

# **Reflexões sobre o Desenvolvimento do Tratamento de Minério de Ferro e Perspectivas sobre a Tecnologia do Futuro.<sup>(01)</sup>**

**Alfred Hundertmark<sup>(02)</sup>**

## **Resumo:**

O conceito "tratamento de minério" inclui o beneficiamento, a preparação da mistura da alimentação do processo de redução e o processo de redução propriamente dito. Na primeira parte, as relações e as dependências são definidas e explicadas. Segue-se um resumo sucinto sobre a história da mineração de minério de ferro e da indústria siderúrgica. Uma análise sobre a geologia de minério de ferro mostra que hoje em dia somente dois tipos principais de minério são explorados: itabirito erosivo e itabirito não-erosivo. Depois, faz-se uma exposição sobre o desenvolvimento dos dois sistemas de beneficiamento de minério de ferro, com as variações nos fluxogramas básicos. Indicam-se, os problemas ligados com as exigências na qualidade, cada vez mais rigorosa, e a situação atual na tecnologia de tratamento. No final, as perspectivas para o futuro são analisadas, com ênfase para os desenvolvimentos de novos processos na redução direta. Os novos processos com minério fino não aglomerado e os processos, sem coque, indicam um caminho, que pode mudar a concepção na produção do aço.

Palavras chave: Minério de Ferro; Tratamento de Minério de Ferro (TMF); Tecnologia de TMF.

---

**(01) Trabalho a ser apresentado ao I Simpósio Brasileiro de Minério de Ferro:Ouro Preto MG 14 a 17 de outubro 1996.**

**(02) Consultor de CETEM. Dr-Ing. Dipl.-Ing. de Mineração.**

## **1.) Introdução.**

A tecnologia de utilização de Minério de Ferro, inicia-se com o conhecimento do depósito do minério até o ferro metálico, na forma de gusa ou ferro esponja. Neste sentido, os itens seguintes são os mais relevantes:

- 1.) Possibilitar os processos metalúrgicos mais perfeitos,
- 2.) Cumprir todas as exigências de qualidade do ferro e do aço,
- 3.) Otimizar a produtividade das instalações, e o ponto mais importante:
- 4.) Minimizar os custos da produção,

Neste sentido, os seguintes fatores influenciam os itens relevantes, mencionados acima:

- 1.) Geologia e Mineração
- 2.) Transporte ( ferroviário e marítimo)
- 3.) Tratamento do Minério
  - 3.1.) Beneficiamento do Minério de Ferro,
  - 3.2.) Preparação da carga para a alimentação no Alto Forno ou na instalação de Redução- Direta
  - 3.3.) Processo de Redução

Para todas as áreas mencionadas, vale em primeiro lugar o critério número 4 **“Minimizar os Custos.”**

Devido ao assunto bastante vasto, o item 2 - “Transporte” não foi analisado, porém a matéria tem uma grande importância na avaliação. Algumas anotações em seguir, sobre o conceito “Tecnologia de utilização de Minério de Ferro”:

Nesta apresentação este conceito significa: o beneficiamento ( processos como classificação, lavagem, separação, filtragem ), a aglomeração, ( sinterização e pelotização ) e o processo de redução no alto forno ou nos reatores da redução direta. Como o tempo da apresentação é limitado, o tema será restringido à geologia e mineração, tratamento de minério, e, no capítulo 4 "tendências no futuro", sobre os processos da redução direta.

Antes de uma análise sobre a situação atual na tecnologia de tratamento e produção de minério de ferro, é necessário uma reflexão sucinta sobre a história do desenvolvimento da tecnologia na indústria siderúrgica.

## **2.) Resumo histórico da produção de minério de ferro.**

A indústria siderúrgica foi desenvolvida no século passado, na Europa, e apresentou um grande avanço nas primeiras décadas do século XX.

A Inglaterra foi o núcleo da produção de aço, em escala industrial, depois da invenção da máquina a vapor. Certas circunstâncias favoreceram a industrialização na Inglaterra. As causas foram:

1.) A Inglaterra possuía carvão e minério de ferro em quantidade suficiente para produzir qualquer demanda. Os produtos básicos estavam distribuídos uniformemente no território.

2.) Com a rede de ferrovia, as matérias primas -( minério de ferro e carvão, e mais tarde, coque, e, quando fosse necessário, o calcário,) eram transportadas facilmente.

3.) A Inglaterra — como a nação então mais poderosa — dominava totalmente o mercado no mundo.

Nesta época surgiram as primeiras exigências dos produtores de ferro, com respeito à qualidade de carvão e minério. O tratamento do minério, limitava-se a britagem, peneiramento e lavagem. Até o final do século passado, a grande maioria da alimentação de alto forno era simplesmente o “run-of-mine”, sem qualquer tratamento.

Depois de 1870, a Alemanha progrediu muito na produção de ferro e aço e em 1900 liderou a produção na Europa. Ao mesmo tempo, os Estados Unidos avançavam na produção de ferro e aço. O crescimento do país demandava ferro e aço; os custos do transporte marítimo da Europa eram exorbitantes, e a exportação da Inglaterra ficou limitada devido a capacidade de sua indústria siderúrgica. Os EUA foram muito privilegiados. Os depósitos de carvão nas Montanhas Apalaches e os grandes depósitos de minério de ferro na região do “Lago Superior”, numa região chamada Mesabi Range, eram gigantescos. Todas as matérias primas eram exploradas em minas do céu aberto.

A Alemanha, depois da guerra com a França, onde ocupou as grandes jazidas de minério de ferro no Lorena, conseguiu ser quase independente da importação de minério de ferro.

A **Tabela 1** mostra a produção de minério de ferro de 1900 até 1952. Os dados indicam nitidamente as oscilações na produção nos primeiros 50 anos deste século; e:

- 1.) mostram a queda da Alemanha depois da 1ª Guerra;
- 2.) a situação desastrosa na crise econômica de 1932;
- 3.) a tentativa da Alemanha de crescer em 1938;
- 4.) o aumento da produção na Rússia;
- 5.) os aumentos espantosos durante a IIª Guerra em todos os países industrializados e envolvidos na guerra;
- 6.) a supremacia dos Estados Unidos nesta época;
- 7.) os primeiros passos no Brasil a partir de 1938

Junto com o aumento da produção de minério de ferro a indústria de mineração nos Estados Unidos desenvolveu a tecnologia do tratamento. A britagem e o peneiramento foram as primeiras técnicas para o melhoramento do minério bitolado. O minério de ferro tipo limonítico era lavado e o do tipo hematítico separado com separação

gravítica . Paralelamente, na Europa o tratamento de minério de ferro foi também desenvolvido. A maioria do minério na Europa Central era limonítico, e as vezes hematítico.

Como a indústria siderúrgica americana aceitava nos alto fornos somente um teor de ferro de minério de 50 % ,o beneficiamento da matéria prima tornou-se absolutamente necessario. As primeiras usinas de concentração operavam com jigues e com sistemas de lavagem.

Mas o problema do abastecimento dos alto fornos nos Estados Unidos não era o teor de ferro no minério, mas sim o transporte de aproximadamente 2000 Km de “Lago Superior” até a Pensilvânia por ferrovia, transporte por barcos nos lagos e mais uma vez ferrovia. Em 1950, aproximadamente 80 milhões toneladas de minério, foram transportados.

Na Europa, dominava a lavagem por causa do minerio limonítico argiloso. A hematita e a magnetita existiam em pouca quantidade, com exceção da Escandinávia que apresentava grandes depósitos de magnetita. A Rússia, não foi considerada neste contexto.

Conseqüentemente, a tecnologia da separação concentrava-se na primeira fase, em lavagem e mais tarde na separação gravítica, em meio denso e separação magnética .

Depois da Iª Guerra, a situação da indústria siderúrgica mudou profundamente. A Alemanha principalmente, com a perda dos depósitos de minério tipo “minette” na Lorena, que voltava para a pertences a França, chegou a um ponto crítico. A França dominava a produção do minério de ferro. A Alemanha foi obrigada a se concentrar em seus próprios depósitos, todos de baixo teor de ferro. O país possuía muitos depósitos pequenos, a maioria com minério limonítico, poucos com hematita maciça. Uma região notável era o Siegerland com o minério Siderita, carbonato de ferro. Para a indústria siderúrgica no Ruhrgebiet, este material era o ideal, pois a distância entre os locais eram de apenas 100 km. Embora a indústria de mineração tentasse a superar as dificuldades através da pesquisa e desenvolvimento da tecnologia de beneficiamento destes minérios pobres, a importação de minério de ferro chegou até 75 % do consumo total.

Neste ponto eu gostaria de pormenorizar a situação na época de 1925 até o início da IIª Guerra. Politicamente o mundo inteiro, e principalmente a Europa, entrava numa fase de um nacionalismo, com as tendências totalitárias fortes. Especialmente depois da grande crise mundial, todos os países na Europa tentavam uma independência no abastecimento das matérias primas. Estimulados pela teoria de Keynes do “deficit spending”, por um lado realmente superou-se a crise mundial, mas por outro lado exigiu uma política econômica de planejamento governamental. As intensões dessa política era a auto-suficiência de cada país.

Sob estas condições o governo da Alemanha decidiu realizar um projeto siderúrgico com tecnologia adequada ao seu minério para se livrar da dependência das importações de minério de ferro. Este projeto é um exemplo, de como uma tecnologia de beneficiamento foi desenvolvida em uma situação critica em que a Alemanha. se encontrava na aquela época com respeito a esta matéria prima tao importante.

No centro da Alemanha existe, em termos alemães, um grande depósito de minério limonítico. Geneticamente, o depósito é uma precipitação de ferro de um mar de formação geológica cretácea, em que o ferro foi diluído em grande quantidade. As precipitações químicas apareceram como

- 1). oolitos de tamanho inferior a 1 mm , ou
- 2.) crostas de geodos ou cacos dos geodos.

Depois da geração destes minerais ferrosos, o material foi cimentado e muito incrustado de modo que um beneficiamento do material por separação gravítica era quase impossível. Apenas uma parte da areia, que acompanhava a matéria prima , podia ser separada. A composição química do ROM era 30 % Fe, 25 % SiO<sub>2</sub>, 5 % CaO, 9 % Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

A exploração planejada era de 21 milhões t/a.; parte em subsolo, parte em céu aberto. A mineração subterrânea operava com “sublevel-caving”; o método mais barato para depósitos de grande volume.

O minério tinha que ser tratado em vários processos:

-Em primeiro lugar foi instalada uma usina de lavagem e concentração para o minério mais argiloso, que era principalmente explorado em minas de céu aberto.

-Em segundo lugar houve uma usina de preparação de minério constituída de uma usina de britagem e peneiramento do ROM das minas de subsolo, projetada para 60.000 t / dia e uma área de empilhamento de produtos de 100.000 t . O material fino de peneiramento era misturado ao concentrado da usina de concentração e, depois da mistura , alimentado na usina de sinterização, com capacidade de 20.000 t / dia e 16 grelhas de sinterização em paralelo.

O material grosso da britagem era encaminhado para uma usina de calcinação com capacidade de 8000 t / dia. Uma parte de minério de ferro era tão silicificado , que nem a separação na usina de lavagem e concentração nem a usina de calcinação poderiam enriquecê-la.

Para este material foi desenvolvido um processo chamado “Krupp-Renn Verfahren” (figura 1 ). O processo é semelhante a um processo de calcinação. O minério de ferro, com baixo teor de 30 % Fe e com muita sílica, era alimentado num forno rotativo, revestido com refratário, de comprimento de cerca de 100 m e, com um diâmetro de 3 a 4 metros. O forno era ligeiramente inclinado e girava lentamente. O minério de ferro era misturado com a moinha de coque. O forno era aquecido por meio de uma chama de carvão em pó. O queimador era instalado na saída do forno. As temperaturas eram de alguns graus abaixo do ponto de fusão do minério. Nos primeiros 20 m a temperatura aumentava até 600° C e a mistura era secada. Nos próximos, 60 m, o minério era reduzido pelo monóxido de carbono gerado pelo aquecimento de moinha de coque. Antes da saída do forno as temperaturas oscilavam entre 1100 - 1200° C.

O material sólido, principalmente a sílica, transformava-se em material pastoso e assim formavam-se as “lupas”. Dentro destas “lupas” eram geradas pequenas gotas de ferro com aproximadamente 93% Fe, pouco P e Mn. As “lupas” eram moídas em moinho de barras e em seguida o ferro metálico, separado num separador magnético. A recuperação era em torno de 90 % de ferro com um teor de 93 % Fe. Este processo foi

o único método de separação do ferro silicificado, que fazia parte da lavra de Salzgitter em grande quantidade.

Esta descrição quis demonstrar, até que ponto o desenvolvimento da tecnologia foi feita sob condições político-econômicas de forma dramática, que hoje em dia ninguém ousaria de imitar. Foi óbvio, que depois da guerra esta instalação foi desativada, por ser totalmente anti-econômica.

### **3.) Desenvolvimento técnico e econômico na área de minério de ferro de 1950 até a presente data.**

Passamos agora a analisar os resultados na indústria siderúrgica sob os aspectos dos quatro itens enumerados na introdução, com 1.) a situação geológica, 2.) as reservas de minério, 3.) as conseqüências para a tecnologia do beneficiamento, e 4.) para os processos de redução.

Antes de entrar nestes textos específicos, mais uma vez, faremos um resumo cronológico.

#### **3.1) História desde 1950 até a presente data.**

Com o final da II<sup>a</sup> Guerra houve uma mudança fundamental na esfera política, econômica e social. Em primeiro lugar esta mudança atuou no mercado mundial das matérias primas, especialmente no fornecimento de minério de ferro.

Depois da II<sup>a</sup> Guerra com suas destruições, principalmente na Europa, a reconstrução exigia atuações rápidas. As ideologias antigas do isolamento, da auto-suficiência e da economia planejada não encontravam mais espaço na reconstrução do mundo ocidental industrializado. A necessidade da reconstrução exigia matérias primas, de qualquer forma. Ao mesmo tempo as regras do mercado e da competição davam as oportunidades somente para as ofertas mais favoráveis. Logo ficou bem claro, que as minas com produtos mais pobres em teor de ferro não tinham mais chances. No mercado de minério de ferro, com exceção da época da Guerra da Coreia, nunca faltou minério; ou seja, o mercado foi sempre dominado pelo compradores; a demanda de minérios de alto teor de ferro foi sempre mantida. Sob estas condições as minas na Europa Central, exceto da região da minette, foram fechadas até fim da década de oitenta.

Mesmo as minas de minério minette somente conseguiam sobreviver através de subvenções governamentais.

Ao mesmo tempo iniciava-se uma nova era nas atividades de pesquisa e no desenvolvimento da tecnologia para os tipos do minério que entravam no mercado. Os Estados Unidos foram os precursores deste evento. As circunstâncias depois da Guerra obrigavam os EUA a tomar a iniciativa, porque o consumo no mercado deles alcançava 100 milhões de toneladas de aço. Os EUA foram forçados a procurar novos depósitos pela extinção das minas de hematita rica em Minnesota e Michigan. Nesta região havia um outro tipo de minério chamado "taconito". Este termo significava originalmente o

minério fino da região Mesabi Range. Mais tarde qualquer tipo de minério de ferro pobre, duro e precisando de moagem fina, foi chamado taconito.

Nas décadas de 50 e 60 o desenvolvimento do processo de beneficiamento dos taconitos foi muito importante. O resultado destas pesquisas serão analisados e discutidos adiante.

Ao mesmo tempo, quando os E.U.A. desenvolveram a tecnologia para o minério tipo taconito, os projetos das minas no Labrador, Canadá, foram realizados. As primeiras minas nesta região foram Carol Lake, Mt. Wright e Wabush.

As primeiras importações da indústria siderúrgica europeia chegavam destas minas no fim da década 50.

A grande expansão mundial começava com o aumento da produção de aço no Japão.

### **3.2.) Geologia e Mineração.**

Nos últimos anos a geologia conseguiu fechar as “manchas brancas” no mapa mundial a respeito das reservas de minério de ferro. Partindo dos conhecimentos sobre a localização dos grandes depósitos pode-se dizer que todas as reservas de minério de ferro, viáveis de ser mineradas, são conhecidas. Estes depósitos têm um ponto em comum: Eles são de minério de ferro tipo itabirito ou seja minério de ferro silicificado laminado. Este tipo é distribuído em todas as regiões dos grandes maciços pré-cambrianos (**figura 2**). No fundo dos mares amplos e rasos foram formados depósitos de sedimentação do ferro e sílica quimicamente precipitados. A grande semelhança química dos itabiritos no mundo inteiro é explicada através desta geração. No itabirito existem, além dos óxidos de ferro e silício, teores de alumínio, fósforo, manganês e alcalis.

Distinguem-se dois tipos de **itabirito**, o **erosivo** e o **não-erosivo**.

Os depósitos de itabirito erosivos são as maiores reservas existentes no mundo. As seguintes reservas fazem parte deste tipo:

- O Quadrilátero Ferrífero, em Minas Gerais e Serra dos Carajás, no Pará, Brasil
- Hamersley e Mt. Newman, Austrália
- Sishen África do Sul,
- Cerro Bolívar e San Isidro, Venezuela; e
- Os depósitos na Índia.

O sistema básico da erosão é a diluição e o transporte da sílica e dos compostos alcalinos causados pelo clima tropical com os períodos bem alternados de chuva e seca. Assim, acontece um enriquecimento relativo dos elementos ferro, alumínio, fósforo e manganês. A **figura 3** mostra um perfil característico da erosão de um depósito deste tipo. As curvas de ferro, alumínio e fósforo têm a mesma tendência segundo a regularidade da erosão laterítica. A partir de um certo grau de erosão os

teores de fósforo e alumínio aumentam significativamente. Este fenômeno pôde criar problemas na mineração.

Geralmente o minério de Itabirito erosivo é brando, friável. Conforme a erosão da laterito, o minério pode ser uma composição de hematita, limonita, goetita e argila.

Os depósitos de itabirito não-erosivo são representados pelas minas seguintes:

- Carol-Lake e Mt. Wright, Canadá,
- Bong Range, Libéria,
- Guelbs, Mauretania, e
- Kudremukh, Índia.

Estes depósitos são geralmente pobres ferro e relativamente ricos em sílica. Em contrapartida aos depósitos erosivos, o minério é duro, maciço e as vezes complexo e intercrustado com a ganga. Por outro lado, os elementos contaminantes são dissimulados nos minerais de ganga não-erosivos.

Além dos depósitos de itabirito não-erosivo pobre existem depósitos com minerais não erosivos ricos como em Kiruna, Suécia. Os minerais consistem principalmente de magnetita, porém associados com apatita e alguns minerais alcalinos.

Se os depósitos fossem encontrados exatamente na composição explicada acima, não haveria grandes problemas no beneficiamento do minério. Infelizmente, todos os depósitos de itabirito são caracterizados por estruturas geológicas altamente complexas, o que significa que, entre os extremos, existem todas as variedades de tipos de depósitos. Os parâmetros, que têm que ser considerados no planejamento de mineração e controle de qualidade da produção, são:

1.) Os Parâmetros geológicos: identificação dos minerais de minérios e da ganga, como sílica, alumina, fosfato; a estrutura dos minerais, e a suas associações

2.) Os parâmetros para o tratamento de minério:

Teores químicos de Fe %, FeO%, SiO<sub>2</sub> %, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> %, P %, Mn %, P.F. %.

Granulometria: Minério bitolado (> 6,3 mm), Sinter-feed ( 6,3 — 0,1 mm ), Pellet-feed ( < 0,1 mm )

3.) Os parâmetros metalúrgicos: Compressão, LTB, Grau de redutibilidade, Porosidade dos agregados.

Para cumprir os requisitos destes parâmetros é inevitável um planejamento minucioso entre geologia, mineração e beneficiamento

As variações destes parâmetros no lavrado complicam a garantia de uma qualidade constante dos produtos vendidos no mercado mundial.

### 3.3.) O tratamento de Minério de Ferro.

Já foi explicado que hoje em dia existem dois tipos de minério de grande importância e um depósito muito especial na Suécia, Kiruna.



O desenvolvimento do beneficiamento do itabirito pobre não-erosivo foi resolvido pela indústria americana, quando se decidiu que o minério tipo taconito tinha que ser minerado.

Como o minério taconito é muito pobre, ( somente 30 a 35 % Fe ), e as vezes muito complexo com um grau de liberação < 40 /um, a única possibilidade de liberá-lo economicamente é a moagem autógena. A característica desta moagem é a liberação dos agregados incrustados nas zonas das fissuras naturais.

Passamos a apresentar os vários tipos de beneficiamento de itabirito duro não-erosivo.

Quando o minério é mais grosso a separação pode ser feita por meio de espirais de Humphreys. A **figura. 4a** mostra a usina de concentração da Mina Mt.Wright no Labrador, Canadá.

O fluxograma mostra a britagem , o moinho autógeno com as peneiras de 4 mm e 1,6 mm (10 mesh) em circuito fechado e espirais em 3 estágios, rougher e 2 estágios de purificação. O teor de alimentação é 33 % Fe. O concentrado alcança um teor de 66,0 % Fé e 5,0 % SiO<sub>2</sub> e recuperação em massa de 37,5 %

Em contraste com a simplicidade deste fluxograma, o próximo fluxograma mostra a separação de um taconito duro e incrustado.( **figura 4b**) A alimentação da usina de Concentração da mina Tilden, Cleveland Cliffs Inc. E.U. tem 36 % Fe, quase igual à de Mt. Wright. O concentrado tem um teor de 65,6 % Fe com uma recuperação em massa de 38,4 %. Os custos para os mesmos resultados são muito mais altos; neste caso devido a moagem autógena junto com um moinho de seixo, no segundo estágio e uma britagem para a preparação dos pebbles.

A concentração consiste de uma flotação dos silicatos com um estágio rougher e quatro estágios de purificação. Além disso a deslamagem antes da flotação é necessária, em que cerca de 15 % de massa é perdida.

O minério de ferro não-erosivo pobre e duro às vezes compõe-se de magnetita ou de uma mistura de magnetita e hematita . No primeiro caso a separação deste minério é fácil. A **figura 4c** mostra o fluxograma da mina Hibtac, de Cliffland-Cliffs nos E.U.

Depois da moagem autógena, simplesmente uma separação magnética a úmido de baixa intensidade produz um concentrado de 66 % Fe . O teor baixo na alimentação é notavel., apenas 23-26 % Fe . A recuperação de ferro magnético é de 96 % .

Como já mencionado acima, o itabirito duro e pobre foi o primeiro Itabirito minerado por motivo de falta de minério de ferro nos EUA, na época em que o E.U.A. dominava a produção de ferro e aço.

O resumo sobre o **tratamento do itabirito duro**:

- 1.)A moagem autógena é inevitável,
- 2.) Nos casos em que o minério hematítico é mais grosso, a separação com espirais é mais vantajosa.
- 3.) Quando o material é consistindo de magnetita, a separação é feita com separadores magnéticos de baixa intensidade, a úmido.
- 4.) No caso em que o grau de liberação de minério é muito fino, a flotação da sílica é bem sucedida.

Seguiu-se uma segunda época causada pela grande expansão da indústria siderúrgica de Japão, que estimulou o desenvolvimento do tratamento de Itabirito rico.

No item 3.2 foi mencionado, que os grandes depósitos do mundo são de itabirito rico, erosivo. Este tipo de minério é geralmente enriquecido no depósito. Como este tipo de minério é muito complexo, a composição exige as vezes um tratamento muito sofisticado. Ha algumas regras sobre a composição de itabirito rico. Geralmente o minério bruto é friável e relativamente fino. A parcela do material bitolado é normalmente pouca e rica em ferro. Dentro do material há faixas de granulometria, em que a sílica é enriquecida. Uma outra possibilidade existe, que certas regiões da mina,, sejam mais duras e complexas e o material seja mais bitolado.

De qualquer forma os chamados itabiritos ricos precisam sempre de um tratamento. Minas ricas têm instalações tipo lavagem, em que, depois da britagem, o material é lavado em classificadores espiral. Muitas vezes este tratamento é suficiente. como em Carajás.

A maioria das minas em Minas Gerais teve que ser instalada outras técnicas de separação, conforme com a sua composição. A tecnologia mais eficiente de separação de minério tipo Itabirito foi desenvolvido no início da década de 70, quando a CVRD instalou os primeiros separadores magnéticos, a úmido, de alta intensidade, tipo Jones, na Mina Cauê, em Itabira, M.G. A partir desta época, o tratamento do itabirito fino tornava-se possível. O minério de mina Cauê tem um pico de sílica típico na faixa da granulometria entre 0,1 e 1,0 mm, em que o minério fino tem que ser separado.

A dificuldade do itabirito erosivo é a complexidade dos depósitos e os teores variáveis dos elementos contaminantes.

O grande problema hoje não é o enriquecimento em ferro, mas muito mais a garantia do teor baixo dos contaminantes como  $Al_2O_3$ , P, Mn e os álcalis. A **figura 5** mostra, como exemplo, os teores destes elementos nos produtos exportados: pelotas (P), sinter-feed (SF), minério bitolado (St No teor do fósforo e  $Al_2O_3$ , as minas de itabirito erosivo superam, na maioria, os limites exigidos pelas empresas siderúrgicas.

Estes dados indicam as limitações do tratamento de minério de ferro. Uma redução do fósforo é somente realizável com processos altamente dispendiosos como moagem ultrafina, floculação seletiva, ou até lixiviação. As perdas em ferro seriam absurdas nestes casos.

Completando este relato sobre o tratamento dos minérios de ferro, que dominam o mercado mundial, mais um fluxograma de uma usina na Austrália, Goldsworthy Mining, Port Hedland. é apresentado **na figura 6**. Depois da britagem, o material é separado no jigge para minério bruto (30 — 6 mm) e para minério fino (6 — 1 mm). O minério fino < 1 mm é separado nas espirais e finalmente o material < 0,1 mm, que foi classificado no ciclone, é separado num separador magnético de alta intensidade, a úmido. Os concentrados das espirais e da separação magnética são misturados como sinter-feed.

O grande desafio na tecnologia de tratamento de minério é a garantia de qualidade dos produtos com a maior uniformidade possível dos mesmos. Algumas anotações devem ser apresentadas adiante.

O resumo sobre o tratamento de minério Tipo Itabirito erosivo:

- 1.) O minério é normalmente mais fino. Por isso as minas com minério deste tipo são as grandes produtoras de sinter-feed e pellet-feed
- 2.) O minério pode ser nao-friavel e, em consecuencia desta caraterística possui um teor maior de material bitolado.
- 3.) Por causa da grande quantidade de particulas incrustadas, a maioria destes minérios tem que ser beneficiada para a liberar destas particulas.
- 4.) Todos as técnicas de beneficiamento são utilizadas dependendo da sua composição mineralogica e os diferentes tipos de associações.
- 5.) A dificuldade com este tipo de minério é manter a qualidade dos concentrados de forma constante.
- 6.) O itabirito tem minerais acompanhantes que são prejudiciais à qualidade do aço a ser produzido.

Durante a década de 80 e nos últimos cinco anos houve alguns desenvolvimentos nas areas de moagem e flotação.

A prensa de rolos (figura 7) é um novo método de moagem. O mecanismo de fragmentação é idêntico ao de um britador de rolos. Um dos dois rolos é equipado com um mancal móvel, porém cada um dos dois tem seu próprio acionamento. O material alimentado enche sempre o silo de alimentação e assim e preenche o espaço existente entre os rolos constituindo um "leito". Um dos dois rolos é pressionado com prensas hidráulicas de alta pressão, de modo que o material dentro da abertura, no "leito" sofre uma pressão de cerca de 500 bar. Com isto os grãos dentro da fenda são destruídos. O sistema ja esta provado na industria de cimento e as primeiras máquinas estão sendo instaladas numa usina de pelotização da CVRD.

Uma outra evolução esta ocorrendo na flotação pneumática. A idéia da flotação pneumática existe já algumas décadas. No fundo, a flotação convencional funciona de uma forma contraditória. O processo da flotação precisa um fluxo de regime laminar não destruindo as ligações sensíveis existente entre as partículas e as bolhas. Mas os fluxos são de regime turbulento nas células convencionais. As novas colunas de flotação evitam essa turbulência e a altura das colunas aumentam notavelmente os tempos de redidencia aumentando assim a possibilidade dos encontros entre as partículas e as bolhas

Com esta nova tecnologia, na separação de minério de ferro a produção de super-concentrados com um teor de impurezas abaixo de 0,6 % é possível.

#### 4.) Tendencias para o futuro.

Quais são as perspectivas em relação ao tratamento de minério de ferro no futuro?

#### 4. 1.) Geologia e Mineração.

O problema do futuro com respeito aos minérios é a limitação com referências aos contaminantes . A solução deve partir a interação entre a geologia, mineração e metalurgia, na decisão de até que ponto, as perdas nas reservas podem ser aceita em caso de o tratamento do minério não cumprir as qualidades exigidas.

A previsão para a alimentação do mundo até o ano 2005 com minério de ferro é na faixa de 980 milhões de toneladas em comparação com 924 milhões de toneladas no ano 1993. O Brasil, com 198,5 milhões de toneladas corresponde a 20,2 % da produção mundial; e Austrália, com 172 milhões de toneladas corresponde a 17,5 % , serão os grandes produtores no futuro. A perspectiva da exportação dos produtos é de 477,4 milhões de toneladas; um aumento de 18 % relacionado a 1993. A exportação é completamente dominada pela Austrália (158 Milhões de toneladas = 33,0 %) e pelo Brasil ( 142,7 Milhões de toneladas = 29,9 % ).

A distribuição dos produtos exportados é a seguinte:

Finos	252 Milhões t	53 %	Brasil:	85,7 Milhões t	60,0 %	Austrália	110 Milhões t	42,9 %
Conc./	76 Milhões t	16 %		16,6 Milhões t	11,6 %		0 Milhões t	0 %
P.F.								
Lump	83 Milhões t	17 %		11,5 Milhões t	8,1 %		47,8 Milhões t	57,1 %
Pellets	66 Milhões t	14 %		28,9 Milhões t	20,3 %		0,2 Milhões t	0 %
Mundo	477 Milhões t	100 %	Brasil:	142,7 Milhões t	100 %	Austrália:	158 Milhões t	100,0 %

#### 4. 2 ) Projetos de Mineração no Oeste da Austrália.

A Austrália participará com 33,0 % na exportação global, Brasil com 29,8 % segundo dos prognósticos do IISI. A indústria australiana de minério de ferro reconhece que a situação é meio crítica para os minérios existentes e a qualidade dos produtos, que têm que ser negociadas nos próximos 10 anos no mercado mundial.

Os tipos de minérios de alta qualidade nos depósitos antigos, como Tom Price, Mt. Whaleback e Mt. Goldworthy, estão em fase de exaustão. Assim as empresas de mineração estão estudando uma estratégia com novos depósitos, outros tipos de minério e uma concepção mais agressiva no mercado asiático, onde os países China, Coréia, e Taiwan entram numa fase de expansão das indústrias siderúrgicas.

Os minérios das novas jazidas não atingem a especificação de qualidade para o processo de redução direta. Os minérios de primeira qualidade são principalmente o lump-ore e o sinter-feed. Mas as reservas do minério de alta qualidade, com o teor baixo de fósforo, são limitadas. Por outro lado a Austrália possui entre outras reservas uma área com aproximadamente 8 bilhões de toneladas do minério com baixo teor de fósforos porém o tipo hematita-goethita , chamado "Marra Maramba" e um outro tipo limonítico-pisolítico, chamado "Yandi-Pisolítico" esta em fase de exploração.

Algumas explicações são necessárias com respeito aos tipos de minério na Austrália. O lump-ore, de primeira qualidade, é um hematita-goethita supergênica, pertencendo a formação geológica, chamado Brockman. Mas este minério reduzir-se-a

de 60 % para 40 % nos próximos 10 anos. A participação do minério da formação Marra Mamba crescerá no futuro.

Mais interessante é o minério tipo pisolito-limonítico. Este tipo de minério tem 58 % Fe e 10 % P.F. Depois de uma calcinação o minério passa a ter 66 % Fe. Nos próximos dois anos a Austrália aumentará a exportação deste minério até 70 milhões t /a. As empresas BHP ( Broken Hill Part.) e Hamersley investirão neste minério aproximadamente US\$ 340 milhões incluindo novos sistemas de ferrovias.

O terceiro grande grupo, Robe River Iron Associates , a joint venture entre Robe River ( 53 %), Mitsui Iro Ore Development ( 33 % ), Nippon Steel Austrália ( 10,5 % ) e Sumitomo Metal Austrália ( 3,5 % ) está muito envolvido na mineração deste pisolite, produzindo um sinter-feed , que depois da calcinação, que faz parte de processo de sinterização, chega na especificação seguinte: 63,0 % Fe, 6,3 % SiO<sub>2</sub>, 3.0 %; Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; 0,04 % P, 1,4 % P.F.

A Austrália prevê grandes investimentos em projetos no tratamento de minério, aglomeração e redução direta. Comentam adiante a concepção destes projetos.

#### **4. 3. ) As tendências no Tratamento de Minério.**

A tecnologia de tratamento de minério de ferro é conhecida. Novos sistemas inovadores não são previstas. As tendências em direção da uma otimização são as seguintes:

1.) As pesquisas sobre a aplicação da nova tecnologia de moagem com a prensa de rolos.

2.) A otimização da flotação de coluna no beneficiamento dos minérios itabiríticos erosivos e não- erosivos

3.) A pesquisa e o desenvolvimento na tecnologia da flotação pneumática para a produção de super concentrados para alimentação nos processos de redução direta.

4.) O desenvolvimento de um sistema de previsão da qualidade dos concentrados, em função do conhecimento da composição e característica de separação dos vários tipos de minério, também chamado "metal-estatística".

Este último ponto tem que ser explicado. As minas com Itabirito rico são caracterizadas pela complexidade da estrutura mineralógica e geológica. Como já mencionado, o itabirito rico pode ter composições químicas e mineralógicas variadas bem como características específicas na separação. Em qualquer planejamento na produção e venda dos produtos, o comportamento na separação tem que ser considerado na previsão da qualidade e quantidade. Assim é necessário de desenvolver um sistema da previsão dos produtos, em que este comportamento possa ser definido para cada tipo de minério

#### 4.4.0.) Prognósticos para o processo de redução

A produção mundial do aço no ano 1994 foi 725 milhões toneladas. Cerca de 30% da produção foi fundida em fornos elétricos a arco. A tendência no mundo é um aumento na produção com fornos de arco. A previsão para o ano 2010 é de 45 % da produção total de aço no mundo .

Os motivos para esta expansão são convincentes:

1.) O consumo total de energia específica por tonelada de produto final está na faixa de 10 % do consumo nas técnicas clássicas: sinterização ou pelletização, alto forno, processo de conversão, lingotamento contínuo , e laminação.

2.) Os custos de investimento variam entre 35 e 50 % dos custos de uma usina siderúrgica integrada.

Mas, dois fatores inibem uma maior difusão da tecnologia da redução direta:

1.) o mercado da sucata é muito instável. e

2.) a qualidade da sucata proíbe a produção do aço de melhor qualidade.

Por causa destes dois argumentos, o mercado procura o caminho para um tipo de alimentação, que garanta uma uniformidade de alta qualidade.

Esta tecnologia da substituição da sucata é classificada de acordo com o tipo de forma de ferro e o tipo do meio redutor. **Figura 8** mostra as várias tecnologias. O tempo não permite comentários e comparações dos sistemas. porém a tecnologia mais avançada deve ser apresentada e discutida. Algumas observações rápidas sobre essas tecnologias podem ser apresentadas nessa figura, que mostra a diferença básica entre dois produtos; o gusa e o ferro esponja.(chamado em inglês “ virgin iron “). Cada um destes dois tipos citados pode ser formado ou como metal líquido, (hot metal), e gusa ou como ferro esponja, que corresponde ao DRI (Direct Reduced Iron), briquetes de ferro quentes (HBI = Hot Briquets Iron), ou carvão de ferro (Iron Carbide).

O meio de redutor pode ser coque, carvão ou gás natural. As formas de ferro são: minério bitolado, pelotas, sinter, ou minério fino.

A tabela mostra:

1). A tecnologia convencional de alto forno (AF), com coque, minério bitolado, pelotas e sinter. Uma nova tecnologia , chamado COREX, usa o carvão em vez de coque, substituindo assim um produto caro e mais poluente

2) Na produção de ferro esponja já existe uma técnica convencional, com gás natural. Os processos MIDREX e HYL III são bem sucedidos. O sistema SL/RN, que opera com carvão, também faz parte dos sistemas clássicos de redução direta. Em 1994 a produção mundial com estes sistemas, principalmente baseada na tecnologia com gás natural, foi de 27,5 milhões de toneladas /ano, das quais 35 % foram produzidos na América Latina, 21 % na Ásia, 20% no Oriente Médio e 10 % na África.

3) A tecnologia mais promissora para o futuro parece ser a redução direta com minério fino e, como meio redutor, o gás natural ou o carvão.

Dentro da indústria siderúrgica a competição será cada vez mais acirrada e num futuro próximo o objetivo das novas concepções não será mais apenas uma redução do consumo elétrico porém também custos operacionais, e investimentos de capital em instalações vantajosas das mini-siderúrgicas, com forno elétrico a arco, combinado com as tecnologias novas, como thin-slab casting e hot-rolled strip que aumentarão a competitividade dos produtores das chapas finas e outros produtos nobres. A condição para este desenvolvimento é a disponibilidade de um tipo de alimentação com preços razoáveis. Sob este aspecto, os sistemas que trabalham com minério fino, como FINMET, CIRCORED; FIOR com gás natural e CIRCOFER com carvão, são os mais interessantes e devem ser explicados de uma forma mais detalhada.

#### **4.4.1.) CIRCORED e CIRCOFER, da LURGI.**

Os dois sistemas funcionam na base do leito fluidizado. Sem dúvida, a tecnologia de leito fluidizado é o melhor sistema para um material fino. Entre os vários tipos de reatores de leito fluidizado, o sistema (CFB), - leito fluidizado circulante (circulating fluidized bed = CFB), age com maior eficiência. A **Figura 9** demonstra as vantagens. A grande diferença de velocidade, o "slip velocity", garante uma mistura intensa entre o gás redutor e minério de ferro. O reator CFB é bem ajustável para todas as situações, através do sistema circulante. CFB permite o ajuste de tal forma, que o processo não produza gás adicional, que deveria ser usado ou tratado em outras instalações.

Os dois sistemas operam com dois estágios de leito fluidizado. A alimentação entra primeiro num forno de pré-aquecimento, onde o material é aquecido até 800° C. De lá o minério pré-aquecido entra no CFB, onde existe uma pressão de 4 bars. No CFB a temperatura de 630° C, assim evita qualquer entupimento. Num CFB, a velocidade de gás é entre 4 — 7m/s e o tempo de reação com 20-30 min. é relativamente curto. O minério pré-reduzido sai do CFB com 70 % Fe metalizado. O segundo estágio é um reator "clássico", chamado FB (= Fluidized Bed). A concepção do FB-Reactor permite uma velocidade baixa e um tempo de reação longa. (**Figura.9a**). O ferro reduzido com um grau de metalização de 93 %, é descarregado a 630° C. O material é mais uma vez aquecido até 680° C antes da entrada na briquetagem a quente. A **figura 9b** mostra o processo CIRCORED.

No processo CIRCOFER (**figura 9c**), com carvão, o minério fino é pré-aquecido até 800°C, aproveitando o gás de escape do CFB e FB. O carvão é carregado diretamente num gaseificador /pré-aquecedor onde a temperatura chega até 1000° C. Neste caso a temperatura no CFB tem 900° C. O produto do segundo estágio, FB, consiste de ferro metalizado, e cinza, que é resfriado até 730° C antes da entrada para uma separação magnética a quente. Depois desta separação magnética, o material entra na briquetagem com 680° C. A tecnologia do leito fluidizado aceita uma faixa larga na granulometria. Por exemplo, uma partícula grossa pode decrepitar num tamanho ideal de < 1mm. Para otimizar a granulometria, a LURGI desenvolvia uma chamada

Micropelotização, aglomerando os ultrafinos abaixo de 50  $\mu$ m. Mas a faixa de 1,5 até 0,1 mm é recomendada.

O teor de ferro e a composição do minério têm também uma faixa ampla. Quando é mais puro, o rendimento é melhor, mas existe uma zona otimizada entre a pureza do minério e os custos de beneficiamento.

A **tabela 2** mostra os custos da operação e produção dos processos, baseados nas condições na Venezuela para CIRCORED e nos EUA para CIRCOFER:

Como o minério fino não é aglomerado, os custos na Venezuela bem como no EUA são altamente favoráveis. Com este item, pode-se demonstrar, que estes processos têm uma vantagem diante de todos os outros processos, que usam minério aglomerado.

O preço do gás natural com 0,7 US\$/ Mbtu é favorável. Os custos no Brasil estão na faixa de 1,5 US\$/ Mbtu.

Os custos da produção mostram a grande viabilidade destes processos, considerando que os custos para uma tonelada de gusa estão entre 150 — 180 US\$/t.

Cliffs and Associated Limited (CAL) fechou um contrato com a LURGI sobre a instalação de uma usina CIRCORED para a produção de 500.000 toneladas de briquetes metalizados quentes. O investimento são cerca de 150 Milhões US\$ com os custos para a infra-estrutura incluídos. O início da produção está programado para meados de 1998.

#### **4.4.2) FINMET.**

Um outro processo muito interessante para a redução direta do minério fino é oferecido pela Voest-Alpine-Industrieanlagenbau GmbH. O processo é chamado FINMET.

O minério, numa faixa de granulometria entre 12 e 0,15 mm é carregado no quarto reator de uma série de quatro reatores. Depois de um certo tempo de reação o material é transportado para o terceiro reator, em que a temperatura é mais alta. Neste sistema o material passa para o segundo e o primeiro reator até o ferro esponja sair do primeiro reator com um grau de metalização de 92 % e no mínimo de 1 % C. A temperatura do processo é cerca de 800° C.

Em Junho 1995 a companhia Australiana BHP- DRI fechou um contrato com a VAI sobre a instalação de uma usina do processo FINMET em Port Hedland, Austrália, com uma capacidade 2 Milhões t de briquetes cosidos ( HBI ).



Micropelotização, aglomerando os ultrafinos abaixo de 50 / $\mu$ m. Mas a faixa de 1,5 até 0,1 mm é recomendada.

O teor de ferro e a composição do minério têm também uma faixa ampla. Quando é mais puro, o rendimento é melhor, mas existe uma zona otimizada entre a pureza do minério e os custos de beneficiamento.

A **tabela 2** mostra os custos da operação e produção dos processos, baseados nas condições na Venezuela para CIRCORED e nos EUA para CIRCOFER:

Como o minério fino não é aglomerado, os custos na Venezuela bem como no EUA são altamente favoráveis. Com este item, pode-ser demonstrado, que estes processos tem uma vantagem diante de todos os outros processos , que usam minério aglomerado.

O preço do gás natural com 0,7 US\$/ Mbtu é favorável. Os custos no Brasil estão na faixa de 1,5 US\$/ Mbtu.

Os custos da produção mostram a grande viabilidade destes processos, considerando que os custos para uma tonelada de gusa estão entre 150 — 180 US\$/t.

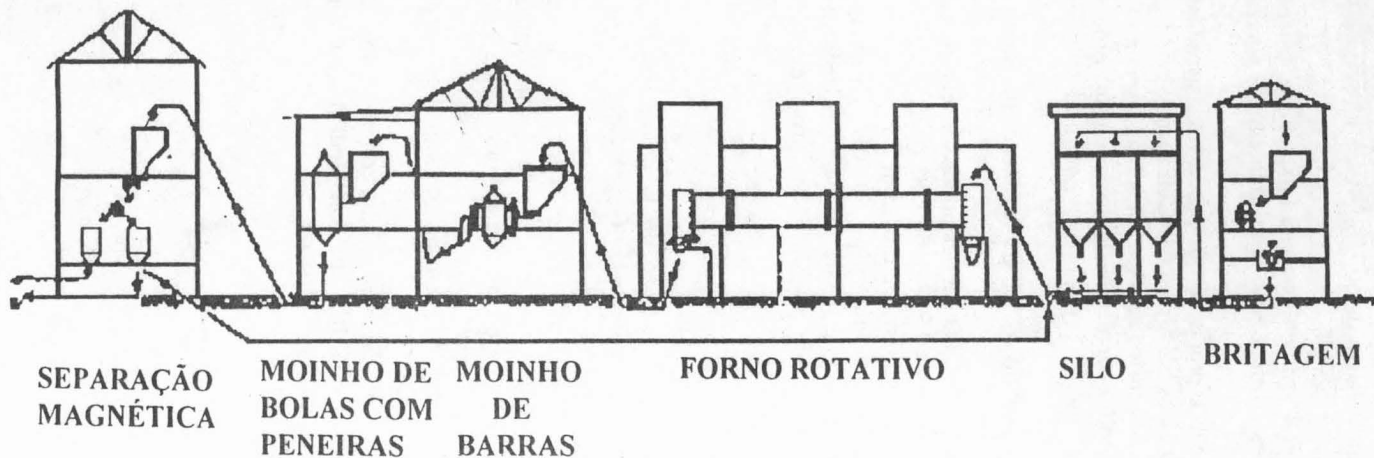
Cliffs and Associated Limited (CAL ) fechou um contrato com a LURGI sobre a instalação de uma usina CIRCORED para a produção de 500.000 toneladas de briquetes metalizados quentes. O investimento são cerca de 150 Milhões US\$ com os custos para a infra-estrutura incluídos. O início da produção está programado para meados de 1998.

#### 4.4.2 ) FINMET.

Um outro processo muito interessante para a redução direta do minério fino é oferecido pela Voest-Alpine-Industrieanlagenbau GmbH. O processo é chamado FINMET.

O minério, numa faixa de granulometria entre 12 e 0,15 mm é carregado no quarto reator de uma série de quatro reatores. Depois de um certo tempo de reação o material é transportado para o terceiro reator , em que a temperatura é mais alta . Neste sistema o material passa para o segundo e o primeiro reator até o ferro esponja sair do primeiro reator com um grau de metalização de 92 % e no mínimo de 1 % C A temperatura do processo é cerca de 800° C.

Em Junho 1995 a companhia Australiana BHP- DRI fechou um contrato com a VAI sobre a instalação de uma usina do processo FINMET em Port Hedland, Austrália, com uma capacidade 2 Milhões t de briquetes cosidos ( HBI ).



Alimentação (exemplo): 100 kg rom, 31,4 % Fe  
Rendimento em massa: 30 kg com 93 % de Fe  
Rendimento metalúrgico: ~90 %

Figura 01- Sistema de "Krupp-Renn-Verfahren"

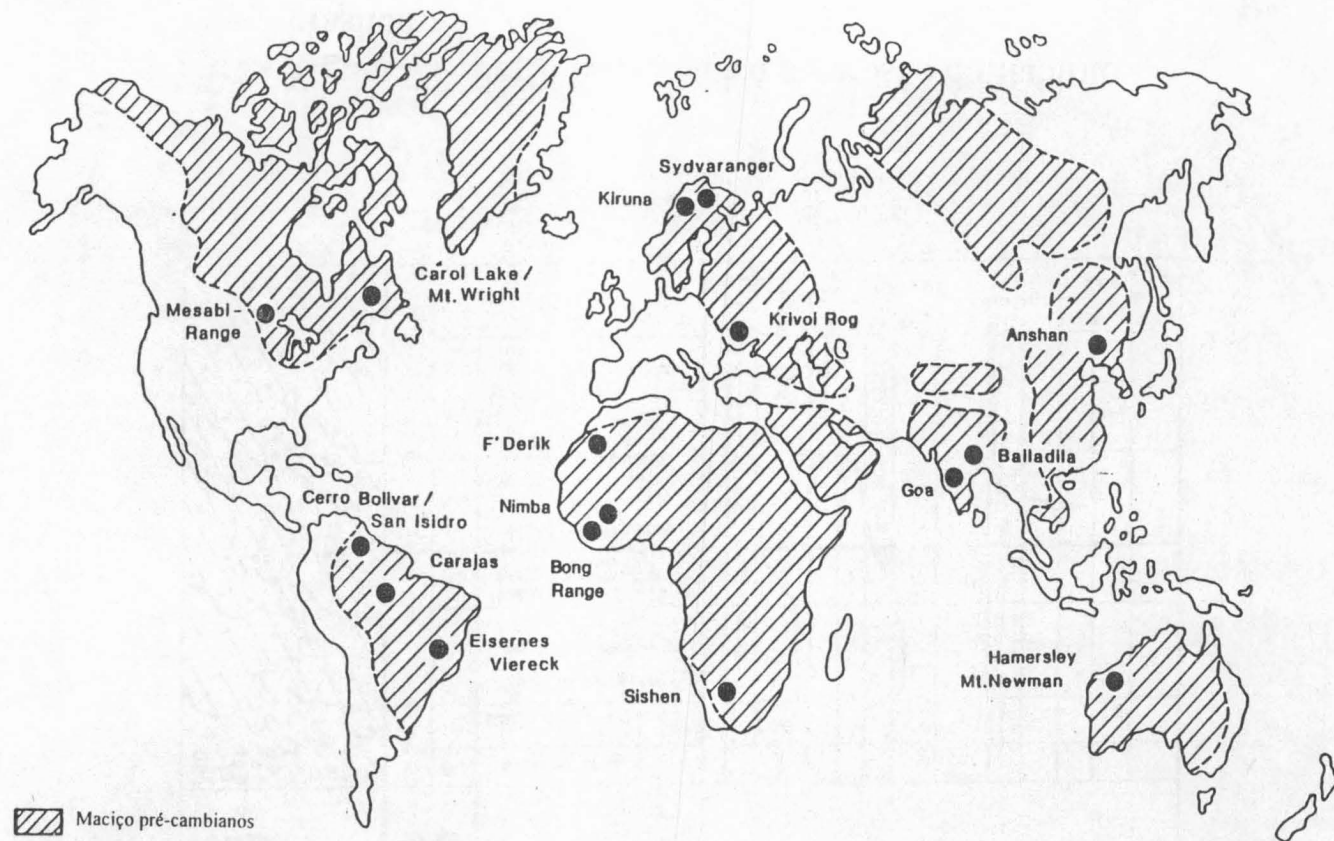


Figura 02- Mapa-mundi com os depósitos de minério de ferro pré-cambrianos



Figura 03- Perfil esquemático da erosão do Itabirito brasileiro

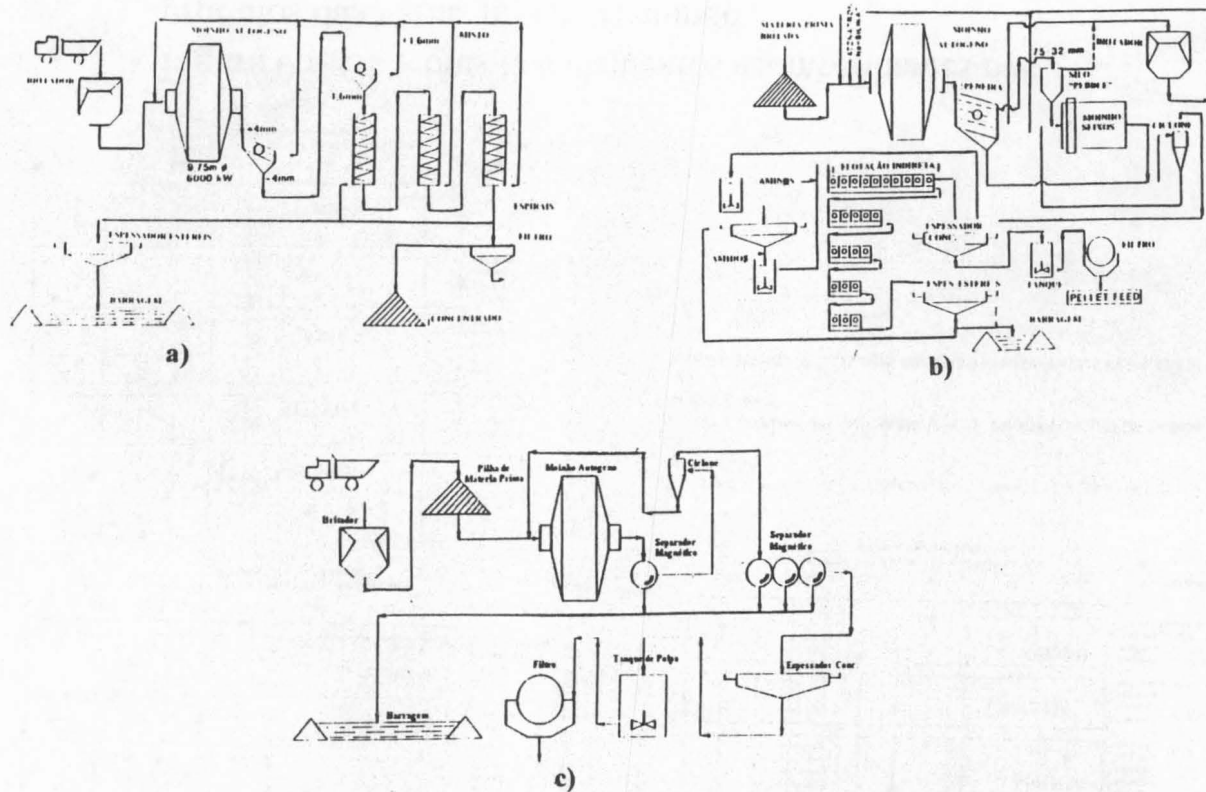
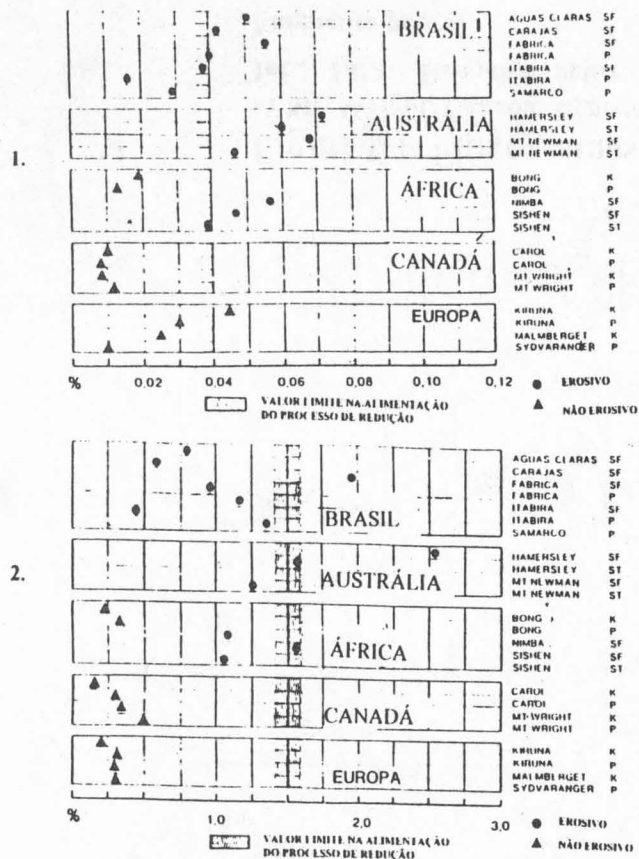


Figura 04- Fluxogramas das usinas das minas.

a) Mt. Wright, Canadá. Hematita pobre; b) Tilden, Cleveland Cliffs Inc., EUA. Hematita pobre; c) Hibtac, Cleveland Cliffs Inc. Magnetita pobre;



1. TEOR MÉDIO DE FÓSFORO NOS PRODUTOS IMPORTADOS PELA ALEMANHA

2. TEOR MÉDIO DE ALCALINOS NOS PRODUTOS IMPORTADOS PELA ALEMANHA

3. TEOR MÉDIO DE  $Al_2O_3$  NOS PRODUTOS IMPORTADOS PELA ALEMANHA

Figura 05- Os teores dos elementos acompanhantes nos produtos das várias minas no mundo.

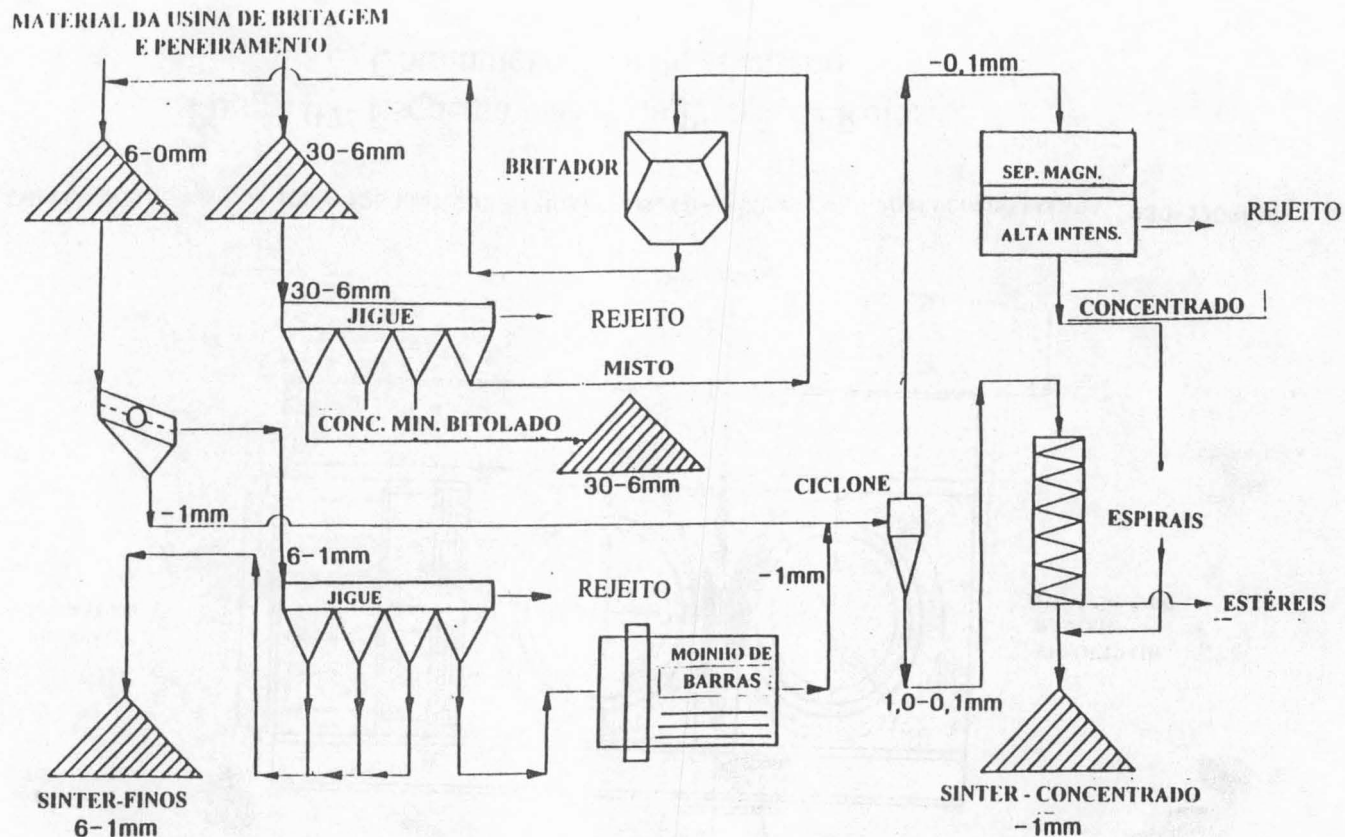
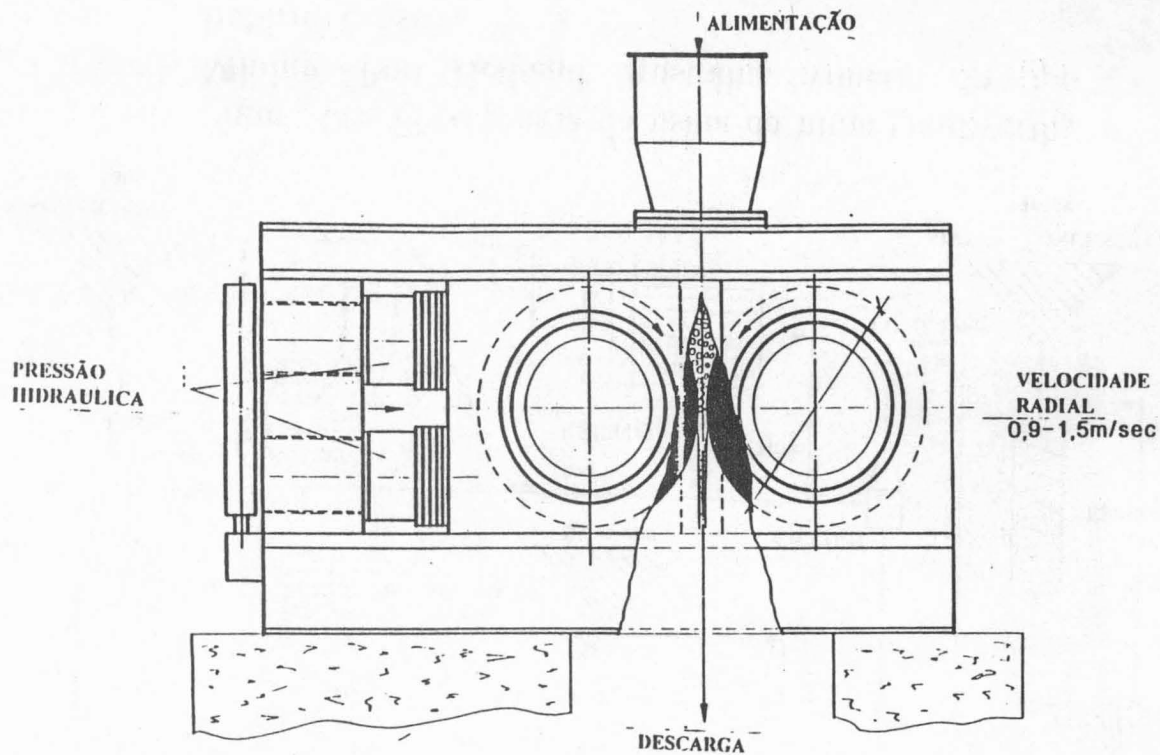


Figura 06- Fluxograma da usina da mina Goldworthy Mining, Port Hedland, Austrália. Minério do tipo Itabirito erosivo.



652

DIÂMETRO DOS ROLOS : 1000-1250mm LARGURA DOS ROLOS 260-1400mm ; POTÊNCIA INSTALADA : 230-1700KW

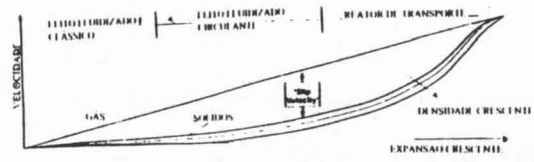
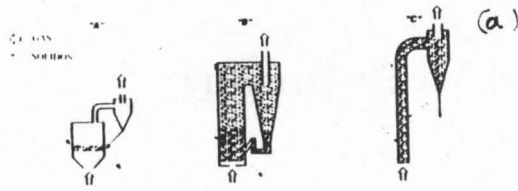
Figura 07- Esquema básico da Prensa de Rolos.  
Cominuição do leito adensado



Produto	Ferro Metálico		Ferro esponja		unidades
	Metal líquido /Ferro gusa		DRI /HBI		Carbeto de Ferro
Redutor					
Forma de Ferro	Coque	Carvão	Gás natural	Carvão	Gás natural
Lump Pellet Sinter	Alto Forno	COREX	MIDREX HYL III	COREX-DR SL / RN	
Finos	[TECNORED]	[FINEX] [Hismelt] [Romelt]	FINMET [CIRCORED]	[CIRCOFER]	Carbeto de Ferro

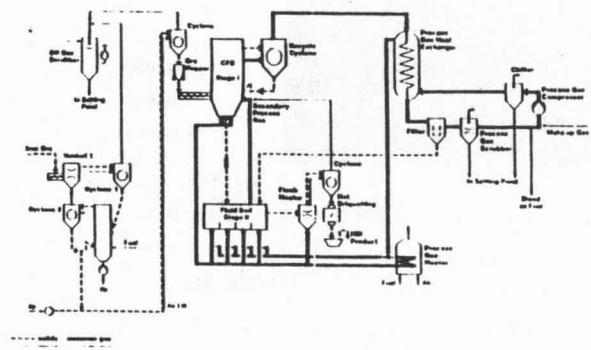
[..] Em fase de usina piloto

Figura 08- Tecnologia de substituição da sucata



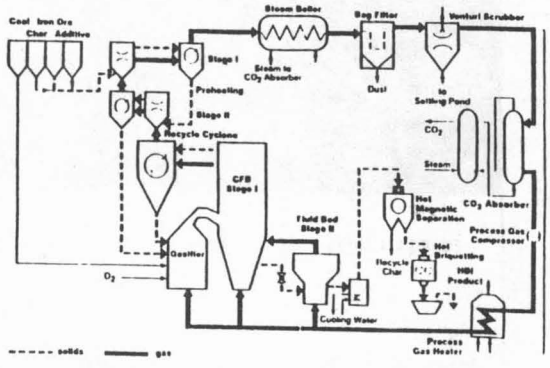
**Circored®**  
with Two-Stage CFB/FB Reactor System  
Ore Preheating and Reactor Section with Gas Circuit

(b)



**Circofer® Process**  
with Two-Stage CFB/FB Reactor System

(c)



654

Figura 09: a) Sistema de leito fluidizado em função da velocidade vertical  
 b) Fluxograma do processo CIRCORED, LURGI, gás combustível;  
 c) Fluxograma do processo CIRCOFER, LURGI, carvão combustível;