo “In bath”, onde a carga, com baixa granulometria, é injetada no interior do banho de metal líquido e/ou escória líquida, propiciando as reações de redução, gaseificação e escorificação in-situ.

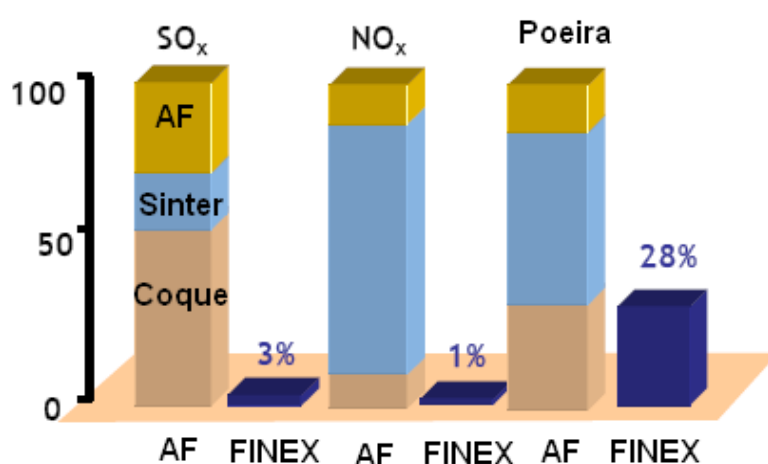
A classificação dos diferentes processos alternativos à luz do tipo de reator utilizado pode ser vista na figura 26.



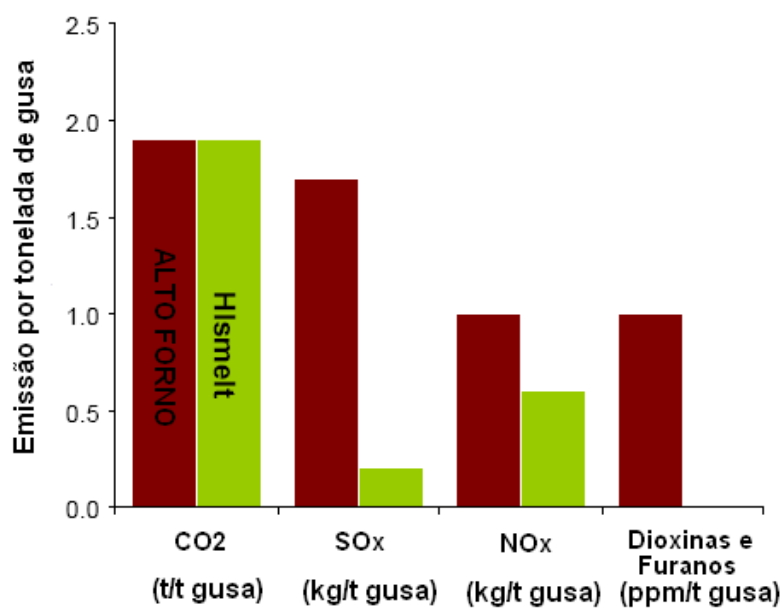
**Figura 26** – Classificação dos processos por tipo de reator e da natureza da redução [2].

### 5.3 Quanto às Emissões (Poeiras e Gás)

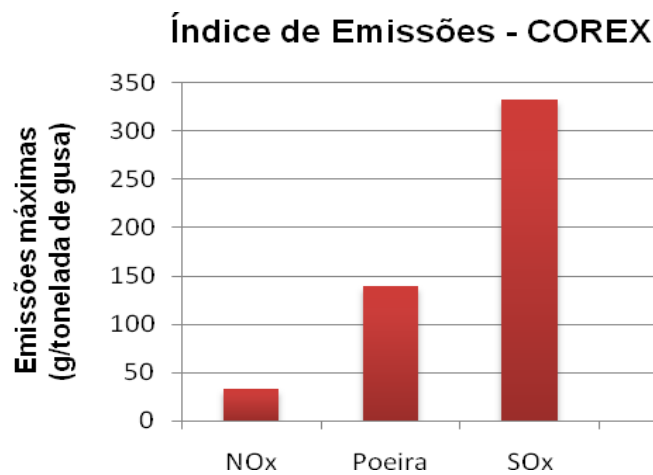
Devido ao fato de algumas das tecnologias de produção de gusa ainda se apresentarem em escala piloto/bancada, alguns dados como o de emissões de poluentes ainda não são disponíveis. As tecnologias mais desenvolvidas e que se encontram já em escala semi-comercial/comercial, podendo ser comparadas com o alto-forno são os processos COREX®, FINEX® e HISMELT®. As figuras 27, 28 e 29 apresentam alguns valores das emissões de agentes poluentes desses três processos.



**Figura 27** – Relação entre emissão de SO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub> e poeira do processo FINEX® em relação ao alto-forno [21].



**Figura 28** – Relação entre emissões de CO<sub>2</sub>, SO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub>, Dioxinas e Furanos do processo HISMELT® em relação ao alto-forno [8].

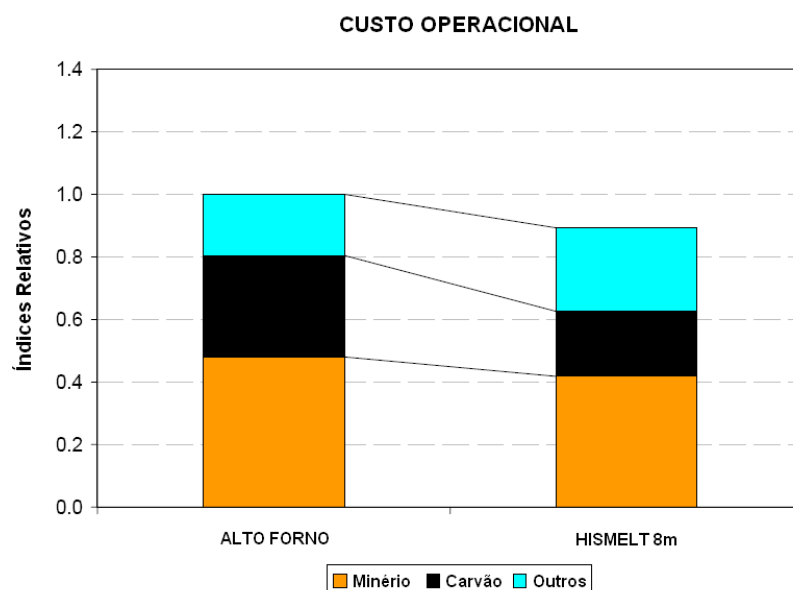


**Figura 29** – Índices de emissões de NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub> e poeira do processo COREX® [29].

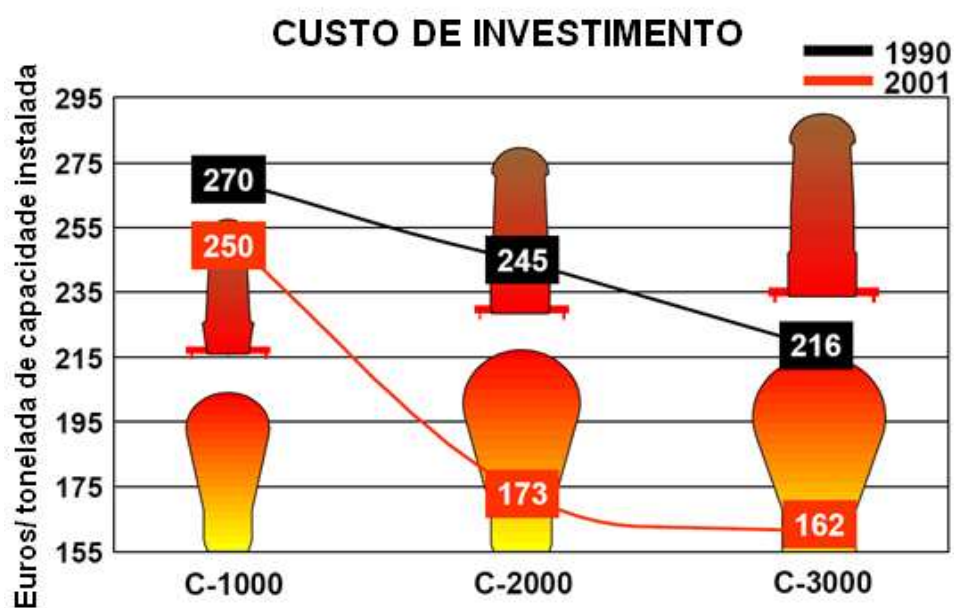


## 5.4 Quanto ao Custo de Capital

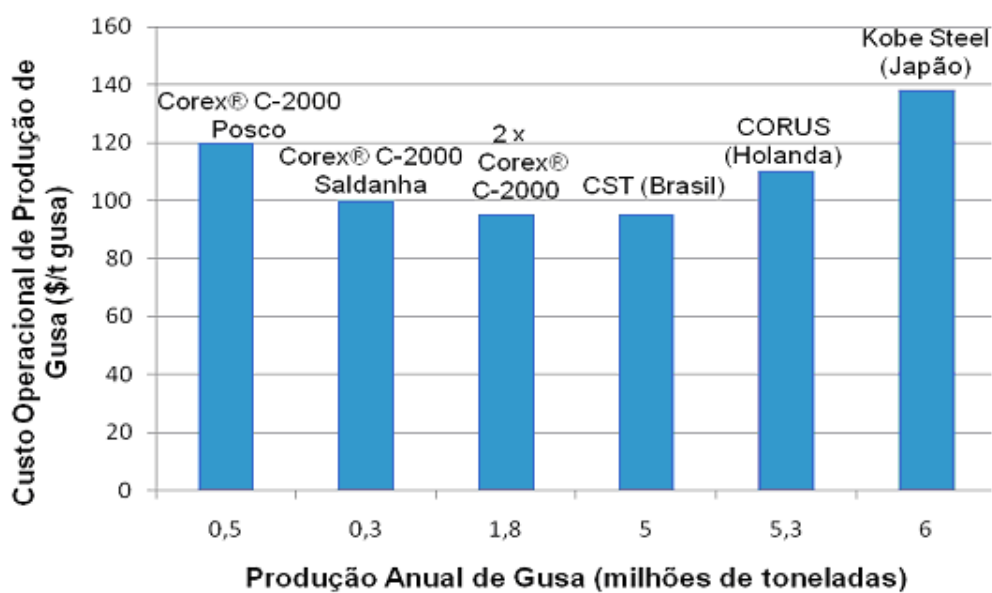
Assim como o capítulo acima, algumas das tecnologias de produção de gusa ainda se apresentarem em escala piloto/bancada. Dessa forma, valores de custo de investimento e custo operacional dessas tecnologias ainda não estão totalmente disponíveis. As figuras 30, 31, 32, 33 e 34 ilustram valores desses custos para os processos COREX®, FINEX® e HISMELT®.



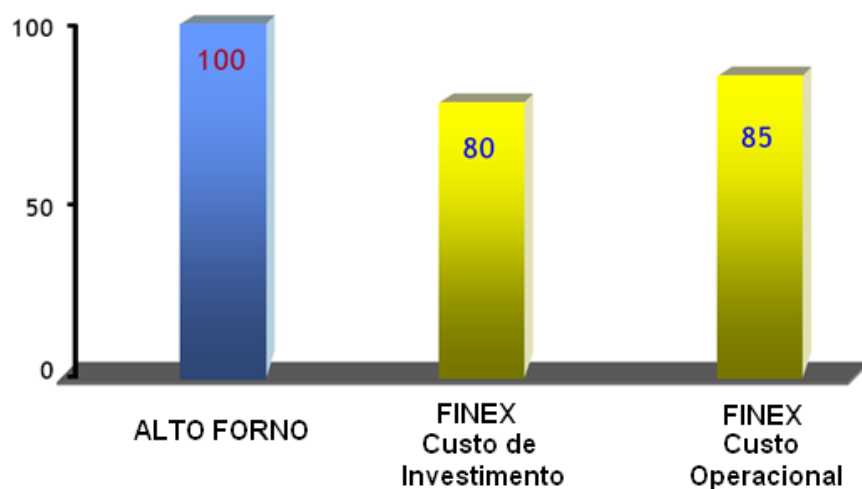
**Figura 30** – Comparação entre custo operacional do processo HISMELT® em relação ao alto-forno, considerando custo com minério, carvão e outras matérias-primas [8].



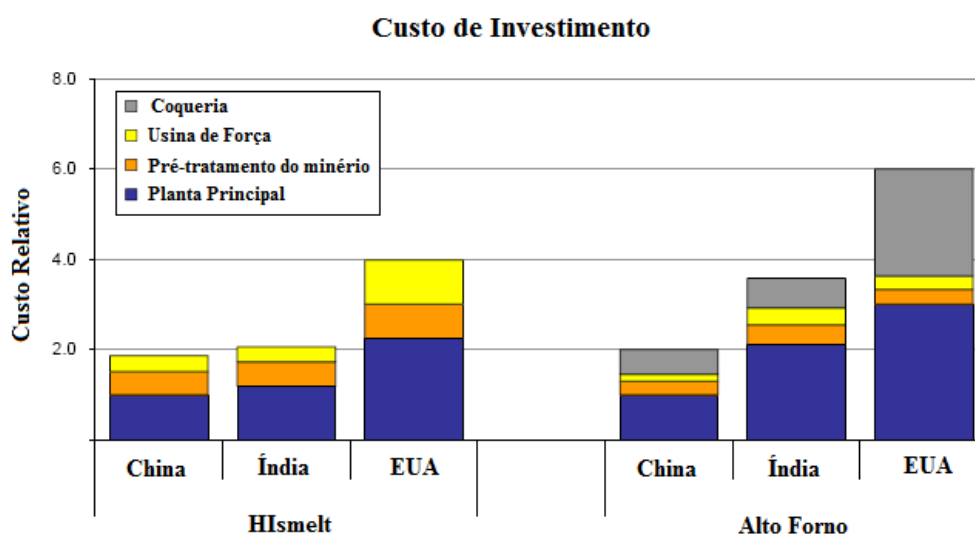
**Figura 31** – Custo de investimento para as diferentes versões do processo COREX® [2].



**Figura 32**– Custo Operacional de plantas COREX® em comparação com alto-fornos [2].



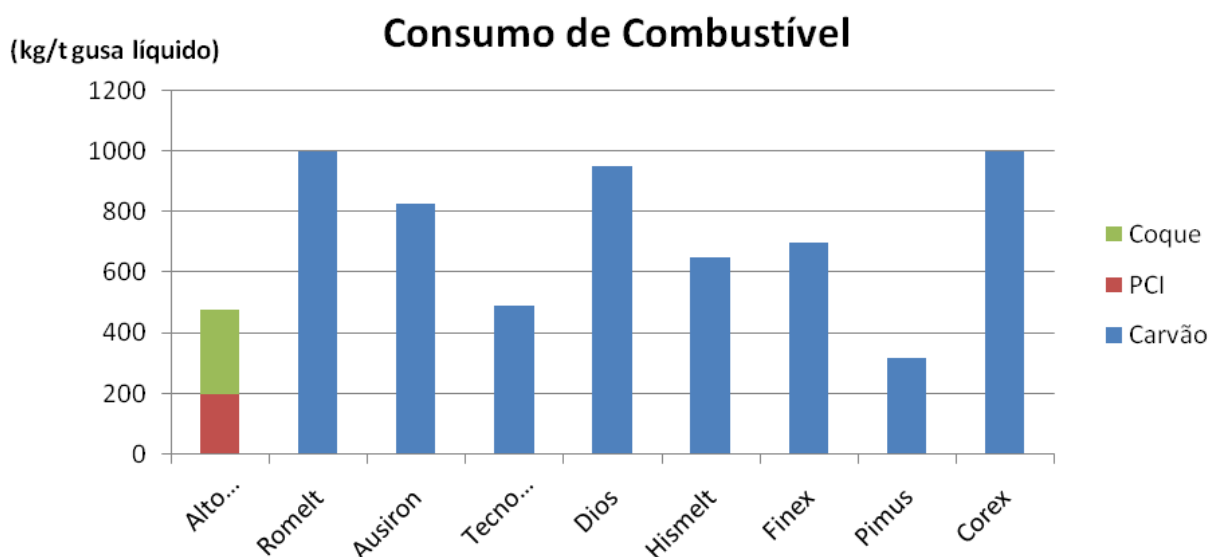
**Figura 33** – Relação entre custo de investimento e custo de capital do processo FINEX® em relação ao alto-forno para uma produção de 3 Mt de gusa por ano, incluindo planta de oxigênio e da planta de energia [21].



**Figura 34** – Custo de investimento do processo HISMELT® [8].

### 5.5 Quanto ao Consumo de Matérias-Primas (Carvão e Oxigênio)

A figura 35 ilustra o consumo de carvão granulado, finos de carvão e de coque nos diferentes processos de fusão redutora de óxidos de ferro.



**Figura 35** – Consumo de combustível dos diferentes processos alternativos de produção de ferro gusa.

Os processos DIOS®, COREX®, FINEX® e ROMELT® utilizam injeção de oxigênio puro durante o processo, o que acarreta em um custo operacional alto. Já os outros processos apresentam vantagens em relação a fonte do agente comburente pois utilizam ar, geralmente enriquecido com oxigênio, diminuindo gastos. Em contrapartida o gás gerado durante os processos que utilizam oxigênio possui um poder calorífico de interesse para outras áreas da planta.

É possível perceber que o consumo de combustível está diretamente relacionado ao consumo de oxigênio. Os processos COREX®, ROMELT® e DIOS® apresentam alto consumo de combustível, o qual está diretamente relacionado ao alto consumo de oxigênio para as necessidades térmicas e de agente redutor. Os consumos de oxigênio desses processos podem ser vistos na figura 36. O processo COREX®, por exemplo, é um processo de fusão redutora, o qual gera gás de topo com uma elevada concentração do agente redutor, o que exige a sua utilização na geração de energia ou na produção de ferro esponja num reator secundário. Neste caso, o consumo de carvão e de oxigênio são maiores que no alto-forno e a emissão do dióxido de carbono é significativamente maior.

**Tabela 1** – Classificação dos processos de acordo com seu agente comburente.

Processo	Agente Comburente
Alto-Forno	Ar enriquecido (20%)
DIOS®	Oxigênio (500 Nm <sup>3</sup> / t gusa)
ROMELT®	Oxigênio (750-850 Nm <sup>3</sup> / t gusa)
HISMELT®	Ar enriquecido (35%)
COREX®	Oxigênio (540 Nm <sup>3</sup> / t gusa)
TECNORED®	-
OXYCUP®	Ar enriquecido (20-30%)
AUSIRON®	Ar enriquecido (35%)
ULCOS® ISARNA	Oxigênio
FINEX®	Oxigênio
PRIMUS	-

## 5.6 Quanto à composição química do ferro gusa

Os processos discutidos nesse trabalho não apresentaram diferenças relevantes na composição do gusa. O TECNORED® e o FINEX® não apresentaram em sua composição a

presença de fósforo. No entanto os outros processos apresentaram teores muito baixos de fósforo, o que não os coloca em desvantagem em relação ao TECNORED® e ao FINEX®. É importante resaltar que baixos teores de fósforo no ferro gusa não estão intrinsicamente relacionados ao processo de redução mas sim aos teores de fósforo no minério de ferro e nas cinzas do carvão. A figura 37 ilustra a composição química do ferro gusa dos diferentes processos.

**Tabela 2** – Composição química do ferro gusa produzido através dos diferentes processos alternativos.

COMPOSIÇÃO QUÍMICA DO FERRO GUSA					
	C %	Si %	Mn %	P %	S %
Alto Forno	4,5	0,5	0,4	0,09	0,04
ROMELT®	4 - 4,8	0,05 - 0,15	0,01 - 0,02	0,05 - 0,12	0,025 - 0,04
AUSIRON®	2,5-4,2	0,02 - 0,04	0	< 0,08	0,02 - 0,08
TECNORED®	3,8 - 4,5	0,4 - 0,6	0	0	< 0,05
DIOS®	3 - 3,5	< 0,05	0	0,05 - 0,1	< 0,05
HISMELT®	4,4	< 0,01	< 0,02	0,02	0,1
FINEX®	4,5	0,65	0	0	0,034
PRIMUS®	4,3 - 5,1	0 - 0,1	0,4 - 1,1	0,05 - 0,15	0,05 - 0,15
COREX®	4,5	0,3	0	0,15	0,05
OXYCUP®	4	0,6	0,2	0,1	0,1

## 6. Considerações Sobre o Confronto Fusão Redutora X Redução Direta

No processo de redução direta, ferro-esponja sólido (DRI) é produzido através reações gás-sólido. Esses processos são tipicamente classificados de acordo com a natureza do agente redutor: Redutor gasoso ou redutor sólido. Plantas de redução direta possuem capacidade em torno de 33 milhões de t/ano em todo mundo. Essa produção comparada com a produção atual de aço na Europa nos anos 90 a partir de plantas integradas que chegava a 155 milhões de toneladas por ano, é pouco significativa. A

produção total de DRI é relativamente baixa se comparada com a produção do alto-forno. No entanto, a redução direta ainda é bastante utilizada devido às vantagens oferecidas pelos locais de instalação como, por exemplo, próximo aos centros consumidores ou próximo ao porto no caso de exportação, relativamente baixo custo de energia e disponibilidade de minério de ferro de boa qualidade.

As vantagens dos processos de redução direta estão relacionadas às relativamente baixas temperaturas de redução em comparação aos processos de produção de ferro gusa líquido. A redução direta dispensa planta de produção de coque, evitando a emissão de poluentes ao meio-ambiente, reduzindo o consumo de água de processo e de sua reutilização. Também não necessitam planta de sinterização, mas em muitos casos a pelotização é fundamental para elevar o grau de metalização do ferro esponja.

Por outro lado, o elevado consumo do agente redutor gasoso (gás natural reformado) e a necessidade de se fundir o ferro esponja na etapa de produção do aço, tendem a inibir um maior crescimento dessa alternativa de produção de ferro. Durante o processo de redução, não há mudança de estado físico (minério e ferro esponja são sólidos) nem separação química das impurezas. A qualidade do metal dependerá exclusivamente da qualidade do minério utilizado, isto é, se for um minério de baixo teor de ganga, o ferro esponja também o será.

## **7. A Influência da Crise Econômica no Investimento em Tecnologias**

Com o desenvolvimento do PAC, Programa de Aceleração do Crescimento, o Brasil terá investimentos públicos e estatais, principalmente em infra-estrutura e habitação, da ordem de R\$ 500 bilhões. O plano está programado para 2010, mas durante a sua implantação espera-se um desempenho relevante na economia. Estima-se que o PIB

brasileiro cresça 5% ao ano. Se o prognóstico for confirmado, haverá uma maior demanda interna por metais, o que pode aquecer o mercado metalúrgico no país.

Outro programa do governo é o PDP – Política de Desenvolvimento Produtivo que visa à inovação, competitividade, no empreendedorismo e expansão das exportações. O governo acredita que o setor minero-metalúrgico terá uma forte contribuição para manter o crescimento sustentável do País, visto o elevado volume de investimento desse setor. Entre 2004 e 2007 os recursos investidos no setor mineral chegaram a R\$ 47,1 bilhões e no setor siderúrgico R\$ 19,7 bilhões.

Até agosto de 2008 as expectativas para o cenário metalúrgico no País eram as mais favoráveis possíveis. A alta cotação internacional dos metais, a demanda externa e altos investimentos privados para os próximos 4-5 anos em siderurgia (40 bilhões) garantiam o sucesso do setor.

A produção siderúrgica de 2007 alcançou 33,8 milhões de toneladas, deixando o Brasil na 9ª posição do ranking mundial com 2,5% da produção mundial. A produção de ferro-gusa alcançou 35,6 milhões de toneladas, sendo 6 milhões exportadas, correspondendo a US\$ 1,9 bilhões [19].

Em setembro de 2008, quando a crise econômica se instalou nos países desenvolvidos, o cenário brasileiro, antes favorável, começa a sentir as consequências. Uma parte considerável dos produtos siderúrgicos produzidos no país tem com destino o mercado exterior. Em razão da crise, os principais importadores afetados pela crise foram os Estados Unidos nosso maior comprador de ferro-gusa (61,9%), Taiwan (6,2%), Espanha (5,7%) e Tailândia (5,4%).

No Estado de Minas Gerais, por exemplo, 75% dos investimentos de cerca de R\$ 130 bilhões que seriam aplicados na mineração/siderurgia foram suspensos. Empresas do setor mineral anunciam cortes de produção, como fizeram Vale e Samarco (50% de controle da Vale e 50% da BHP Billiton), as indústrias do ferro-gusa abafaram 80% dos



seus fornos e outras empresas, como a Usiminas, desligaram altos-fornos. A expectativa é que os projetos em andamento sejam concluídos, ficando os novos aguardando a melhoria do mercado internacional.

Apesar das perspectivas do mercado de mineração e siderurgia não serem as melhores, outras oportunidades podem vir a surgir. Eventos de uma grande crise podem potencializar o surgimento de novas correntes de pensamento e ação, sinalizando grandes mudanças de paradigma. Pode ser esse o momento dos países compreenderem que o colapso no sistema financeiro e a degradação ambiental fazem parte de uma mesma crise de valores, decorrente do modelo de desenvolvimento que privilegia a competição gananciosa em vez da colaboração. Momento em que lideranças mundiais devem unir forças e assumir uma plataforma de mobilização global em torno de questões relacionadas à sustentabilidade.

No caso do Brasil, a carência tecnológica e o desenvolvimento de novas tecnologias podem responder a essa demanda num momento em que a crise econômica mundial atinge o segmento de mineração e metalurgia.

No início da crise quando quebraram os primeiros bancos, muitos economistas disseram que ela seria boa para o ambiente, porque ao retrain o consumo das commodities como petróleo, soja e minérios, dariam tempo para se criarem e desenvolverem as tecnologias verdes. Disseram também que a crise geraria um senso geral de redução, reuso e reciclagem. No entanto, esse tempo não é suficiente para o aparecimento de novas tecnologias do uso de commodities, cujo desenvolvimento é contado em décadas, como no caso dos carros elétricos, e turbinas eólicas, por exemplo.

A indústria do aço tem investido no desenvolvimento sustentável do aço no país. O Relatório de Sustentabilidade (2008), produzido pelo IBS (Instituto Brasileiro de Siderurgia) mostra que R\$ 570 milhões foram investidos apenas em 2007 em projetos ambientais e R\$ 327 milhões em iniciativas de responsabilidade social. Esse relatório

busca dar maior transparência e visibilidade às iniciativas do setor siderúrgico brasileiro, que contribuem para o desenvolvimento sustentável do País e para a melhor qualidade de vida das gerações futuras.

## **8. Considerações Finais**

Muitos dos resíduos gerados atualmente na produção siderúrgica ainda são de difícil, às vezes impossível, reutilização pelos processos existentes. A limitação de reciclagem de tais materiais pelos processos convencionais se dá principalmente por razões econômicas (baixo valor intrínseco e alto custo de movimentação dos materiais a serem reciclados), ou de ordem técnica (níveis de contaminação, granulometria, periculosidade, etc.) [17]. Este cenário abre enormes oportunidades para as novas tecnologias como as citadas nesse trabalho.

Apesar da crise econômica atual, o aço continuará sendo o material mais importante na infra-estrutura de bens de capital, construção e transporte. Dessa forma, a demanda a longo prazo será grande para acompanhar o crescimento econômico e demográfico global.

No atual cenário imposto pela crise financeira mundial, as tecnologias que proporcionem maior produtividade e baixo custo são destaque na cadeia minero-metalúrgica. Tradicionais fornecedores de insumos siderúrgicos estão desenvolvendo soluções que ofereçam resultados práticos, possibilitando a convivência com demanda escassa e margens contraídas.

Entre as tecnologias discutidas nesse trabalho, os processos em estágio de desenvolvimento comercial que podem se tornar rotas efetivamente industriais são: COREX®, HISMELT®, FINEX®, PRIMUS®, OXYCUP® e TECNORED®. Dentre

elas o PRIMUS® e o OXYCUP® possuem baixa capacidade produtiva, o que dificulta sua utilização como alternativa ao alto-forno. Já os processos COREX®, FINEX®, HISMELT® e TECNORED® representam as melhores possibilidades.

A alta produtividade do COREX®, TECNORED® e FINEX® pode ter como causa o fato de utilizarem processo ‘in bed”, diferente do HISMELT® que é feito em banho metálico e tem sua produção um pouco abaixo dos processos anteriores. No entanto, o HISMELT® utiliza finos de minério, assim como o FINEX®, o que garante uma grande redução nos custos operacionais.

Em relação ao consumo de combustível o COREX® apresenta um alto consumo de carvão (1000kg/ton gusa), o que representa uma desvantagem em relação ao HISMELT®, FINEX® e TECNORED®, pois além dos gastos com o combustível, o COREX® requer uma quantidade significativa de oxigênio para reagir com o carvão.

Uma grande vantagem do processo TECNORED® é a capacidade de ser modular, possibilitando, por exemplo, para uma planta de 2 milhões de toneladas por ano seja construída em 4 módulos de 500 mil toneladas. Isso facilita o desembolso de investimentos. A emissão de CO<sub>2</sub> do TECNORED® se compara ao alto-forno, mas dispensa a sinterização e a coqueria, o que representa uma redução significativa de custos e dos agentes poluidores emitidos para a atmosfera.

Os quatro principais processos alternativos (COREX®, HISMELT®, FINEX®, TECNORED®) tem como produto um gusa com composição muito similar ao gusa produzido no alto-forno e algumas vezes até melhor, com menor teor de fósforo e enxofre. A temperatura de vazamento do gusa é em torno de 1500° C. A redução de emissão de poluentes, poeiras e gases é considerável nos quatro processos, o que se deve principalmente à não utilização de plantas de sinterização e coqueria. Todas essas características fornecem a esses processos condições de competitividade com a tradicional rota do alto-forno.

## **9. Referências Bibliográficas:**

- [1] **C. Bartels-v.Varnbüler Küttner GmbH & Co. KG Essen, K. Kessler e ThyssenKrupp Stahl AG** Zero Waste - Zero Cost Concept for integrated Steel Mills OxyCup Process for Steel Mill.
- [2] **C. Böhm A. Eberle VATECH** Global Development of Primary Side Technologies. - 2002.
- [3] **Center for Coal Utilization Japan e Federation and Japan Iron and Steel** Direct Iron Ore Smelting Reduction Process (DIOS) // Iron Making and General Industry Technologies (Iron Making Technologies) - 1995.
- [4] **David Sherrington Ross McClelland e Greg Campbell** The AusIron - Direct Smelting Technology - Pittsburgh, PA : [s.n.], 2002.
- [5] **Douglas M. Jewel, Reginald Wintrell e Adrian Muir** Demonstration of HIs melt - Process in DOE's Clean Coal Technology Program // 18th Annual International Pittsburgh Coal Conference - Coal's International Future: The Technical Challenge. - 2001.
- [6] **Goldsworthy, Tara e Bates, Peter** HIs melt - MEETING THE GLOBAL STEEL INDUSTRY CHALLENGE.
- [7] **Greene Lockwood** Ironmaking Process Alternatives Screening Study - 2000.
- [8] **HIs melt Corporation** Alternative Process for Ironmaking without Coke – The HIs melt® Process & its relevance to India - 2008.
- [9] **José Henrique Noldin Júnior** TecnoRed Process - Low Cost Pig Iron Production // Scrap Substitutes and Alternative Ironmaking IV. - Baltimore, MD : [s.n.], 2004.
- [10] **Júnior José Henrique Noldin** ALTERNATIVAS TECNORED PARA A PRODUÇÃO DE METAL LÍQUIDO // Trabalho a ser apresentado no XXXIV Seminário de Fusão, Refino e Solidificação dos Metais da ABM. - Belo Horizonte, MG : [s.n.], 2003.
- [11] **Júnior José Henrique Noldin** FLEXIBILIDADE DE MATÉRIAS-PRIMAS NO PROCESSO TECNORED // CONGRESSO ANUAL DA ABM. - Rio de Janeiro/São Paulo : [s.n.], 2006.

- [12] **Júnior José Henrique Noldin** FUEL FLEXIBILITY IN THE TECNORED PROCESS // 2nd International Meeting on Ironmaking. - Vitória, ES : [s.n.], 2004.
- [13] **Júnior José Henrique Noldin** Processo Tecnoled - Flexibilidade no Uso de Combustível // Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-Primas ABM. - São Paulo, SP : [s.n.], 2004.
- [14] **Júnior José Henrique Noldin** RECYCLING OF CST BY-PRODUCTS BY TECNORED IRONMAKING// Technical contribution to the 2nd International Meeting on Ironmaking, Theme “Environment / wastes recycling”. - Vitória, ES : [s.n.], 2004.
- [15] **Júnior José Henrique Noldin** Surfando na Onda do Crescimento Econômico // 8º ENEMET - Encontro nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica e de Materiais. - Santos, SP : [s.n.], 2008.
- [16] **Júnior José Henrique Noldin** Técnicas inovadoras para obtenção de gusa são testadas em nível mundial, estimulando negócios e oportunidades - 2003.
- [17] **Júnior José Henrique Noldin** TECNORED TRIOS – CONVERTENDO CUSTOS EM LUCRO // Contribuição técnica ao XXXV Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-Primas. - Florianópolis, SC : [s.n.], 2005.
- [18] **Küttner** Alternative Iron making process - smelting in-plant by-products Oxycup Shaft Furnace - 2009.
- [19] **Energia, M. d.** (2008). Anuário Estatístico - Setor Metalúrgico.
- [20] **Platform ESTEP - European Steel Technology** New steel initiatives for a sustainable society - Bruxelas, Bélgica : [s.n.], 2005.
- [21] **POSCO** The FINEX® Innovative Ironmaking Process // The Asia-Pacific Partnership on Clean Development and Climate 4th Steel Task Force Workshop. - 2008.
- [22] **R. J. Dry R. J. Batterham FAA FTSE, C. P. Bates and D. P. Price** Direct Smelting: Why have so few made it? // International Conference on Iron Ore Processing in Kiruna. - Kiruna, Suécia : [s.n.], 2002.
- [23] **Ulcós** // [www.ulcos.org](http://www.ulcos.org). - 15 de maio de 2009. - <http://www.ulcos.org/en/research/isarna.php>.

[24] **Ulcoss** European steelmakers and Rio Tinto join forces in combating climate change - 2008.

[25] **Ulcoss** // [www.ulcos.org](http://www.ulcos.org). - 15 de maio de 2009. - [http://www.ulcos.org/en/research/blast\\_furnace.php](http://www.ulcos.org/en/research/blast_furnace.php).

[26] **Wurth Paul PRIMUS®** Tecnologia para Reciclagem de Resíduos// SUSTENTABILIDADE DO SETOR SIDERÚRGICO BRASILEIRO ABM. - 2008.

[27] **Siemens VAI** // [www.siemens.com](http://www.siemens.com). - 20 de abril de 2009. - <http://www.industry.siemens.com/metals-mining/en/Ironmaking/corex.htm>.

[28] **ThyssenKrupp** // [www.thyssenkrupp.com](http://www.thyssenkrupp.com). - 05 de maio de 2009. - <http://www.thyssenkrupp.com/en/engagement/schachtofen.html>.

[29] **The Ministry for the environment Physical Planning and Public Works** // [www.minenv.gr](http://www.minenv.gr) - 18 de março de 2009 - [http://natura.minenv.gr/batelv/european\\_bats2.htm](http://natura.minenv.gr/batelv/european_bats2.htm)

[30] **Sengupta, S.** (2004, Abril 01). All Business. // [www.allbusiness.com](http://www.allbusiness.com) - 13 de fevereiro de 2009. - <http://www.allbusiness.com/primary-metal-manufacturing/iron-steel-mills-ferroalloy/142898-1.html>

[31] **PIBFEATURES.** (2004, Abril 01). Press Information Bureau - Government of India. // [www.pib.myiris.com](http://www.pib.myiris.com) - 20 de abril 2009. - <http://pib.myiris.com/features/article.php3?fl=021010202032>