

**CURSO DE ESPECIALIZAÇÃO EM
ENGENHARIA DE RECURSOS MINERAIS – CEERMIN - UFMG**

MONOGRAFIA

Minério de ferro: desafios para as indústrias mineral e siderúrgica

Aluno: Flávio Ferreira Policarpo

Orientador: Prof^a Maria José Gazzi Salum

Junho 2012

Flávio Ferreira Policarpo

Minério de ferro: desafios para as indústrias mineral e siderúrgica

Monografia apresentada à
Universidade Federal de Minas
Gerais, como requisito parcial para
obtenção do título de Pós-Graduação
em Engenharia de Recursos Minerais.
Professora orientadora: Maria José Gazzi Salum.

Junho 2012

Sumário

1. INTRODUÇÃO	8
2. OBJETIVO	9
3. REVISÃO DA LITERATURA	10
3.1 - Minérios de ferro: conceito e aplicações	10
3.2. Especificações da indústria siderúrgica para a matéria prima minério de ferro ..	13
3.2.1. Evolução da disponibilidade e produção de <i>lump</i> , <i>sinter feed</i> e <i>pellet feed</i>	16
3.3. Avanços Tecnológicos da Mineração	16
3.3.1. Avanços nas operações de lavra	16
3.3.2. Avanços no Beneficiamento	19
3.4. Avanços na siderurgia em relação à absorção da matéria prima mineral.....	22
3.4.1. O processo de Sinterização	22
3.4.1.1. Matérias primas	27
3.4.1.2 – Mecanismo de sinterização	28
3.4.1.3 – Zonas de sinterização	28
3.4.2 - O processo de Pelotização	31
3.4.2.1 – Fases da pelotização	32
3.4.2.2. Processo de forno de cuba.....	35
3.4.2.3. Processo de forno de grelha móvel	36
3.4.2.4. Processo de grelha forno rotativo	36
3.5. Mineração de ferro e siderurgia – Os desafios para o futuro.....	37
3.5.1. Desafios Ambientais da Mineração	39
3.5.1.2. Restrições e Impeditivos Legais à Atividade Mineral	42
3.5.1.3. – Gestão Ambiental na Mineração Brasileira.....	45
3.5.1.3.1. Gestão dos Rejeitos da Mineração	47
3.5.1.4. Evolução de tecnologias ambientalmente favoráveis na mineração	49
3.5.1.5. Os Desafios Sociais da Mineração.....	51
3.5.2. Desafios da Siderurgia	52
3.5.2.1. Desafios da Pelotização.....	53
3.5.2.2. Desafios ambientais da indústria siderúrgica	53
4. SÍNTESE DOS RESULTADOS DA PESQUISA.....	60
5. CONCLUSÃO	63
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	64

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 3.1 - Fluxo de produção do aço (USIMINAS, 2010).....	13
Figura 3.2 - Produtos do minério de ferro (Curso de Mineração Básico – Vale).....	15
Figura 3.3 – Características granulométricas do minério de ferro e seus usos na siderurgia (Curso de Mineração Básico – Vale, 2009).....	15
Figura 3.4 - Evolução dos equipamentos de escavação e carregamento observando-se a tendência de aumento do porte	17
Figura 3.5 - Sínter	23
Figura 3.7 - Detalhe da ignição na máquina de sinterização (Curso de Mineração Básico – Vale, 2009)	25
Figura 3.8 - Esquema da máquina de sinterização (Curso de Mineração Básico – Vale, 2009)	26
Figura 3.9 - Frente de combustão (queima) na máquina de sinterização (Curso de Mineração Básico – Vale, 2009)	26
Figura 3.10 - Corte longitudinal do leito de sinterização (Castro, Figueira e Tavares, 1980)	29
Figura 3.11 - Corte transversal e perfil térmico de um leito de sinterização (AA' na figura 3.10), (Castro, Figueira e Tavares, 1980).....	29
Figura 3.12 - Pelotas	32
Figura 3.13 - Esquema de um disco pelletizador (Castro, Figueira e Tavares, 1980).....	34
Figura 3.16 - Processo de grelha forno rotativo (Castro, Figueira e Tavares, 1980).....	37
Figura 3.17 - Desenvolvimento da lavra de carvão (esquerdacentro) na Mina do Recreio, Rio Grande do Sul, processo de recuperação em andamento (direita e plano inferior) e área reflorestada (topo-esquerda)	41

RESUMO

Devido à crescente demanda por ferro nos últimos anos, a tendência de sua continuidade nos próximos anos e considerando que os países emergentes têm como meta melhorar suas infraestruturas básicas, faz-se necessário discutir a disponibilidade de matéria-prima para atender a essa demanda.

Considerando este fato, o objetivo principal deste trabalho é apresentar uma revisão da literatura sobre a evolução das características do minério de ferro produzido no Brasil, de como essas características foram absorvidas pela indústria siderúrgica, bem como as tendências para o futuro e seus desafios para uma produção sustentável.

A pesquisa realizada mostrou que, ao longo dos anos, o esgotamento das reservas de minério de alto teor em ferro e baixo nível de contaminantes levou ao uso de minérios cada vez mais pobres, de mineralogias mais complexas e com maiores porcentagens de finos, o que demandou diversas inovações tecnológicas para os seus beneficiamentos, com o objetivo de atender as especificações da indústria siderúrgica. Dentre essas inovações destaca-se o processo de aglomeração de finos de minérios que permitiram suas utilizações, antes impossível, nos fornos de redução direta: a sinterização e a pelletização.

As pesquisas mostraram também, que o aumento significativo da demanda mundial por minério de ferro, particularmente pela China, tende a se manter nas próximas décadas, o que significará lavar minérios cada vez mais pobres e com maior volume de finos, exigindo o desenvolvimento de novas tecnologias para a lavra e beneficiamento. A indústria siderúrgica também deverá participar desse desafio, inovando em seus processos diante de uma matéria prima que, mesmo sendo beneficiada sob novas tecnologias, guardará diferenças em relação à atual. Caso contrário, parte dessa matéria prima será descartada como rejeito, aumentando os níveis de impacto ambiental atuais.

Diante desse complexo cenário, conclui-se que o maior desafio para a cadeia produtiva do ferro está no desenvolvimento de tecnologias que permitam o aproveitamento siderúrgico de minérios de baixo teor, com sustentabilidade ambiental.

ABSTRACT

Due to the increased demand for iron ore in the recent years, considering that emerging countries are improving their basic infrastructure, it is necessary to discuss the availability of raw materials to meet this demand.

Considering these facts, this paper has as main objective to present a review of the literature on the evolution of exploitation of iron ore and steel industry processes, the future trends and technological challenges for sustainable production.

The research showed that over the years, the depletion of ore reserves of high iron content and low level of contaminants led to the use of increasingly poor ores of complex mineralogical and higher percentages of fines, which demanded several technological innovations to their processing, in order to meet the specifications of the steel industry. Among these innovations highlight the process of agglomeration of fine ores that allowed their use impossible before, the direct reduction furnaces, sintering and pelletizing.

The research showed that the demand for iron ore production will continue in the coming years, which will mean the exploitation of lower-grade and finer ores, requiring the development of new technologies of mining and mineral process. Also the steel industry should participate of this challenge, adapting its process to the new raw material, considering that even processed it will be different. Otherwise, part of the iron ore will be disposed as a reject, causing larger environmental impacts than the current.

Given this complex scenario, it is concluded that the greatest challenge to the productive chain of iron is in the development of technologies that allow the use of lower-grade ores in the steel industry, with environmental sustainability.

LISTA DE SÍMBOLOS

LTQ	Laminador de Tiras à Quente
LCG	Laminador de Chapas Grossas
BQ	Bobina Laminada à Quente
CFQ	Chapa Fina Laminada à Quente
CG	Chapa Grossa
PL/TCM	Linha de Laminação à Frio
BFH	Bobina <i>Full Hard</i>
BAF	Linha de Recozimento em Caixa
CAPL	Linha de Recozimento Contínuo
CFF	Chapa Fina Laminada à Frio
BF	Bobina Laminada à Frio

1. INTRODUÇÃO

Grande parte dos minerais presentes nas rochas tem grande utilidade no cotidiano de milhões de pessoas em todo o mundo. Deles são extraídas substâncias metálicas e não-metálicas, aplicadas pelo ser humano em diversas atividades: nas indústrias metalúrgica, farmacêutica, química e, também, na agroindústria e na construção civil. Em nosso dia-a-dia, o contato que existe com os materiais mostra a importância dos minerais na vida das pessoas.

Quando os minerais que compõem as rochas possuem elementos ou substâncias de valor econômico – após serem concentrados por uma variedade de processos naturais - temos o conceito de minério, dentre os quais o minério de ferro. Tanto na indústria mineral quanto na indústria siderúrgica o minério de ferro possui extrema importância e também vários desafios quanto à sua forma de utilização nos processos minero-metalúrgicos.

Devido à crescente demanda por ferro nos últimos anos e a tendência de sua continuidade nos próximos anos, considerando a meta dos países emergentes em melhorar suas infraestruturas básicas de moradia, transporte, etc; faz-se necessário discutir a disponibilidade de matéria prima para atender a essa demanda.

2. OBJETIVO

O objetivo deste trabalho é apresentar uma revisão da literatura sobre a evolução da produção de minério de ferro e sua relação com a indústria siderúrgica, bem como as tendências para o futuro e seus desafios.

3. REVISÃO DA LITERATURA

Neste item será apresentada uma revisão da literatura relacionando os conceitos e assuntos relevantes para a compreensão da monografia.

3.1 - Minérios de ferro: conceito e aplicações

Os principais depósitos brasileiros de minério de ferro são classificados como formações ferríferas do Proterozóico. São caracterizados por camadas alternadas de minerais de ferro com sílica na forma de *chert* ou cristalizada na forma de quartzo. Esses foram formados pela precipitação de ferro e silício em ambientes marítimos. Em seguida, ocorreu o enriquecimento desses corpos mineralizados por processos metamórficos ou intempéricos (SCHOBENHAUS & COELHO, 1986).

De acordo com ARAUJO & VIANA (2003) os minérios brasileiros apresentam-se sob a forma de minérios hematíticos compactos e friáveis e de itabiritos, geralmente friáveis. As principais espécies minerais de ferro presentes são hematita, goethita (limonita), magnetita e hematita martítica, enquanto que os principais minerais de ganga são quartzo, caolinita, gibbsita e outros silicatos portadores de alumínio.

Dois estados brasileiros respondem majoritariamente pela produção de ferro no país: Minas Gerais e Pará (QUARESMA, 2002).

No Pará, a formação ferrífera está inserida no grupo Grão-Pará, o qual compreende três formações geológicas, onde a intermediária, denominada Formação Carajás, detém as jazidas de minério de ferro. Essas jazidas de minérios de ferro são constituídas, essencialmente, de hematita friável, um produto de enriquecimento do protominério jaspelito, com a lixiviação preferencial da sílica, concentrando os óxidos de ferro, hematita, magnetita.

As reservas de minério de ferro de Carajás, estimadas em 18 bilhões de toneladas, das quais 6 bilhões de toneladas estão na Serra Norte e um bilhão de toneladas está na Serra Sul, tem um teor médio de 66% de ferro e baixo nível de contaminantes, o que não requer etapas complexas de beneficiamento para que sejam utilizados na indústria

siderúrgica. Basicamente etapas de britagem, classificação e desaguamento são suficientes para enquadrá-los nas especificações requeridas pela siderurgia (SAMPAIO ET AL., 2002).

Em Minas Gérias, as principais jazidas de minério de ferro concentram-se no chamado Quadrilátero Ferrífero.

O Quadrilátero Ferrífero é geologicamente constituído por rochas predominantemente Arqueanas e Proterozóicas, deformadas em distintas fases de dobramento e falhamento. A Formação Cauê é a unidade estratigráfica que contém os itabiritos que, devido à processos de enriquecimento hidrotermais, supergênicos ou erosivos, deram origem aos minérios de ferro (GUIMARÃES ET AL, 2002).

Os minérios de ferro do Quadrilátero Ferrífero podem ser agrupados em 3 grandes grupos (GUIMARÃES ET AL, 2002):

- **Hematitas:** formação ferrífera composta predominantemente por hematita e subordinadamente por magnetita e goethita, com estrutura maciça, bandada ou foliada e teores de ferro variando de 60 a 69 %. Quanto a gênese podem ser divididos em 2 tipos: 1) corpos de alto teor que podem ser encontrados em até grandes profundidades e que tem sua origem relacionada com o enriquecimento metassomático/hidrotermal dos itabiritos; 2) corpos formados por intensa lixiviação supergênia de itabiritos (carbonáticos ou silicosos), concentrando os óxidos e hidróxidos de ferro próximo a superfície;
- **Itabiritos:** itabiritos enriquecidos são aqueles que possuem formação ferrífera bandada, metamórfica, constituída essencialmente por quartzo e hematita e subordinadamente por goethita, magnetita e carbonatos. O minério itabirítico foi gerado pelo enriquecimento supergênico em ferro devido à lixiviação, por água meteórica, da sílica e carbonatos. O processo supergênico foi acompanhado de desagregação do itabirito transformando-o em um material frível e liberado, permitindo sua concentração industrial. Já os itabiritos compactos pouco enriquecidos, mas com baixos níveis de contaminantes;

- **Coberturas detríticas (cangas e rolados):** formações superficiais constituídas por blocos de hematita e itabirito, soltos ou cimentados por goethita.
 - Rolados: se formaram como produto da desagregação física das formações ferríferas em depósitos de talus e fluxo de detritos.
 - Cangas químicas e estruturais geradas por intensa goethitização *in situ* da formação ferrífera no nível bem próximo a superfície.

Em relação aos teores de ferro e contaminantes esses tipos de minério se dividem em minérios de alto e baixo teor de ferro. O grupo de alto teor apresenta um percentual de ferro total acima de 62% e baixos conteúdos de contaminantes, como SiO₂, Al₂O₃, CaO, MgO e outros elementos menores. A faixa do percentual de ferro dos minérios de baixo teor é de 32% a 62% e quantidades variadas de contaminantes.

No caso dos minérios essencialmente hematíticos, seus produtos finais, destinados à indústria siderúrgica, não demandam etapas complexas de beneficiamento, devido ao alto teor em ferro e baixo teor em contaminantes. Apenas etapas simples de britagem e classificação de tamanho são suficientes para suas adequações às especificações da indústria siderúrgica (SAMPAIO ET AL., 2008).

Em relação aos itabiritos, apenas aqueles mais enriquecidos, os itabiritos friáveis têm sido explorados. Para esses itabiritos, mesmo com menor teor em contaminantes e mais alto teor em ferro, quando comparados aos itabiritos compactos, são necessárias etapas mais complexas de beneficiamento para adequá-los às especificações químicas da indústria siderúrgica (SAMPAIO ET AL., 2008).

Considerando que a indústria metalúrgica é a mais importante consumidora final dos minérios de ferro e que, portanto, suas especificações influenciam diretamente o tipo de beneficiamento a que os minérios deverão se submeter, passa-se a discutir suas principais relações com esses minérios.

3.2. Especificações da indústria siderúrgica para a matéria prima minério de ferro

O minério de ferro é a matéria-prima básica da siderurgia, respondendo pelas unidades metálicas (Fe) de alimentação dos reatores de redução, como o alto forno e os módulos de redução direta convencionais. Processado nessas instalações, o minério dá origem ao ferro primário (gusa ou DRI¹) que, tratado nas aciarias, converte-se em aço.

De forma simplificada o processo consiste em alimentar o minério em um alto-forno, onde é aquecido a altas temperaturas. Por meio de reações do minério com gases redutores, o oxigênio é removido do ferro. O produto da reação, chamado ferro-gusa, já derretido, sai do alto-forno e é enviado para a etapa de aciaria, na qual é refinado. Dependendo do tipo de aço a ser fabricado, elementos de liga como, por exemplo, níquel, cromo ou vanádio podem ser adicionados para conferir propriedades especiais aos aços. Posteriormente, o aço é solidificado e conformado em chapas, vigas, arames, etc., muito usados nas construções de edifícios, nas peças de carro, nos eletrodomésticos ou, ainda, em uma grande variedade de objetos de uso diário. A figura 3.1 apresenta um fluxo do processo de produção do aço.

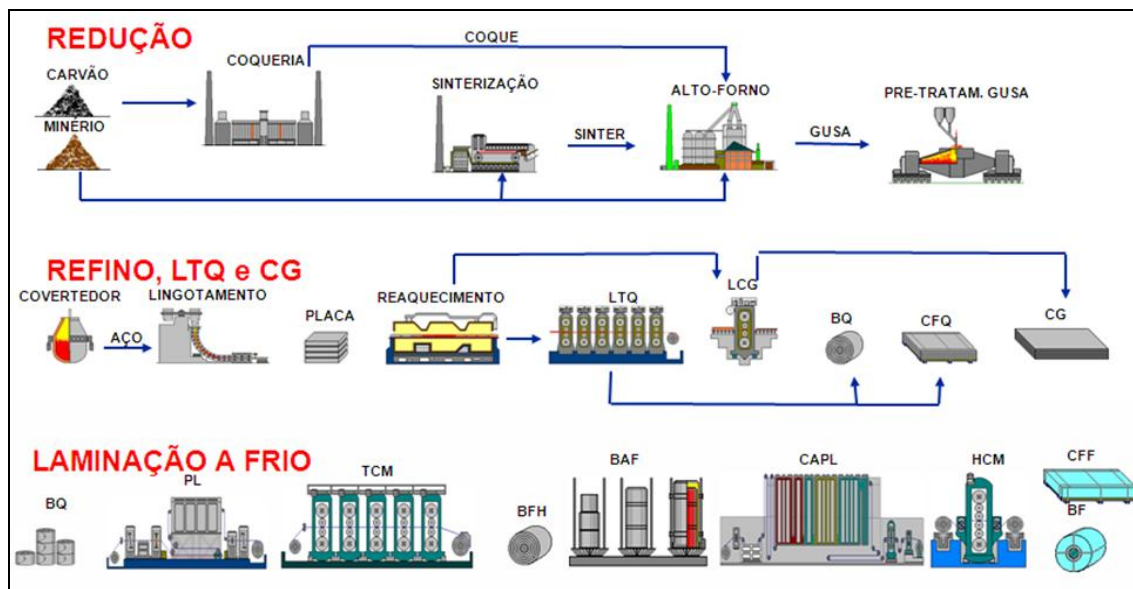


Figura 3.1 - Fluxo de produção do aço (USIMINAS, 2010)

¹ Direct-ferro reduzido (DRI), também chamado de ferro esponja, é produzido a partir de redução direta do minério de ferro por um gás redutor produzido a partir do gás natural ou do carvão. O gás de redução é uma mistura de hidrogênio (H₂) e monóxido de carbono (CO), que atua como agente redutor. Este processo de redução direta do minério de ferro, na forma sólida através da redução de gases é chamado de redução direta.

Os processos metalúrgicos, como se encontram hoje tecnologicamente instalados, demandam algumas especificações físicas e químicas dos minérios de ferro, sem as quais perdem em eficiência ou mesmo se inviabilizam.

O minério de ferro pode ser classificado como:

- Rico → 60 - 70% de Fe
- Médio → 50 - 60% de Fe
- Pobre → <50%

Algumas especificações químicas devem ser atendidas para uma melhor utilização dos concentrados do minério como matérias primas nas indústrias siderúrgicas. Seguem abaixo algumas dessas especificações:

Lump ore → 64 - 65% Fe e 4 - 5% Sílica

Sinter feed → 62 - 63% Fe e 5 - 6% Sílica

Pellet feed → 65 - 66% Fe e 2 - 3% Sílica

Além dessas especificações químicas, uma variável muito importante dos concentrados é a sua distribuição granulométrica desde que apenas os minérios com granulometria mais grosseira (entre 6 e 40 mm), os chamados granulados ou *lumps*, podem ser utilizados diretamente nos reatores de redução. Concentrados com granulometrias inferiores têm, necessariamente, que passar por um processo de aglomeração antes de serem alimentados nos fornos de redução.

Quando a faixa granulométrica do concentrado situa-se entre 5 a 50 mm a aglomeração ocorre pelo processo de sinterização e, portanto, esse tipo de concentrado recebe o nome de *sinter feed*. Já os concentrados com granulometrias entre 5 e 18 mm são aglomerados pelo processo de pelletização e são chamados de *pellet feed*.

A figura 3.2 apresenta a classificação dos produtos da mineração do ferro (concentrados) e suas aplicações na siderurgia e a figura 3.3 ilustra os produtos do minério de ferro mencionados anteriormente.

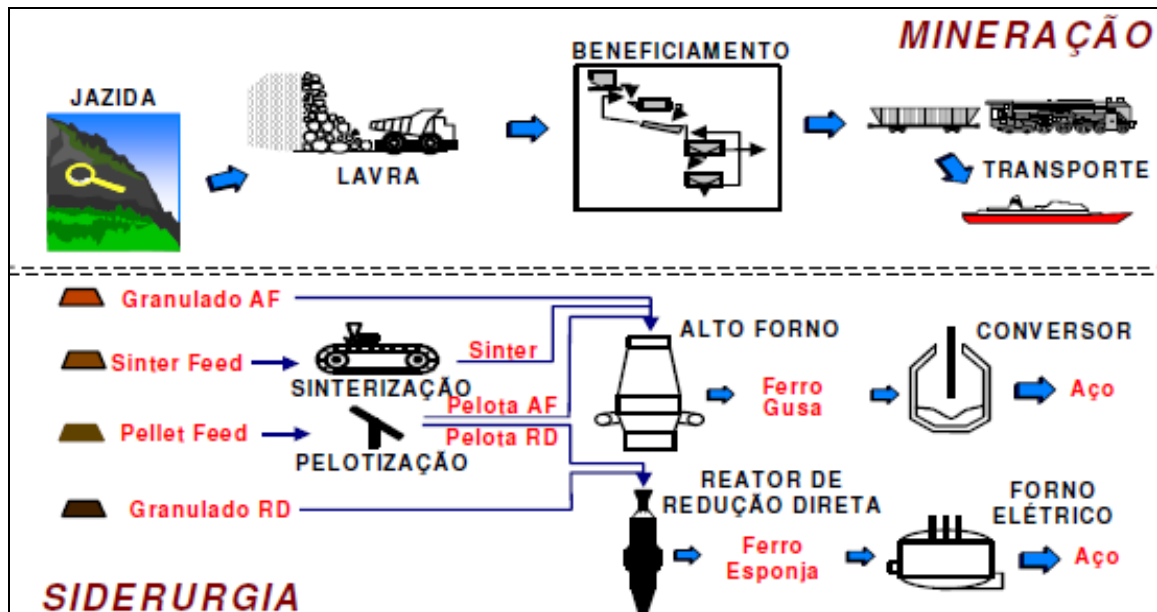


Figura 3.2 - Produtos do minério de ferro (Curso de Mineração Básico – Vale)



Figura 3.3 – Características granulométricas do minério de ferro e seus usos na siderurgia (Curso de Mineração Básico – Vale, 2009).

A partir dessa relação entre as características dos minérios de ferro e dos processos siderúrgicos, interessa analisar como evoluiu nos últimos anos a disponibilidade e produção dos minérios de granulometria mais grosseira (*lump*) e daqueles mais finos, que necessitam ser aglomerados antes de alimentarem os alto fornos.

Antes, porém, é importante ressaltar que além dos minérios de ferro, as sucatas de ferro e de aço são também matéria prima para a siderurgia, com utilização direta nos fornos elétricos a arco. Esse fato confere um importante fator de sustentabilidade ao setor. No entanto, o uso desses materiais tem um peso muito menor que o minério de ferro, respondendo por cerca de 30% do suprimento de unidades de ferro à siderurgia.

3.2.1. Evolução da disponibilidade e produção de *lump*, *sinter feed* e *pellet feed*

O tipo de minério de ferro ofertado no mercado foi variando ao longo do século XIX, devido à exaustão dos minérios de melhores qualidades, fazendo com que os dois segmentos - mineração e siderurgia - se adaptassem a uma nova realidade.

No início do século, a dificuldade de produzir somente minério tipo granulado (*Lump ore*) e de alto teor (ideais para uso direto nos altos-fornos) foi fator fundamental, por motivos estratégicos e econômicos, para o processamento de minério de granulometria mais fina e a concentração de minério de teores mais baixos, antes de serem introduzidos nos altos-fornos, demandando por novas tecnologias, como será discutido no próximo item.

3.3. Avanços Tecnológicos da Mineração

3.3.1. Avanços nas operações de lavra

Os principais avanços científicos e inovações tecnológicas na mineração, nos países de maior tradição mineira, estão relacionados com a intensa mecanização e automação das operações de lavra, tanto a céu aberto quanto em subsolo. O desmonte de rochas a céu aberto caminha para a adoção de grandes diâmetros de perfuração, diminuindo assim a quantidade de furação e o custo associado. Os explosivos do tipo *blends* tendem a predominar, sendo que o carregamento deverá ser efetivado a partir de caminhões com bombeamento do explosivo para os furos de detonação e com operação de um único homem. Este comandará o enchimento dos furos e a mescla de explosivos, essencialmente ANFO e emulsões, a partir dos quais se fará o explosivo do tipo *blend*. A adoção de detonadores eletrônicos fará com que a iniciação dos fogos seja feita com

maior precisão, melhorando, de um modo geral, a fragmentação e os problemas ambientais (ruído e vibração). Estudos estão sendo realizados para obtenção de dados sobre as características mecânicas do maciço a partir da perfuração. Informações, como dureza da rocha, poderão ser transmitidas *on-line* para o escritório de apoio, que poderá utilizá-las para otimização do plano de fogo.

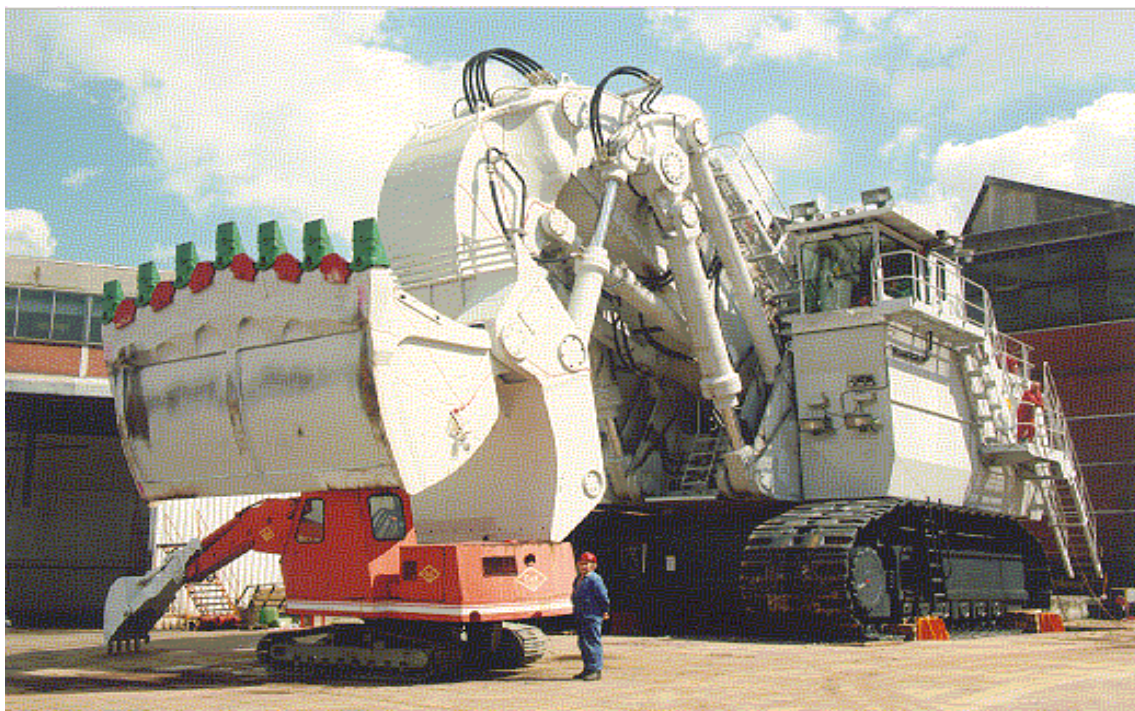


Figura 3.4 - Evolução dos equipamentos de escavação e carregamento observando-se a tendência de aumento do porte

Equipamentos de grande porte foram adotados em minas a céu aberto provocando os seguintes efeitos: redução da quantidade de caminhões, diminuição da mão-de-obra, aumento da produção e produtividade, acompanhado de uma significativa redução de custos, tornando esses países mais competitivos no mercado internacional (Figura 3.4). No Brasil, devido a dificuldades pontuais, mesmo em minas de grande médio porte, a adoção de caminhões de menor porte ou rodoviários adaptados tem sido uma prática usual. A tendência de terceirização de serviços no Brasil tem sido uma constante.

A utilização de GPS e pesagem tem agilizado imensamente as operações de carregamento e transporte. Em tempo real é possível conhecer a quantidade e qualidade do minério lavrado. Sistemas de *dispatching* direcionam os caminhões para as escavadeiras/carregadeiras otimizando a utilização dos equipamentos. No Brasil, esses

sistemas ainda não têm ampla utilização. Custos envolvidos na aquisição de *softwares* importados podem ser a principal causa de uma certa contenção na sua utilização. Na lavra subterrânea, a tendência é a mecanização e automação, via a adoção de eletrônica embarcada nos equipamentos de perfuração, carregamento e transporte, procurando reduzir os riscos, principalmente de carregamento nos realces. Estudos de mecânica de rochas tornam-se muito valiosos para garantir a segurança das aberturas subterrâneas. Nesse sentido, medidores de deformação/tensão poderão ser instalados enviando informações *on-line* para a equipe técnica, que poderá assim acompanhar o comportamento mecânico do maciço. O reforçamento do maciço é feito principalmente com parafusos de teto, cabos, concreto projetado e telas.

A utilização de mineradores contínuos também é uma tendência observada, buscando-se diminuir a utilização do desmonte de rochas com explosivos mesmo em rochas duras. A prática já é comum nas rochas moles, o que acarreta uma maior produção nas minas subterrâneas. Infelizmente, no Brasil, mesmo nas minas de carvão, onde a adoção de mineradores contínuos seria previsível, esse sistema não é utilizado. O monitoramento automático das condições ambientais relativas ao maciço rochoso e de ventilação não é muito empregado no momento, mas tende a se tornar uma prática comum nas minas em subsolo.

O planejamento de lavra baseado na modelagem dos atributos geometalúrgicos de um depósito está em pleno desenvolvimento, sustentado pela introdução de inúmeros softwares desenvolvidos essencialmente no exterior. A geoestatística assume importância vital nessa área. Diversos grupos atuam no exterior enfocando este tema para a mineração tradicional e no petróleo. No Brasil, poucos grupos dedicam-se a esta área de conhecimento. A evolução da mineração mundial busca uma total integração dos sistemas de mineração, utilizando sistemas de gerenciamento de mina que envolvem programas modulares, equipamentos GPS de alta precisão, equipamentos de *dispatch* e monitoramento *on-line* dos sistemas operacionais. Fundamental também é destacar os novos conceitos em vigor na mineração mundial, que incluem, fortemente, educação e treinamento das equipes mineiras, desde operadores até técnicos de nível superior. Mineiros educados e treinados implicam em melhorias nas operações mineiras, nas condições de segurança e no ambiente de trabalho.

Com a menor disponibilidade na natureza do minério granulado (*Lump ore*), algumas mineradoras vêm adotando novas técnicas para aproveitamento do minério fino do tipo *pellet feed*, de granulometria de até 0,15mm, praticamente uma poeira que precisa passar pelo processo de pelotização antes de ser lançada ao forno, conforme já mencionado.

Atualmente vários estudos estão concentrados na crescente mecanização e na exploração em camadas mais profundas, já que o minério na superfície é cada vez mais escasso. Algumas empresas também têm desenvolvido uma técnica para aproveitamento de materiais ultrafinos, sobras do processo da mineração que antes eram depositados em lagos artificiais. A idéia é desmistificar o conceito de que só é possível lavar minério uma única vez. Como isso seria possível o aproveitamento de grande parte dos rejeitos com o esgotamento das jazidas dos minérios nobres, antes que se comece a lavar os minérios de baixo teor, o que com certeza, acontecerá em um futuro próximo.

3.3.2. Avanços no Beneficiamento

A história registra que, 400 anos antes da Era Cristã, os egípcios já recuperavam ouro de depósitos aluvionares, usando processos gravíticos. O primeiro texto que se constituiu em instrumento de referência sobre os bens minerais (*De Re Metálica*) foi publicado em 1556 por Georges Agrícola. Neste, já há registro da utilização do moinho tipo pilão movido a água, concentração gravítica através de calha e concentração em leito pulsante obtido com o auxílio de peneira em forma de cesta (um jigge primitivo).

A partir do século XVIII, com a invenção da máquina a vapor, que se caracterizou como o início da revolução industrial, ocorreram inovações mais significativas na área de tratamento de minérios. Pela metade do século XIX, em 1864, o emprego do tratamento de minérios se limitava praticamente àqueles de ouro, cobre nativo e chumbo.

Os grandes desenvolvimentos na área de beneficiamento de minérios ocorreram no final do século XIX e início do século XX (Quadro 1.1), sendo a utilização industrial da flotação, na Austrália, em 1905, a inovação mais impactante. Os avanços que se seguiram se orientaram, do ponto de vista tecnológico, mais ao desenvolvimento de *design* de equipamentos maiores e mais produtivos ou eficientes (anos 40-70), à

otimização de processos por meio de automação e computação (anos 70-90), e à racionalização do uso de energia nos anos 70, com a crise de aumento súbito dos preços de petróleo.

Mais recentemente, com a crise de energia elétrica no Brasil, em 2001, houve um renovado interesse pela racionalização de seu uso. Apesar do grande esforço de pesquisa direcionado à melhor compreensão dos fenômenos atuantes nas operações de beneficiamento, houve relativamente poucos saltos tecnológicos como consequência deste esforço, verificando-se mais uma evolução incremental no desempenho dos processos.

A seguir será apresentado alguns dos mais importantes processos do beneficiamento do minério utilizados atualmente:

- **FRAGMENTAÇÃO** - É uma técnica de vital importância no processamento mineral. Um minério deve ser fragmentado até que os minerais úteis contidos sejam fisicamente liberados dos minerais indesejáveis. Às vezes, a redução de tamanho visa apenas à adequação às especificações granulométricas estabelecidas pelo mercado, como, por exemplo, a fragmentação de rochas como o granito ou calcário para a produção de brita. Em todos os casos, a fragmentação é uma operação que envolve elevado consumo energético e baixa eficiência operacional, representando, normalmente, o maior custo no tratamento de minérios. A fragmentação é quase sempre dividida em várias etapas, para minimizar seus custos e não fragmentar as partículas além do necessário.
- **CLASSIFICAÇÃO** – É o processo de separação de partículas por tamanho. A classificação opera, geralmente, junto com as etapas de fragmentação. A classificação de partículas controla os tamanhos que são gerados no processo de fragmentação e tem como objetivos principais:
 - Verificar se o tamanho das partículas do minério está dentro das especificações de mercado. Esse é um objetivo da classificação muito utilizado para os minerais de uso direto na indústria, como a brita e a areia para a construção civil;

- Verificar se a granulometria produzida nos equipamentos de fragmentação atingiu o tamanho no qual as partículas dos minerais de interesse (úteis) já se separaram fisicamente dos outros minerais que estão no minério.

Os equipamentos de classificação mais comuns são:

- Peneiras – utilizadas apenas para a classificação de partículas mais grosseiras, usualmente trabalham com os produtos da britagem. Podem operar a seco e a úmido;
- Classificadores mecânicos – operam com tamanho de partículas menores que as peneiras, mas são ineficientes para trabalhar com partículas muito finas (em média menores que 0,105 milímetro). Trabalham quase sempre a úmido.
Exemplo típico: classificador espiral ou parafuso sem fim;
- Ciclones – utilizados na faixa de tamanhos onde os classificadores mecânicos atuam, com a diferença que são muito eficientes para separarem partículas muito finas. Põem, também, operar a seco ou a úmido.
- **CONCENTRAÇÃO** - ocorre quando é preciso separar os minerais de interesse dos que não o são. Para que essa separação ocorra, é preciso que o ou os minerais de interesse não estejam fisicamente agregado aos que não são de interesse, daí a importância das etapas de fragmentação e classificação, que realizam e monitoram essa separação, respectivamente. A separação de minerais exige que haja uma diferença física ou físico-química entre o mineral de interesse e os demais e pode ser fácil ou muito complexa, dependendo do minério. Duas propriedades físicas são as mais utilizadas na separação ou concentração de minerais: diferença de densidade e diferença susceptibilidade magnética.

Quando não existe diferença de propriedade física entre os minerais que se que separar, utiliza-se de técnicas que tomam como base propriedades físico-químicas de superfície dos minerais. A técnica mais amplamente utilizada neste caso é a flotação. Não se pode

esquecer de mencionar que é possível, também, concentrar determinado bem mineral de um minério por seleção manual, comum, até hoje, em alguns garimpos

3.4. Avanços na siderurgia em relação à absorção da matéria prima mineral

Como visto anteriormente, o maior avanço na siderurgia se deu em torno do aproveitamento dos minérios de granulometria mais fina, por meio da sinterização e pelletização, cujos processos serão descritos a seguir.

3.4.1. O processo de Sinterização

No século XIX foram inventados alguns aparelhos metalúrgicos para recuperar os pós de alto-forno e os finos de britagem de minérios (Pb, Zn, etc.), por aglomeração à quente, ou sinterização. No final do século, surgiu o processo Greenwalt e em 1908 o processo Dwigth & Lloyd. O primeiro é intermitente e tem como unidade de produção, uma panela basculável com fundo de grelha e forno de ignição móvel; o segundo é contínuo, com uma esteira rolante para carga, fundo de grelha e forno de ignição fixo (Castro, Figueira e Tavares, 1980).

Basicamente a sinterização se desenvolve de maneira idêntica nos dois processos:

- a unidade de produção, panela ou esteira, é carregada intermitente ou continuamente com a mistura a sinterizar;
- a mistura contém, além do minério de ferro, dos fundentes e das adições, uma certa quantidade de combustível sólido e umidade;
- o combustível contido na mistura é “acendido” pelas chamas e calor gerado no forno de ignição, iniciando a combustão na superfície da mistura;
- o ar necessário à continuidade de combustão é succionado de cima para através da camada de mistura por um sistema de exaustores;

- a camada superficial em combustão é “transportada” para o fundo da panela (ou esteira) pelo fluxo de ar succionado através da mistura, constituindo-se na frente de combustão;

- quando a frente de combustão atinge as grelhas, todo o combustível da mistura deve ter sido queimado, gerando calor, vaporizando a água e calcinando os carbonatos, provocando uma semi-fusão e aglomerando todo o material carregado na panela/esteira;

- o aglomerado assim formado, em grandes blocos, é então britado e peneirado; a fração superior a 5 ou 6mm constitui o sínter (figura 3.5) para o alto-forno; a fração inferior é chamada “fino de retorno”.



Figura 3.5 - Sínter

A figura 3.6 representa os processos de produção do sinter.

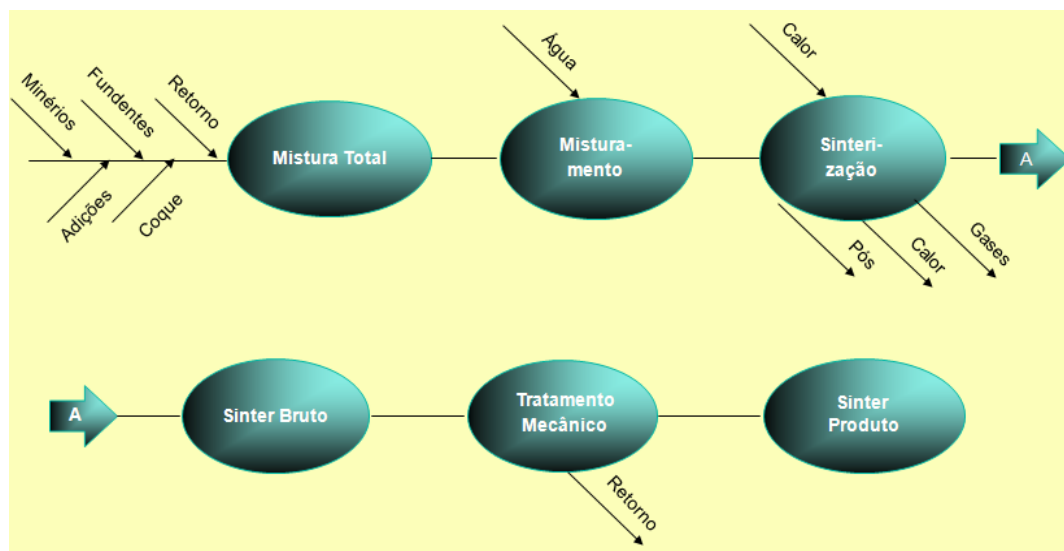


Figura 3.6 - Processo de produção do sinter

A tecnologia de sinterização entrou em operação no início do século XX e foi criada com o objetivo de aproveitar minérios finos – em quantidades crescentes no mundo naquela época – e resíduos industriais. Com o passar do tempo, o enfoque se alterou.

A sinterização atual visa elaborar um produto de altíssima qualidade para o alto-forno. Este produto, chamado sinter, é o constituinte majoritário dos grandes alto-fornos existentes no mundo (70 a 90% do total). Nesse processo são aglomerados finos de minério de ferro (granulometria entre 6,35 e 0,149mm) e fundentes (calcário, dolomita, serpentinito), possibilitando obter, por fusão parcial à temperatura da ordem de 1300°C, um produto granulado, poroso, com propriedades físicas, químicas e metalúrgicas ideais para o alto-forno (Castro, Figueira e Tavares, 1980).

Os minérios de ferro, fundentes, aditivos, resíduos reciclados e combustíveis sólidos (coque, carvão vegetal ou antracito) são devidamente misturados e umidificados (a umidade é importante para conferir resistência mecânica e permeabilidade à mistura) e carregados em uma esteira metálica contínua.

À medida que a mistura é conduzida pela esteira, uma série de complexas reações acontecem. A temperatura atinge patamares de 1300°C e, a partir daí, começa a fusão parcial das partículas que, posteriormente, após o resfriamento, permanecem ligadas por

uma matriz de escória. Para gerar o calor necessário, ar (succionado por um sistema de exaustão, passa através da mistura e queima o combustível adicionado. A reação se processa de cima para baixo e finaliza quando a frente de combustão atinge o fundo da camada de mistura.

O sinter produzido é britado, peneirado e classificado. A fração grossa é enviada para o alto-forno e a fração fina é reciclada no processo. Como o sinter possui um índice de degradação ao manuseio relativamente elevado, ele não é adequado para transportes a longa distância, principalmente em navios. Essa é uma das razões pelas quais as sinterizações estão instaladas ao lado dos altos-fornos. As figuras 3.7 e 3.8 representam o detalhe da ignição na máquina de sinterização e esquema da máquina de sinterização e, respectivamente.



Figura 3.7 - Detalhe da ignição na máquina de sinterização (Curso de Mineração Básico – Vale, 2009)

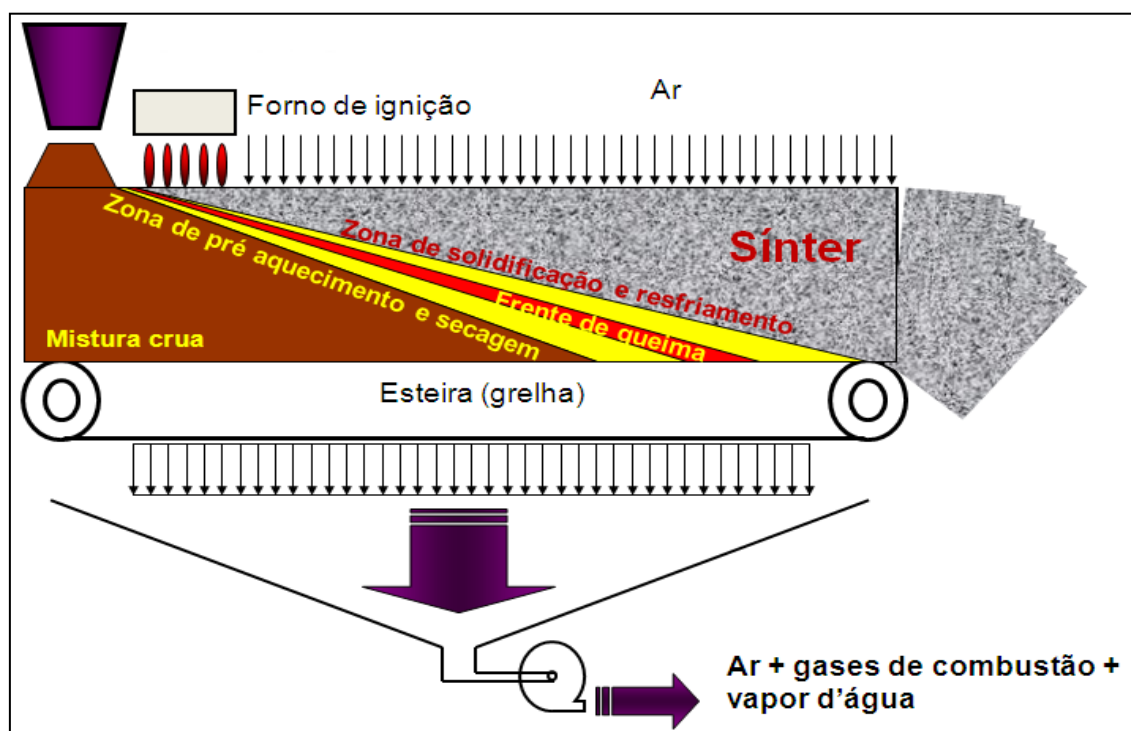


Figura 3.8 - Esquema da máquina de sinterização (Curso de Mineração Básico – Vale, 2009)

A figura 3.9 representa a frente de combustão (queima) na máquina de sinterização.



Figura 3.9 - Frente de combustão (queima) na máquina de sinterização (Curso de Mineração Básico – Vale, 2009)

O sinter é, portanto, o produto da aglomeração de minérios de ferro e outras matérias-primas complementares, pelo processo de sinterização, com a finalidade de ser consumido no alto-forno. Deve assim possuir as seguintes características:

- Alta porosidade e redutibilidade;
- Alta resistência mecânica à queda e abrasão;
- Granulometria e composição química controladas;
- Deve ser livre de elementos químicos indesejáveis no alto-forno;
- Seu custo de fabricação deve ser o mais baixo possível.

Os sínteres são genericamente classificados em:

Não auto-fundentes – quando é proveniente de minério hematítico ou magnetítico com ganga de sílica e alumina e à qual não se acrescenta nenhuma base (CaO ou MgO);

Auto-fundentes – o minério pode ser o mesmo do anterior, mas são acrescentadas algumas bases para correção de composição química; podem ser ácidos quando a relação CaO/SiO_2 é inferior a 1, ou básicos quando esta relação é superior a 1.

3.4.1.1. Matérias primas

As matérias-primas para o processo de sinterização são: finos de minérios de ferro, fundentes, combustíveis e adições.

O minério de ferro que contém características físicas e químicas para a produção de sinter é chamado *sinter feed*. As principais características físicas dos *sinter feed* podem ser consideradas a granulometria e o poder de aglomeração a frio. Outras existem também, como a densidade, a porosidade, o índice de crepitação, a forma do grão, etc.

Quanto às características químicas a preocupação maior para os minérios brasileiros é manter os teores de Al_2O_3 baixos e os teores de SiO_2 constantes.

Na sinterização os combustíveis se destinam, fundamentalmente, a fornecer calor necessário ao desenvolvimento das reações do processo e são dos tipos:

- a) Combustível gasoso – principalmente gás da coqueria, de alto-forno ou a mistura deles, usado nos fornos de ignição da sinterização, sua finalidade é fornecer o calor necessário para que o combustível sólido contido na mistura possa entrar em combustão e desencadear o processo;
- b) Combustível líquido – em geral óleo pesado, usado para ignição na sinterização;
- c) Combustível sólido – finos de coque, finos de carvão vegetal, homogeneamente distribuídos na mistura e cuja combustão é responsável pelo andamento do processo.

As adições visam introduzir elementos ou compostos inexistentes na carga ou mesmo aproveitar resíduos de outras unidades da usina.

3.4.1.2 – Mecanismo de sinterização

O mecanismo de sinterização é determinado pelo desenvolvimento de dois fenômenos distintos:

- o fenômeno físico de transferência de calor da camada superior para a inferior do leito, proporcionada pela sucção forçada de ar, criando uma frente térmica, cuja velocidade de propagação é proporcional à vazão de ar;

- o fenômeno químico de combustão do carbono contido na mistura que, produzindo calor, gera uma frente de reações químicas cuja evolução é função da reatividade e da quantidade de combustível, da umidade e composição química da mistura.

Esses dois fenômenos são inteiramente independentes, pois o combustível só entra em combustão, desencadeando o processo após a mistura atingir uma certa temperatura, determinada pela reatividade do próprio combustível.

3.4.1.3 – Zonas de sinterização

O fenômeno de transferência de calor e o fenômeno químico de combustão do carbono, ocorrendo simultaneamente, definem as “zonas de sinterização”. As figuras 3.10 e 3.11

mostram, para o processo contínuo, as zonas de sinterização e o desenvolvimento do processo.

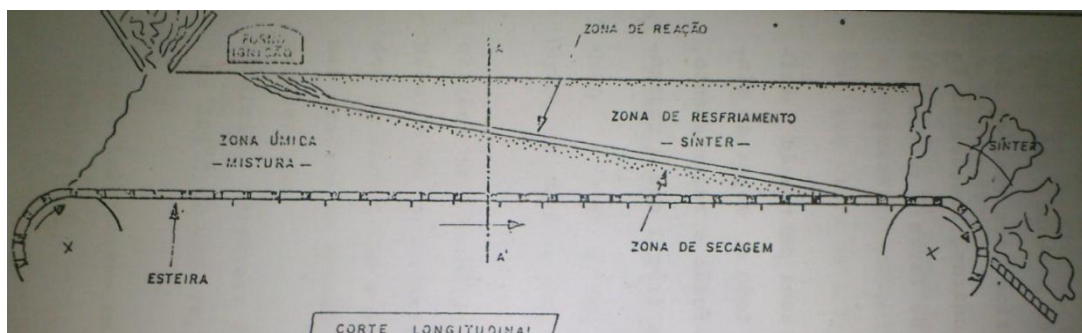


Figura 3.10 - Corte longitudinal do leito de sinterização (Castro, Figueira e Tavares, 1980)

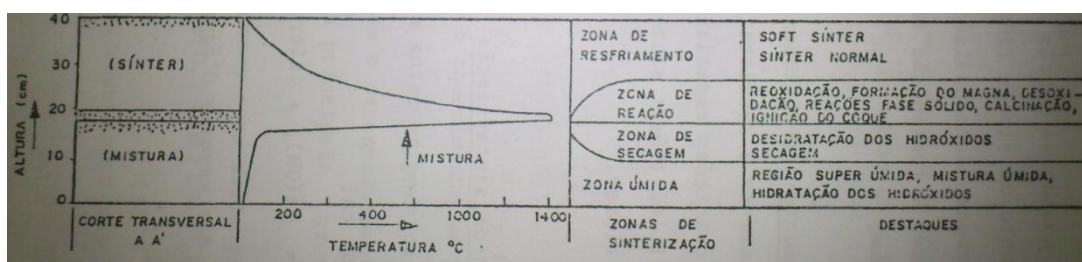


Figura 3.11 - Corte transversal e perfil térmico de um leito de sinterização (AA' na figura 3.10), (Castro, Figueira e Tavares, 1980).

A curva de temperatura mostra que a temperatura passa violentamente de 60°C para 1200°C/1400°C, desencadeando assim, todas as reações de sinterização.

Na região acima da zona de reação (combustão) o ar retira calor do sinter já formado, transportando-o para as regiões inferiores. Na zona de reação ocorrem quase todas as reações do processo, a uma temperatura superior a 1200°C, sendo que o gás e o material sólido trocam entre si as funções de receptor e fornecedor de calor, em curtas frações de segundo e de centímetro. Assim, abaixo da zona de combustão, os gases superaquecidos passam a fornecer calor para a mistura, que se aquece bruscamente da temperatura ambiente até mais de 1200°C.

As principais zonas de sinterização, juntamente com as reações químicas que acontecem nessas zonas, são:

- zona úmida: tem como limite superior a temperatura de 100°C e constitui a base do leito de mistura a sinterizar;

Hidratação da cal – $\text{CaO} + \text{H}_2\text{O} > \text{Ca(OH)}_2 + \text{calor}$

Condensação dos vapores d'água – $\text{H}_2\text{O(g)} > \text{H}_2\text{O(l)}$.

- zona de secagem: as temperaturas estão entre 100 e 500°C, onde ocorre primeiro a vaporização da umidade da mistura e depois a desidratação do hidróxido;

Vaporização da umidade – $\text{H}_2\text{O(l)} > \text{H}_2\text{O(g)}$

Desidratação do hidróxido de cálcio – $\text{Ca(OH)}_2 > \text{CaO} + \text{H}_2\text{O} - \text{Calor}$

- zona de reação: compreende toda a região térmica no aquecimento acima de 500°C, quando se inicia a ignição do carbono, até o início do resfriamento do sinter (900°C). As principais reações são: combustão do carbono, decomposição dos carbonatos, reações na fase sólida, redução e reoxidação dos óxidos de ferro e reações de formação do magma;

Combustão do carvão/coque: ocorre a partir de 500°C elevando a temperatura até perto de 1400°C formando CO e CO₂ na relação que varia de 1/3 a 1/4.

$\text{C} + \text{O}_2 > \text{CO}_2 + \text{calor}$

$\text{C} + \frac{1}{2} \text{O}_2 > \text{CO} + \text{calor}$

Decomposição dos carbonatos

$\text{CaCO}_3 > \text{CaO} + \text{CO}_2$

$\text{MgCO}_3 > \text{MgO} + \text{CO}_2$

Reações na fase sólida: durante o aquecimento da mistura na máquina de sinterizar, o contato entre as partículas de óxidos de ferro, CaO e SiO₂ favorece o desenvolvimento de algumas reações no estado sólido. Os principais produtos destas reações são:

- cálcio – ferritas: são formadas em atmosferas oxidantes a partir de 500°C
 - fayalitas – são formadas em atmosferas redutoras a partir de 1000°C
 - silicatos – dificilmente se formam na fase sólida
- reações de redução e reoxidação: se iniciam na zona superior de aquecimento e só terminam com o início de resfriamento;
- reações de formação de magma: são as que ocorrem na frente de combustão, onde os componentes da carga, após sofrerem condicionamento pelas reações na fase sólida, entram em estado de semi-fusão e depois se recristalizam mais ou menos rapidamente. Os silicatos são os produtos principais dessas reações.

- zona de resfriamento: imediatamente após a zona de reação inicia-se o resfriamento e recristalização de todo o magma de sinter, devido às condições especiais de semi-fusão e resfriamento, a camada superficial (“*soft sinter*”) é mais frágil que o restante do leito de sinter.

3.4.2 - O processo de Pelotização

A pelotização de minério começou nos Estados Unidos nos anos de 1950 devido à necessidade de aproveitamento dos taconitos – minérios muito pobres – com grau de liberação em faixas granulométricas muito finas, propiciando a geração de elevadas quantidades de finos em tamanhos inferiores àqueles utilizados na sinterização. única forma de viabilizar a utilização deste tipo de minério. Surgia, assim, a pelotização, para transformar em pelotas os minérios finos ou ultra-finos, ou seja, aquelas frações com granulometrias abaixo das consideradas adequadas para seguirem diretamente para os clientes. Portanto, a pelotização pode ser considerada como uma inovação tecnológica para o aproveitamento de minérios até então não aceitáveis para os padrões metalúrgicos. A figura 3.12 mostra as pelotas, produto do processo de pelotização.



Figura 3.12 - Pelotas

3.4.2.1 – Fases da pelletização

De uma forma bastante genérica, a pelletização pode ser visualizada como apresentando três fases principais: preparação da matéria prima, formação de pelotas cruas e processamento térmico das pelotas.

a) Preparação das matérias-primas

Essa fase poderá englobar as seguintes etapas, que não necessariamente, fazem parte do processo de pelletização:

- Concentração
- Homogeneização da matéria-prima
- Moagem
- Classificação
- Espessamento
- Homogeneização da polpa
- Filtragem

b) Formação das pelotas cruas

Essa fase é constituída de três etapas: uso de aditivos, formação de pelotas e classificação de pelotas.

b.1) Uso de aditivos

O objetivo principal é aumentar o poder de aglomeração a frio das partículas e os aditivos mais comumente usados são a bentonita, calcário e cal hidratada.

b.2) Formação das pelotas

A formação das pelotas cruas é influenciada por vários fatores como a forma das partículas, a distribuição granulométrica, a umidade, tipo de minério, tipo de aglomerante, etc. Ele é feito em tambores, discos ou cones de pelotização. A figura 3.13 mostra o esquema de um disco pelotizador.

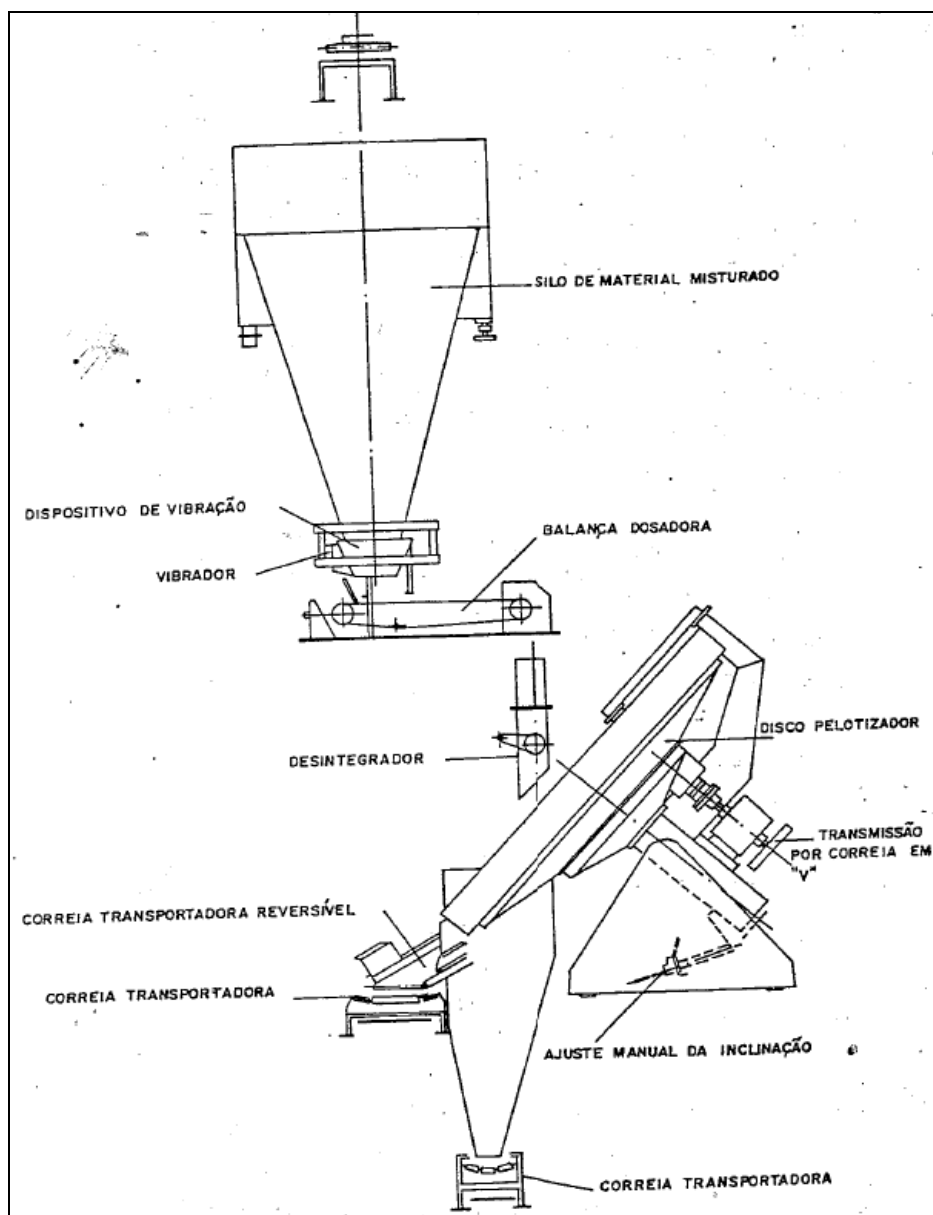


Figura 3.13 - Esquema de um disco pelotizador (Castro, Figueira e Tavares, 1980).

b.3) Classificação das pelotas cruas

Os aparelhos de pelotização trabalham conjugados ou não com uma peneira, cujo objetivo principal é selecionar os tamanhos de interesse das pelotas cruas.

c) Processamento térmico das pelotas cruas

Esta é a última fase do processo e visa enrijecer as pelotas cruas por meio de tratamento térmico adequado. Ela é subdividida nas etapas:

- Secagem: há a remoção parcial da água. Ocorre entre 25 e 200°C (secagem ascendente) e 200 a 600°C (secagem descendente).
- Pré-queima: há a remoção da água de cristalização. Ocorre entre 600 e 1350°C.
- Queima: acontece a consolidação das reações entre ferro e escória. Ocorre na temperatura de 1350°C.
- Pós-queima: acontece a homogeneização de calor. Ocorre entre 1350 e 1150°C.
- Resfriamento: acontece a recuperação de calor. Ocorre entre 1150 e 150°C.

3.4.2.2. Processo de forno de cuba

Os fornos são verticais de seção retangular, em torno de 1,8 m x 4,2 m e altura de 13,5 m (figura 3.14) e são empregados especificamente para minérios magnetíticos. A produção é de cerca de 50t/h.

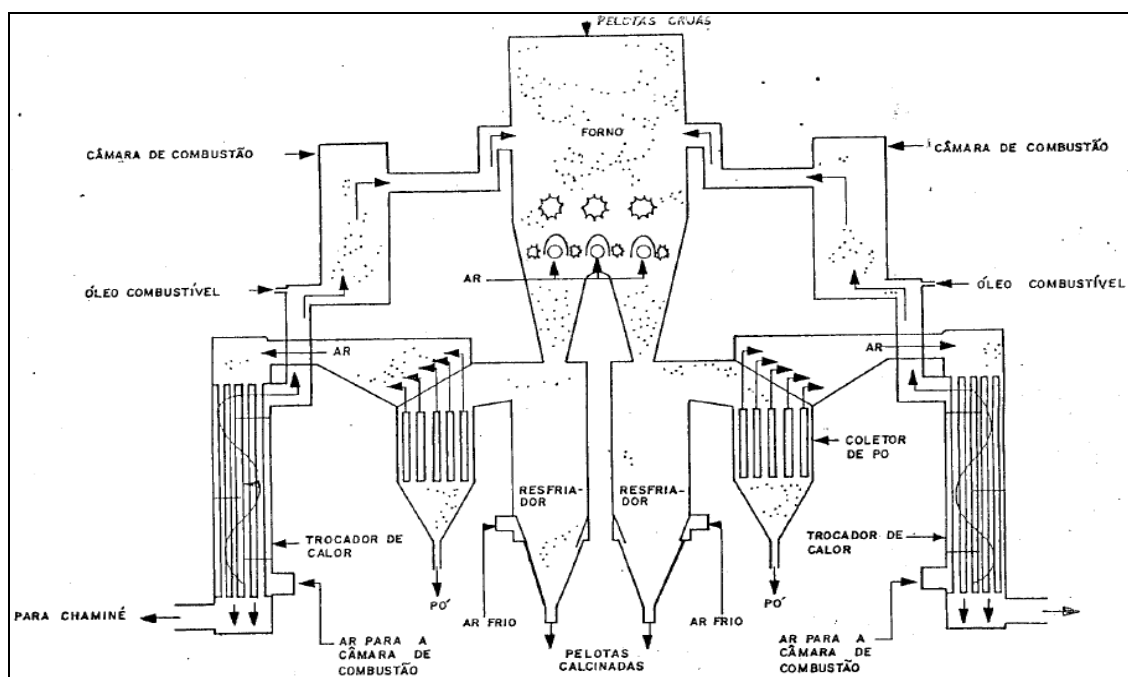


Figura 3.14 - Forno de Cuba para pelotização (Castro, Figueira e Tavares, 1980)

3.4.2.3. Processo de forno de grelha móvel

Esse forno é usado para qualquer tipo de minério. As grelhas têm uma área útil de aproximadamente 450m² (3,5m x 130m) e seu esquema é mostrado na figura 3.15.

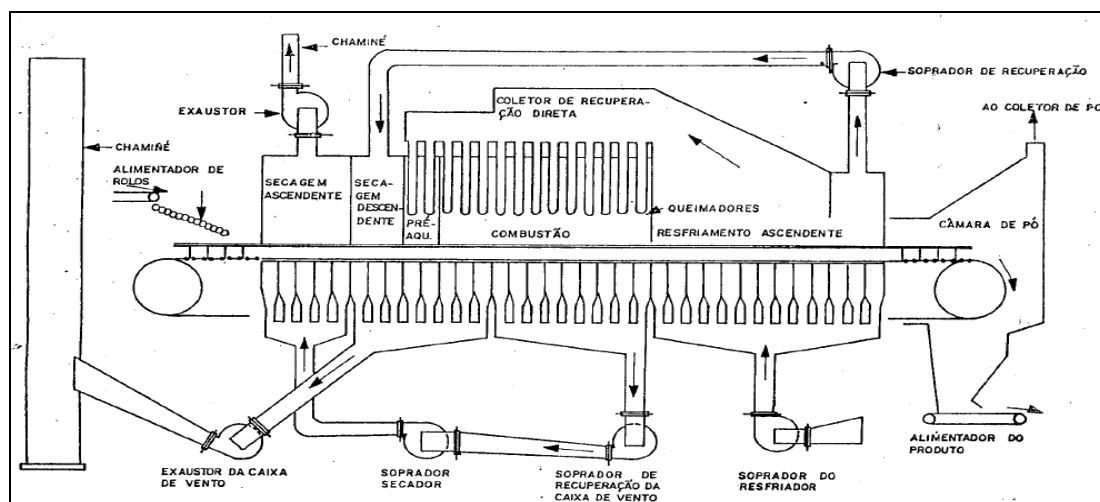


Figura 3.15 - Forno de grelha móvel para pelotização (Castro, Figueira e Tavares, 1980).

3.4.2.4. Processo de grelha forno rotativo

É o processo mais recente. Essencialmente compreende uma grelha móvel, um forno rotativo e um resfriador circular rotativo como mostra a figura 3.16. Na grelha móvel (4,6 m x 53,5 m) são realizados a secagem e o pré-aquecimento da carga. Da grelha, a carga é transferida para o forno rotativo (diâmetro de 4 a 6,5 m e comprimento de 36 a 50m). Este ponto é considerado crítico uma vez que há possibilidade do esborroamento parcial da carga pela queda da grelha ao forno. O tratamento térmico recebido pela carga é bastante uniforme, uma vez que cada pelota tem a possibilidade de atingir as temperaturas do processo, devido ao revolvimento contínuo.

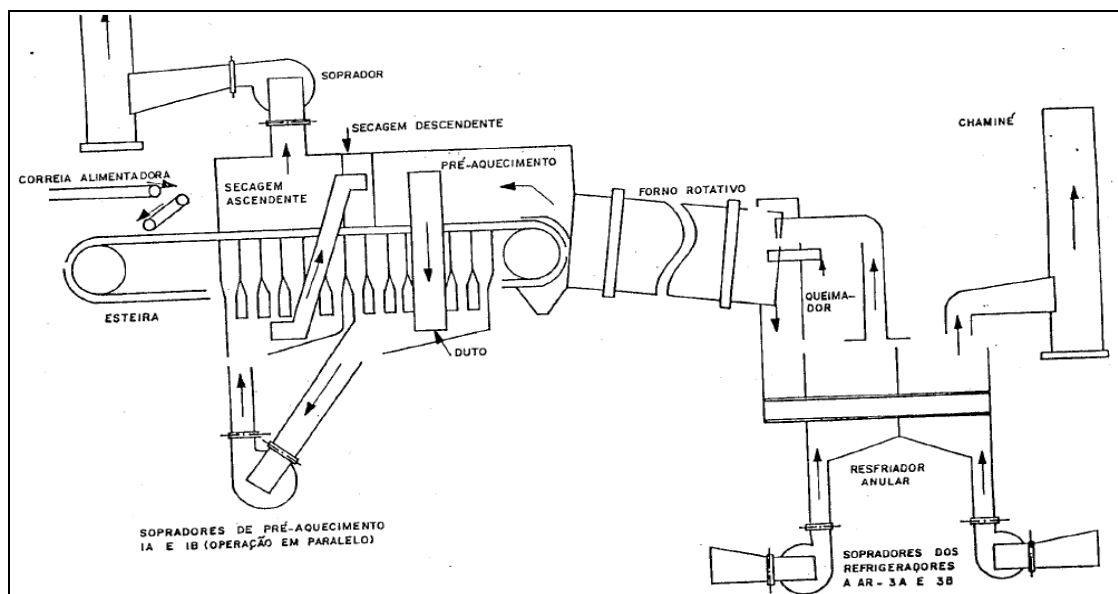


Figura 3.16 - Processo de grelha forno rotativo (Castro, Figueira e Tavares, 1980)

3.5. Mineração de ferro e siderurgia – Os desafios para o futuro

Dados compilados por Machado e Teixeira (2005) mostram que, no período de 1975 a 1999, a produção dos principais metais e recursos energéticos cresceu a taxas anuais entre 0,5% (ferro) e 3,4% (cobre), situando-se em 2,9% para o alumínio. A partir de 2000, impulsionada pela demanda chinesa, a produção mundial de recursos minerais cresceu ainda mais, fato que vêm ocorrendo ainda nos dias de hoje.

A produção estimada de minério de ferro, considerando o consumo interno e dos países importadores da oferta brasileira, e tomando como referência a participação nas exportações, poderá alcançar 585 Mt, em 2015, 795 Mt, em 2022, e 1.098 Mt, em 2030. Com base na taxa de crescimento do consumo nacional, a demanda interna será de 157 Mt, em 2015, 213 Mt, em 2022, e atingirá 301 Mt em 2030; tal demanda deverá ser atendida plenamente pela produção prevista para os respectivos anos. Para as pelotas, considerou-se que a atual percentagem (10%) da produção consumida internamente pelas siderúrgicas integradas prevalecerá até 2015, passando a 15%, em 2022, e 20%, em 2030, em razão da gradual diminuição de granulados na produção brasileira de minério de ferro, especialmente na região Sudeste.

A tabela 3.1 apresenta as projeções de demandas de alguns bens minerais para os anos de 2015, 2022 e 2030, tanto para o mercado interno como para mercado externo.

Tabela 3.1 - Previsão de produção, importação, exportação e consumo de minérios ferrosos 2015 /2022/ 2030

Minérios Ferrosos		Minérios Ferrosos	2008	2015	15/08	2022	22/15	2030	30/22
Ferro	Produção	Mt	351	585	7,6%	795	4,5%	1.098	4,1%
	Importação	Mt	0	0	0	0	0	0	0
	Exportação	Mt	231	428	9,2%	582	4,5%	797	4,0%
	C. Aparente	Mt	120	157	3,9%	213	4,5%	301	4,4%
Pelotas	Produção	Mt	55	66	2,6%	87	4,0%	119	4,0%
	Importação	Mt	0	0	-	0	-	0	-
	Exportação	Mt	50	60	2,6%	74	3,0%	95	3,2%
	C. Aparente	Mt	5,0	6,0	3,0%	13	11,3%	24	8,0%
Manganês	Produção	Mt	3,21	4,31	4,3%	5,80	4,3%	8,15	4,3%
	Importação	Mt	0,12	0,17	5,1%	0,24	5,1%	0,36	5,1%
	Exportação	Mt	2,0	2,6	3,8%	3,37	3,8%	4,54	3,8%
	C. Aparente	Mt	1,33	1,88	5,1%	2,67	5,1%	3,97	5,1%
Nióbio (Nb ₂ O ₃ contido)	Produção	kt	61,0	83	4,5%	113	4,5%	161	4,5%
	Importação	kt	0	0	-	0	-	0	-
	Exportação	kt	0	0	-	0	-	0	-
	C. Aparente	kt	61,0	83,0	4,5%	113	4,5%	161	4,5%
Cromo (Cr ₂ O ₃ contido)	Produção	kt	300	422	5,0%	594	5,0%	879	5,0%
	Importação	kt	12,6	17,8	5,1%	25,3	5,1%	37,6	5,1%
	Exportação	kt	24,4	31,7	3,8%	41,1	3,8%	55,6	3,8%
	C. Aparente	kt	288	408	5,1%	578	5,1%	861	5,1%

Fonte: DNPM. Projeção: Secretaria Executiva do PNM-2030.

Sobre o consumo aparente de minério de ferro: Aço – para a projeção do consumo de minério de ferro utilizou-se a projeção de produção de aço bruto, considerando que 75% do aço serão produzidos em usinas integradas (e 25% em aciarias elétricas, que utilizam sucata e gusa como insumos), assim, multiplicando-se a produção projetada de aço bruto por 0,75 e por 1,6, que se refere à relação minério/gusa considerada para essas usinas. Ferro-gusa – dos guseiros independentes, a demanda de minério foi determinada pela relação minério/gusa de 1,7. Pelota – tomou-se a relação minério/pelota igual a 1,0.

Considerando essa projeção de demanda para os próximos anos e o fato dos bens minerais serem recursos naturais não renováveis, é inevitável o esgotamento das reservas de minérios de mais alto teor e, portanto, de mais fácil beneficiamento e menor custo operacional, obrigando os mineradores a substituí-los por outros, menos nobres, para atender a essa demanda.

Considerado o contexto atual do desenvolvimento tecnológico na mineração, o aproveitamento desses minérios mais pobres implicará em um maior consumo de energia e água, maior movimentação de materiais estéreis e maior volume de rejeitos, portanto, com maior potencial de impacto ambiental.

Assim, o maior desafio para o segmento mineral não se atém ao desenvolvimento de novas rotas tecnológicas para beneficiar minérios pobres e com maior conteúdo de finos, mas em como fazê-lo sem aumentar os impactos ambientais.

A legislação ambiental brasileira é considerada por especialistas como uma das mais consistentes e exigentes do mundo e a atividade mineral é abrangida por ela de forma, muitas vezes particularizada. Em outras palavras, existem situações onde a legislação ambiental é destinada à atividade mineral.

Além das cobranças por redução de impactos ambientais, a atividade mineral tem, nos últimos anos, sido cobrada por suas contribuições sociais. Em outras palavras, o peso da produção mineral na balança comercial brasileira (aproximadamente 118%), não tem sido mais a justificativa única para a sua existência.

Também a indústria siderúrgica tem sido avaliada e cobrada em relação aos seus impactos ambientais, em especial pela emissão de gases efeito estufa. A participação do Brasil nas metas para redução global desses gases na Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas, realizada em Copenhague, em 2009, acirrou ainda mais essa questão.

No contexto das questões aqui levantadas, faz-se importante rever em maior detalhe quais são as condicionantes socioambientais para a mineração e para a siderurgia, com vistas à uma visão mais clara dos desafios que lhes serão impostos nos próximos anos.

3.5.1. Desafios Ambientais da Mineração

A mineração tem sido vista como um dos grandes causadores de problemas ao meio ambiente. A imagem de que a lavra destrói o ambiente, promovendo desmatamento, alterações topográficas, erosão e poluição dos rios, ar e solo, foi transmitida nas últimas

décadas e influenciou tremendamente a opinião pública a esse respeito, tanto no Brasil quanto no exterior. Como consequência, os órgãos ambientais passaram a fazer uma fiscalização rigorosa sobre as empresas de mineração, situação bastante diferente, por exemplo, do comportamento dos mesmos órgãos frente a poluidores tradicionais, como agricultura e prefeituras municipais.

As restrições foram de tal ordem que, em muitos países, praticamente inviabilizaram a atividade de mineração. A Europa foi duramente atingida e hoje poucos países ainda têm mineração significativa. Na Austrália muitas áreas foram isoladas como reservas ecológicas onerando grandes reservas de bens minerais, o mesmo ocorrendo nos EUA. Essa visão distorcida da mineração e de questões de políticas de governo, aliada à incompetência de técnicos que estão vinculados às instituições de fiscalização do meio ambiente, pode comprometer o desenvolvimento da mineração. Por exemplo, no governo do período 1997-2000, no Rio Grande do Sul, a fundação de proteção ambiental (FEPAM) expediu um mínimo de novas Licenças de Operação (uma para lavra de água mineral e uma para lavra de depósito de argila). Um grande investimento para lavar areias ilmeníticas no litoral gaúcho, em uma região completamente despovoada e inóspita, foi abandonado por problemas com o Ministério Público, que inviabilizou o projeto a partir dos possíveis problemas ambientais que poderiam advir da sua implantação.

Desde a metade da década de 80, a situação vem sendo modificada paulatinamente e, hoje em dia, as empresas de mineração têm praticado atividades de lavra com os devidos cuidados ao meio ambiente. A maioria das empresas em atividade dispõe de Estudos de Impacto Ambiental e Planos de Controle Ambiental que têm permitido uma minimização dos impactos ao meio ambiente. Grandes empresas têm praticado uma forte política ambiental, sendo destaque inclusive no exterior.

Na Região Sul a mineração de carvão deixou um legado comprometedor, principalmente no estado de Santa Catarina, com geração de drenagem ácida e destruição da paisagem, influenciando uma grande área superficial. As empresas foram autuadas pelo poder público e hoje estão tentando recuperar os danos causados no passado, além de executarem suas operações seguindo as diretrizes estabelecidas pelas fundações de controle ambiental. No entanto, no Rio Grande do Sul, as empresas de

mineração de carvão são modelo na recuperação das áreas degradadas, estabelecendo novos paradigmas nessa área (Figura 3.17).



Figura 3.17 - Desenvolvimento da lavra de carvão (esquerdacentro) na Mina do Recreio, Rio Grande do Sul, processo de recuperação em andamento (direita e plano inferior) e área reflorestada (topo-esquerda)

Embora a legislação brasileira contemple a obrigação da empresa de mineração apresentar o Plano de Recuperação de Áreas Degradadas (PRAD), junto com o EIA-RIMA, esta exigência não contempla de forma sistêmica a recuperação socioeconômica e ambiental prevista num plano de fechamento de mina. No Plano de Aproveitamento Econômico (PAE) exigido pelo DNPM para a concessão de lavra é obrigatória a apresentação de um plano de fechamento de mina.

Um dos maiores passivos ambientais da mineração brasileira situa-se no sul do Estado de Santa Catarina, devido ao histórico da mineração de carvão. Durante mais de um século, a mineração de carvão despejou rejeitos ricos em pirita nas bacias dos rios Tubarão, Urussanga e Araranguá, produzindo a acidificação das águas. Em 1993, o Ministério Público Federal promoveu ação civil pública contra empresas mineradoras e o poder público, com o objetivo de que recuperassem os danos provocados contra o meio ambiente. Em 2007, a União foi condenada pelo Superior Tribunal de Justiça (STJ) a recuperar área degradada no sul de Santa Catarina, juntamente com as mineradoras que causaram dano ao meio ambiente. A União representada pelo MME,

MMA e Advocacia Geral da União (AGU), juntamente com as mineradoras, têm executado ações de recuperação ambiental na região da bacia carbonífera.

As atividades garimpeiras, de um modo geral, ajudaram na propagação de uma imagem desalentadora da mineração em relação a preservação do meio ambiente. Muitas vezes a questão social se superpôs aos aspectos de preservação do meio ambiente e essa situação serviu de argumentos a favor dos ambientalistas contra a mineração.

Embora os impactos ambientais sejam significativos e apresentem particularidades para cada setor da mineração, a recuperação e readequação das áreas lavradas podem ser efetivadas. Os resultados muitas vezes são significativos, integrando as áreas lavradas ao meio ambiente e retornando as mesmas para outras atividades econômicas (Figura 3.18).



Figura 3.18 - Área de antiga mina de carvão na região de Butiá, Rio Grande do Sul, recuperada e devolvida aos proprietários do solo

3.5.1.2. Restrições e Impeditivos Legais à Atividade Mineral

Sob o ponto de vista legal é preciso separar o que é fator impeditivo para a atividade mineral e o que é fator restritivo. São exemplos de fatores impeditivos, a localização de atividades minerais em:

- Área indígena - todas as categorias de unidades de conservação de proteção integral e Reserva Extrativista, embora de uso sustentável;
- Remanescente florestal de Mata Atlântica primária;
- Áreas de Preservação Permanente (APP) de nascente para os minerais: areia, saibro, cascalho e argila;
- Dunas

Quanto às restrições para as atividades minerais, a legislação ambiental contempla diversas situações, entre as quais, aquela que mais vem afetando a produção de minério de ferro no país: a mineração em áreas com presença de cavidades naturais subterrâneas.

Os órgãos federais, em particular, o MME (Ministério de Minas e Energia) e o Ministério do Meio Ambiente (MMA) vêm empreendendo esforços no sentido de estabelecer uma agenda comum quanto à criação de novas unidades de conservação, licenciamento ambiental e outros tópicos relativos à mineração e meio ambiente. É senso comum que a preservação ambiental deve ser considerada parte integrante do processo de desenvolvimento, uma vez que o desenvolvimento sustentável só pode ser alcançado a partir da integração da dimensão ambiental ao desenvolvimento econômico e social.

A Lei nº 9.985/2000, que criou o Sistema Nacional de Unidades de Conservação (SNUC), proíbe expressamente a atividade mineral nas Unidades de Conservação (UCs) de proteção integral e prevê regras para a pesquisa e lavra nas unidades de uso sustentável. As UCs de uso sustentável têm como objetivo compatibilizar a conservação da natureza com o uso sustentável de parcela dos seus recursos naturais. No entanto, apesar de ser de uso sustentável, a atividade mineral é expressamente proibida na Reserva Extrativista (Resex), e motivo de questionamento jurídico em outras categorias. O zoneamento e as regras para uso da área e dos recursos naturais, fundamentado nos objetivos gerais da UC criada, são estabelecidos em seu Plano de Manejo (PM). O zoneamento define o que se deve preservar e o que e como se pode produzir, podendo ser reservadas zonas de proteção integral, mesmo nas UCs de Uso Sustentável. De acordo com a legislação, sem o Plano de Manejo nenhuma atividade poderá ser

desenvolvida na UC. Decorre, entretanto, que a mesma legislação estabelece o prazo de até 5 anos para que o Ministério do Meio Ambiente elabore o plano de manejo e não prevê nenhum tipo de penalidade para o não cumprimento desse prazo. Esse tempo entre a criação da UC e a elaboração do seu Plano de Manejo, em geral maior que 5 anos, onde nenhuma atividade pode se desenvolver, não é compatível com a dinâmica do setor produtivo em geral, e tem sido razão de grandes conflitos.

Quanto aos conflitos entre as atividades minerais em áreas com a existência de cavidades naturais subterrâneas, eles foram abrandados com a edição do Decreto nº 6.640 de 2008 mas ainda apresenta grandes problemas de execução prática para o licenciamento ambiental de atividades minerárias.

O Decreto nº 99.556 de 1990 proibia qualquer interferência negativa irreversível nas cavidades naturais subterrâneas, independentemente da sua relevância. Com a edição do Decreto 6.640 as cavidades passaram a ser classificadas em 4 níveis de relevância: máximo, alto, médio e baixo, não sendo permitida, sob qualquer hipótese, o impacto em cavidades de máxima relevância. Para as cavidades de alta e média relevância é permitido o impacto irreversível sob determinadas condicionantes ambientais, não havendo condicionantes para o impacto em cavidades de baixo grau de relevância.

O Decreto 6.640/2008 limitou-se a estabelecer os atributos que classificam uma cavidade como de relevância máxima e delegou ao Ministério do Meio Ambiente (MMA) estabelecer a metodologia para a classificação dos demais graus de relevância. Em agosto de 2009 o MMA publicou a Instrução Normativa nº 02 (IN 02/2009) com a metodologia de classificação dos graus de relevância alto, médio e baixo das cavidades naturais subterrâneas.

Os estudos para classificação do grau de relevância das cavidades que seriam razão de impacto pela atividade mineral incluem a análise de dezenas de atributos, entre físicos e bióticos, além de histórico-culturais. O tempo mínimo para esses estudos é de cerca de 1 ano, estipulado para a observação da fauna cavernícola em, no mínimo, duas estações: seca e chuvosa.

Para o caso específico do minério de ferro, o fato do Decreto 6.640/2008 e, em especial, a IN 02/2009, terem estabelecido metodologias de enquadramento nos diferentes graus de relevância com base na comparação entre o atributo da cavidade em estudo com o de outras cavidades, em duas escalas de observação (local e regional), tem dificultado a análise de relevância, tendo em vista o pouco conhecimento acumulado sobre cavidades de litologia ferrífera. Quando o atributo em estudo é a fauna cavernícola essa situação se torna ainda mais complexa.

A medida da dificuldade de exequibilidade da IN 02/2009 é dada pelo número de licenciamentos ambientais obtidos desde a sua edição em agosto de 2009: dentre dezenas de projetos, de diferentes mineradoras, apenas 1 (uma) licença ambiental foi concedida até o presente momento.

Quanto ao impedimento da mineração em terras indígenas, destaca-se o significado sob o ponto de vista territorial dessas áreas: 25% da Amazônia Legal e 12% do território nacional. Entretanto, esse impeditivo não é definitivo, uma vez que a Constituição Federal de 1988, no § 3º, do art. 231, prevê a pesquisa e a lavra das riquezas minerais em terras indígenas, após aprovação pelo Congresso Nacional, de uma regulamentação deste artigo. No entanto, até hoje, passados mais de 20 anos, não foi aprovada a lei que regulamenta o referido artigo.

3.5.1.3. – Gestão Ambiental na Mineração Brasileira

Em pouco mais de vinte anos, a gestão ambiental na mineração brasileira evoluiu significativamente. O grande propulsor foi a lei, que se tornou progressivamente mais rígida, como consequência da crescente importância que a proteção ambiental foi alcançando na sociedade, que não só fez avançar as exigências como também impediu retrocessos (Silva-Sánchez, 2000). A aplicação da lei também evoluiu de maneira notável, pois muitas empresas, grandes e pequenas, notaram essa evolução ao sofrerem procedimentos investigatórios ou serem alvos de ações civis públicas impetradas pelo Ministério Público. De modo equivalente ao de países mais avançados, a gestão ambiental nas empresas brasileiras também avançou devido a outras razões, como as demandas de mercado, mas sua força é observada quase que exclusivamente entre as empresas mais ativas na exportação. A eventual demanda de clientes por certificações e a necessidade de fazer provisões contábeis para recuperação de áreas degradadas e

fechamento de minas, imposta por instituições financeiras e pela regulamentação do mercado de ações norte americano, são as duas mais visíveis manifestações das forças de mercado.

A contribuição representada pelas forças de mercado e algumas iniciativas voluntárias das empresas, foram as demandas impostas pela legislação aquelas que realmente fizeram avançar a gestão ambiental, o que, também ocorreu no Canadá (Sánchez, 1998), país considerado líder nessa matéria. Em comparação com Canadá e Austrália, o outro país que lidera tendências ambientais na mineração, as principais empresas brasileiras ainda lançam mão de poucas iniciativas voluntárias, mas, em contrapartida, enfrentam demandas administrativas pouco comuns nesses países, como obrigatoriamente de compensação ambiental por danos causados por novos projetos ou mesmo como condição para a continuidade do funcionamento de empreendimentos existentes.

Naturalmente, o perfil diversificado e díspar da mineração no Brasil e das empresas que se dedicam a esta atividade, tem reflexos na gestão ambiental. A função ambiental já é plenamente reconhecida nas empresas bem organizadas, e todas elas contam com profissionais especializados em seus quadros ou dispõem permanentemente de serviços de consultoria nesse campo, fornecidos por empresas especializadas. Por outro lado, grande número de pequenas empresas ainda atua à margem ou nos limites da lei, mas isto não é, evidentemente, exclusividade do setor mineral.

Se um marco inicial para comparação do comportamento e do desempenho da indústria mineira for estabelecido em meados da década de 1970, quando surgiram no Brasil as primeiras exigências legais de controle de poluição, então o quadro atual é radicalmente distinto: as minas dispõem de licenças ambientais que lhes estabelecem obrigações particulares, têm planos para recuperar as áreas degradadas e seus dirigentes estão sujeitos a sanções penais em caso de descumprimento da lei; estudos de impacto ambiental, diagnósticos e uma série de outros estudos foram feitos para a maioria delas e, à parte alguns problemas localizados ou específicos, há conhecimento e tecnologias disseminados para prevenir riscos e danos ambientais e para recuperar áreas degradadas ou remediar áreas contaminadas.

No entanto, em três décadas, o volume de bens minerais produzidos foi multiplicado várias vezes. Por conseqüência, o volume de estéreis movimentados, a quantidade de

rejeitos produzidos e a extensão das áreas perturbadas também cresceram. Mais do que isso, a expansão da mineração requereu novas infra-estruturas (principalmente para transporte) e induziu outras atividades de transformação mineral, cujos impactos se somam e se acumulam àqueles do passado.

Outros avanços poderiam ser mencionados mas, pode-se perceber que há uma tendência mundial de melhoria da ecoeficiência, ou seja, a obtenção de resultados econômicos em paralelo à obtenção de ganhos ambientais, tendência observada em muitas indústrias e que também se verifica no setor mineral.

Outro ponto relevante é que, se há avanços notáveis no planejamento de novas minas e na gestão ambiental dos empreendimentos em funcionamento, ainda há um longo caminho a percorrer no tratamento das questões socioambientais associadas à mineração, em especial o fechamento de minas, como será visto posteriormente.

Dentre as questões mencionadas de gestão ambiental na mineração, aquela que tem sido o seu principal foco de atenção nos últimos anos é a gestão sobre os seus resíduos, em particular seus rejeitos.

3.5.1.3.1. Gestão dos Rejeitos da Mineração

A disposição dos rejeitos da mineração é tema que vem recorrentemente sendo discutido pela sociedade, em geral.

O aumento significativo da produção de minério de ferro nos últimos anos, com tendência a ter continuidade, quando associado à exploração de reservas de minério de mais baixo teor, com conseqüente aumento do volume de rejeitos, oferece perspectivas ainda maiores de acirramento dessa discussão.

A disposição dos rejeitos de mineração se dá sob duas formas distintas: pilhas de rejeitos ou barragens de rejeito. A disposição em uma ou outra forma depende, basicamente, da granulometria dos rejeitos: grossos em pilhas e finos nas bacias de decantação.

Existem normas específicas do Departamento Nacional da Produção Mineral (DNPM), autarquia ligada ao Ministério de Minas e Energia, responsável pela gestão dos recursos minerais, para a disposição dos rejeitos da mineração, tanto em pilhas quanto em bacias de decantação.

As pilhas de rejeito, por exemplo, devem ter configurações que lhes assegure estabilidade e devem ser sempre re-vegetadas, preferencialmente com espécies nativas. Quanto à barragem de rejeitos, elas devem ser permanentemente monitoradas para evitar possíveis rompimentos. O rompimento de barragens de rejeitos com grande acúmulo de lama de minérios é razão de grande preocupação para os mineradores e para a própria sociedade do entorno. Os impactos sobre a fauna e flora ou mesmo sobre a vida humana devido ao rompimento de uma barragem de rejeitos podem ser consideráveis e por isso, mesmo após a desativação da atividade mineira, o seu monitoramento continua a ser de responsabilidade do minerador. Atualmente, as técnicas de controle e monitoramento de barragens de rejeitos de mineração estão bastante avançadas e esta é uma área do conhecimento que vem se especializando cada vez mais.

De qualquer forma, as barragens de rejeito imobilizam parte do território ocupado por uma atividade de mineração, mesmo após o encerramento da atividade, dificultando que outras atividades sejam ali desenvolvidas. Para o caso específico dos minérios de ferro, devido ao volume da produção, esses territórios podem ser significativos, principalmente quando a pressão por uso e ocupação é grande, como é o caso, por exemplo, do Quadrilátero Ferrífero, em Minas Gerais.

No caso específico do minério de ferro, por razões ambientais e de gestão territorial, bem como econômicas, há vários estudos em andamento de recuperação e uso dos rejeitos da mineração. São exemplos de estudos em andamento:

- uso dos rejeitos mais grosseiros, contendo altas concentrações de quartzo na pavimentação de estradas ou mesmo em concretos;
- uso dos rejeitos, inclusive os mais finos, depositados nas bacias de decantação, para o preenchimento das cavas das minerações a céu aberto;

- recuperação do ferro contido nos rejeitos visando suas comercializações.

O fato dos rejeitos dos minérios conterem, ainda, os minerais de interesse econômico é bem comum e está associado à ineficiência dos processos de concentração. Há, entretanto, que se diferenciar a ineficiência natural, pré-estabelecida, para qualquer processo produtivo, e a ineficiência consentida. Neste último caso, a ineficiência se deve a poucos investimentos em melhoria dos processos. Matéria prima abundante, relação custo/benefício baixa e legislação ambiental menos exigente, são razões que, no passado, levaram os mineradores a primar menos pela eficiência dos processos produtivos. Hoje, essa não é mais uma situação aceitável. Razões ambientais e demandas da sociedade sobre, por exemplo, a alocação de rejeitos, pode até mesmo inviabilizar economicamente um projeto mineiro.

3.5.1.4. Evolução de tecnologias ambientalmente favoráveis na mineração

O setor mineral desenvolveu, adaptou e aplicou novas tecnologias que têm proporcionado ganhos ambientais. São exemplos:

- Disseminação e consolidação de métodos de disposição segura de rejeitos em bacias formadas por barragens, porém observa-se uma série de incidentes e de acidentes.
- Disposição de rejeitos em pilhas ou em bacias de retenção formadas por diques perimetrais, sem barramento de drenagens naturais.
- Uso de técnicas de desmonte de rocha por explosivos, com controle furo a furo e mapeamento da face das bancadas.
- Eliminação do emprego de cordel detonante para reduzir sobrepressão acústica, técnica atualmente empregada em várias pedreiras.
- Inovações na britagem de rocha em pedreiras (britador de impacto de eixo vertical), que permitem a produção de areia artificial e a conseqüente redução da quantidade de rejeitos produzidos (finos de pedreiras).

- Melhoria nos reagentes de flotação, aumentando a recuperação de diversos minérios.

- Crescimento no uso de flotação em colunas que, por serem mais seletivas, permitem maior recuperação de finos e redução do volume de rejeitos.

- Diversas melhorias em processos de tratamento de minerais, aumentando a recuperação de minério e reduzindo o volume de rejeitos, como no caso dos equipamentos de separação magnética de alto gradiente para beneficiamento de caulim.

- Melhoria da eficiência energética em operações de tratamento, a exemplo do emprego de prensas de rolos (*high pressure grinding rolls*), substituindo equipamentos de cominuição, com vantagens e menor consumo de energia, e as moagens autógenas e semi-autógenas.

- Valorização de certos rejeitos, a exemplo do corretivo agrícola produzido com rejeito calcítico do beneficiamento de minérios sulfetados de metais básicos e dos finos de pedreiras, empregados na fabricação de artefatos de concreto.

- Valorização de alguns resíduos do processamento industrial de matérias-primas minerais, como cinzas de usinas termelétricas a carvão, empregadas na fabricação de cimento, e escórias de altos-fornos, empregadas em pavimentação e na fabricação de cimento. A transformação desses resíduos em co-produtos dessas indústrias reduz a demanda por bens minerais. Há um vasto potencial para inovação tecnológica neste campo, como exemplificado por pesquisas desenvolvidas pelo Centro de Tecnologia Mineral (CETEM) visando o emprego de cinzas de termelétricas para cobertura de rejeitos geradores de ácidos em minas de carvão.

- Desenvolvimento de tecnologias de reciclagem de resíduos de construção e demolição, reduzindo o ritmo de crescimento de produção de agregados.

- Reciclagem de produtos industrializados à base de matérias-primas minerais metálicas e não-metálicas, como nos casos bem conhecidos do alumínio e do vidro.

3.5.1.5. Os Desafios Sociais da Mineração

O quadro legal e o aparato administrativo existente foram montados para equacionar os problemas ambientais decorrentes da abertura e do funcionamento de minas e demais atividades, mas muito pouco foi feito para tratar da situação incontornável de que minas são exauridas e indústrias ficam obsoletas e fecham (Sánchez, 2001). A desativação ambientalmente segura e socialmente responsável de minas e instalações conexas demanda planejamento concatenado com o planejamento do projeto, em paralelo a uma cuidadosa planificação de substituição econômica da atividade mineral após o encerramento das suas atividades, elementos ainda virtualmente ausentes no setor mineral brasileiro.

Para êxito do fechamento de mina e subsequente revitalização e destinação do uso da área minerada é fundamental que o processo ocorra desde o início da pesquisa mineral, tendo continuidade até a exaustão das reservas. Este processo deve ser viabilizado com a participação da comunidade e das autoridades locais no desenvolvimento de todas as ações. O marco legal para o fechamento de mina no Brasil atualmente está embasado na Constituição Federal de 1988, em seu art. 225, § 2º e Decreto nº 97.632, de 1989, e na Norma Reguladora da Mineração nº 20, sendo insuficientes para dar conta da complexidade do tema. Limitada e focada apenas na recomposição física da área degradada, a legislação desconsidera aspectos socioeconômicos e não disciplina adequadamente como deve ser o monitoramento das variáveis de controle ambiental e socioeconômico.

Cada mina tem suas particularidades, requerendo que os projetos de fechamento enfrentem os seus próprios desafios técnicos e socioeconômicos. Essa constatação é muito importante para a dinâmica recente da mineração no Brasil, que está ampliando a escala de produção e se expandindo para regiões mais remotas, com ecossistemas ainda íntegros e condições socioculturais frágeis, como os casos do Pantanal e da Amazônia. Esses biomas apresentam condições climáticas, geomorfológicas, hídricas, ecossistêmicas e socioeconômicas diferenciadas das regiões que originariamente desenvolveram as tecnologias que prevalecem na indústria extrativa. Isso mais do que justifica a necessidade de estudos específicos que acompanhem todas as etapas do ciclo minerário.

À parte a importância do fechamento de minas, outro tema de impacto social que vem sendo discutido nos últimos anos é a questão dos *royalties* do minério. A polêmica sobre o tema gira em torno de duas questões básicas: até quanto a taxa não diminui a competitividade internacional dos minérios brasileiros e o “valor” que deve ser repassado à sociedade pelo uso de um bem público.

De acordo com os dados do DNPM (Departamento Nacional de Produção Mineral), a arrecadação da CFEM (Compensação Financeira pela Exploração de Recursos Minerais) cresceu de R\$ 140 milhões em 2003 para R\$ 1,5 bilhões em 2011, com previsão de arrecadar aproximadamente R\$ 2 bilhões em 2012, ou seja, houve um significativo crescimento de 1000% em 8 anos.

Analisando esse contexto, percebe-se um movimento de consolidação da cobrança da CFEM, que teve sua base legal contestada até o ano de 2000. Ou seja, praticamente 20 anos após sua regulamentação, é analisada a cobrança do *royalty* atingindo sua maturidade, ainda que existam pontos de ajustamentos a acontecerem diante da legislação vigente.

Atualmente, o governo federal prepara um texto legal sobre a CFEM, que deverá ser discutido no Congresso Nacional.

3.5.2. Desafios da Siderurgia

Neste item serão considerados como desafios tecnológicos apenas aqueles circunscritos à pelletização, tendo em vista a tendência, já discutida, da matéria prima a ser disponibilizada no futuro ser majoritariamente constituída por minérios finos (*pellet-feed*).

Quanto aos desafios ambientais, considerando que ao se falar sobre a sustentabilidade da cadeia produtiva do minério de ferro obrigatoriamente o segmento siderúrgico deverá ser incluído, será apresentada uma sucinta revisão sobre os seus principais pontos.

3.5.2.1. Desafios da Pelotização

Quando se analisam os novos projetos de empresas estabelecidas e de potenciais entrantes na mineração mundial de ferro, verifica-se que vários empreendimentos tendem a gerar um volume crescente de *pellet feed*, sendo que, em alguns casos, este tipo de minério responderá pela totalidade da futura produção. Nessas condições, maiores custos serão incorridos devido a maior intensidade dos investimentos (\$/capacidade instalada) e maior complexidade das operações de mineração e beneficiamento.

A pelletização de minérios de ferro vem ganhando cada vez mais importância, em função de quatro fatores principais:

- a) a degradação dos granulados vem estimulando o incremento do uso das pelotas na carga dos altos-fornos;
- b) as restrições ambientais à expansão da sinterização, já em vigor nos países desenvolvidos, também vem induzindo ao maior consumo de pelotas;
- c) a maior difusão da tecnologia de redução direta vem ampliando a demanda de pelotas para esta aplicação específica;
- d) a crescente geração de *pellet feed* vem consolidando a pelletização como a tecnologia mais adequada para o uso deste minério superfino.

3.5.2.2. Desafios ambientais da indústria siderúrgica

Consumo energético e de água, geração de gases efeito estufa e disposição de resíduos constituem os principais desafios para a indústria siderúrgica, como discutido a seguir.

- **Emissão de Gases Efeito Estufa**

As emissões atmosféricas ainda continuam sendo a questão ambiental de maior impacto no processo siderúrgico. Elas estão correlacionadas diretamente com a energia e a conservação de recursos, pois as emissões significam perda de materiais e energia que poderiam estar sendo aproveitados de outra forma. Como no processo siderúrgico ainda não é possível evitar a geração de emissões atmosféricas, essas devem ser mitigadas, de forma a minimizar seus impactos ao ambiente.

A taxa de geração de CO₂ situa-se, atualmente, numa faixa de 1.510 a 2000 kg/tonelada de aço bruto nas usinas integradas a coque e de 450 a 600 kg/tonelada de aço bruto nas usinas semi-integradas. A etapa de redução responde por aproximadamente 85% das emissões de CO₂ nas usinas integradas a coque.

Atualmente, com a grande atenção que se está dando as emissões dos GEE, a siderurgia encontra-se numa posição crítica, pois é um dos setores que mais emitem CO₂ na atmosfera. Como consequência, as siderúrgicas vêm atualmente buscando, cada vez mais, maior eficiência.

- **Consumo energético**

As empresas siderúrgicas vêm priorizando projetos que aumentem a eficiência energética de todo o processo, tais como:

a) Troca de combustíveis (exemplo: troca do gás liquefeito de petróleo/GLP por gás natural.

b) Aproveitamento de gases para geração de energia e emprego da energia cinética dos gases (turbina de topo nos altos-fornos). Outro aspecto muito relevante é o fato de que, por estarem intimamente interligadas, as principais iniciativas mundiais de geração de inovações tecnológicas para a mitigação do CO₂ tem buscado, de forma simultânea, a diminuição do consumo energético na siderurgia. Hoje, dois programas, de longo prazo, se encontram em estágios mais avançados relativamente a este tema:

- Ultra Low CO₂ Steelmaking (ULCOS), de natureza multi-institucional no âmbito da Comunidade Européia, que foi iniciado há quatro anos;
- 50% CO₂ – 50% Energia, em desenvolvimento no Japão há quase uma década.

Ambos visam a reduzir substancialmente as emissões de CO₂.

Na experiência brasileira, a utilização de carvão vegetal é uma solução poderosa para a mitigação das emissões de CO₂ da indústria siderúrgica no Brasil. O país, além de clima adequado e relativa disponibilidade de terra para plantio do eucalipto, possui uma avançada tecnologia nesse plantio, fabricação do carvão vegetal e uso em altos-fornos. Importante destacar algumas vantagens do carvão vegetal comparativamente ao carvão mineral:

- Inexistência de contaminantes danosos ao aço, nem ao meio ambiente;
- Menor desgaste do alto-forno;
- Menor temperatura de operação do alto-forno, acarretando menor perda térmica;
- Menor produção de escória;
- Menor consumo de energia;
- Emissão negativa de CO₂ para a atmosfera, ao se considerar o ciclo produtivo.

No entanto, é preciso mencionar que a produção de aço via carvão vegetal é limitada por restrição da capacidade de carga no alto-forno. Outro aspecto relevante é o alto investimento em terras, que deve ser feito com pelo menos seis anos de antecedência, comparativamente a um alto-forno, que leva, em média, dois anos para ser construído. Ademais, existem barreiras socioambientais, devido ao fato de que parte do carvão vegetal utilizado nas pequenas siderúrgicas ser proveniente de florestas nativas, o que está proibido.

Outra questão importante para a siderurgia brasileira, a ser abordada no futuro próximo, é a da siderurgia carbono neutro, que é um grande passo para a diminuição das emissões do GEE. Quando se aborda o conceito de carbono neutro, a adoção de projetos de energia renovável e de reflorestamento se torna fundamental para a compensação das emissões de CO₂. Isso significa afirmar que todas as emissões decorrentes das

atividades da empresa, em toda a sua cadeia de negócios, da extração da matéria-prima ao descarte das embalagens, serão reduzidas ou compensadas. E o carvão vegetal é de grande importância hoje para este processo de neutralização.

Em relação ao consumo energético, a siderurgia pode ser considerada como intensiva em energia.

O consumo específico varia consideravelmente conforme a rota tecnológica empregada. Por exemplo: a rota usina integrada a coque (alto-forno a coque e aciaria LD) necessita de 17 a 19 gigajoule (GJ) por tonelada produzida. No caso de usina semi-integrada (cujo processo se inicia no forno elétrico a arco), o padrão típico de consumo é de 8 a 10 GJ/tonelada.

As etapas de matérias-primas e redução das usinas integradas a coque respondem por 80 a 85% do total da energia consumida neste tipo de configuração produtiva. Para as usinas semi-integradas, 70 a 75% da energia total são despendidas nas fases de matérias-primas e refino (aciaria).

Uma das formas clássicas de redução do consumo de energia na indústria siderúrgica tem sido a difusão de tecnologias mais compactas. A adoção do processo NNSC, no caso de aços planos, tem um potencial de economia de até 20% e 50% sobre o total de energia atualmente consumida por usinas integrada a coque e semi-integradas, respectivamente.

No Brasil a siderurgia é responsável por 5% a 9% da energia consumida no país. Os energéticos mais empregados na indústria siderúrgica brasileira são o coque, carvão vegetal, outras fontes (incluindo carvão mineral, gás de alto forno, calcário e alcatrão), eletricidade, gás natural e gás de coqueria, em ordem decrescente de importância. Coque e carvão vegetal tradicionalmente são responsáveis por 60% do total da energia consumida no setor.

- **Disposição de Resíduos**

Os tipos de resíduos gerados na indústria siderúrgica são os mais variados e provenientes, principalmente, do processamento de matérias-primas, do desgaste e usinagem de peças, da preparação de superfícies metálicas, entre outros. Reciclagem, incineração, tratamentos físico-químicos e disposição final em aterros são, entre outros, métodos mais utilizados para o gerenciamento dos resíduos sólidos. A seleção do método mais apropriado normalmente se baseia em considerações econômicas e nas tecnologias disponíveis, de acordo com as leis ambientais em vigor.

Apesar de a indústria siderúrgica ter feito progressos relevantes na diminuição dos impactos da fabricação do aço no meio ambiente, no que se refere a gestão de resíduos, ainda existe um grande potencial de redução. E por meio do sistema de gestão de co-produtos que se têm os maiores avanços no aumento da sustentabilidade ambiental nas indústrias siderúrgicas.

Nas usinas integradas a coque, cerca de 80% do total de resíduos sólidos gerados são oriundos apenas de duas etapas: redução e refino. Nas usinas semi-integradas, as fases de matérias-primas e refino (aciaria) respondem pela quase totalidade da geração.

A escória de alto-forno é o co-produto com maior volume de geração, na faixa de 210 a 310 kg por tonelada de ferro-gusa produzido, dependendo da qualidade das matérias-primas utilizadas. No caso da escoria de aciaria, a geração encontra-se na faixa de 100 a 150 kg por tonelada de aço produzido, dependendo da rota tecnológica e matérias-primas empregadas. A geração da escoria de forno-panela (um tipo de equipamento que visa ao ajuste fino da composição do aço) é da ordem de 10 a 40 kg por tonelada de aço.

Na etapa de processamento, buscam-se sempre aqueles que proporcionam aplicações mais nobres para o co-produto, tais como: escórias de alto-forno são granuladas e vendidas para a indústria cimenteira; escórias de aciaria podem ser utilizadas na agricultura; pós e carepas podem ser reaproveitadas no processo de produção, quando utilizados na composição de sinter e aglomerados que serão cargas do alto-forno e da aciaria.

A grande mudança de paradigma ocorrerá no tratamento dos resíduos, quando passarão a ter os mesmos controles, no seu processo de geração, que o aço recebe atualmente. Tal controle permitirá a geração de co-produtos mais padronizados e com, conseqüentemente, maior valor agregado. O aço, como material, tem afinidade com a proteção ambiental por possuir um desempenho superior a outros metais e por ser imediatamente reciclável. O aço é hoje o produto mais reciclável e mais reciclado do mundo. Quando finda sua vida útil, produtos como carros, geladeiras, fogões, latas, barras e arames tornam-se sucatas, que alimentam os fornos das usinas, produzindo novamente aço.

O setor siderúrgico brasileiro vem, há alguns anos, adotando uma política consistente e sistêmica de gestão de resíduos, que consiste na transformação destes em co-produtos reutilizados no próprio setor ou comercializados como insumos para a utilização em outras atividades. A transformação de resíduos em produtos corresponde a uma forma moderna de medida de eficiência e responsabilidade social de uma atividade produtiva.

De uma maneira geral, dos cerca de 550 kg de resíduos sólidos gerados por tonelada de aço produzido nas usinas integradas a coque, as siderúrgicas já recuperam (e reciclam) cerca de 98% desses materiais, sendo algumas empresas brasileiras consideradas referências internacionais neste campo, com índices superiores aos de várias usinas estrangeiras. Por outro lado, a reciclagem de co-produtos na aciaria e no alto-forno via briquetagem (aglomeração), que é uma prática difundida na siderurgia mundial, ainda é pouco praticada no Brasil.

As iniciativas de reciclagem se intensificam devido aos indícios cada vez mais evidentes de esgotamento dos recursos naturais e a percepção da redução do espaço no planeta para o armazenamento de resíduos gerados pelos processos industriais e pelo descarte pós-consumo. A reciclagem de aço representa atualmente uma importante atividade econômica, que envolve uma grande estrutura composta por aproximadamente 3.000 empresas, reciclando anualmente 45 milhões de toneladas de aço. A siderurgia brasileira recicla anualmente cerca de 5,9 milhões de toneladas de sucata, adquiridas no mercado interno, além daquela gerada no próprio processo.

- **Consumo de Água**

A utilização de água no processo siderúrgico e na ordem de 100 a 200 m³ por tonelada de aço produzido, suprida, principalmente, pela captação direta em cursos de água próximos às unidades industriais. As águas são utilizadas principalmente para o resfriamento dos equipamentos, do aço e na limpeza dos gases e outras atividades secundárias, como granular escoria.

Os índices de recirculação nas empresas siderúrgicas vêm crescendo. Há empresas siderúrgicas de aços longos, nas quais o índice de recirculação chega a 98% sem gerar efluente, pois o restante da água é evaporado. Essas mesmas empresas buscam ainda a diminuição das perdas por evaporação e a melhora dos equipamentos, que exigirão cada vez menos necessidade de resfriamento (já que resfriamento é fuga de calor), diminuindo assim a captação de água e aumentando a taxa de recirculação.

Além disso, algumas unidades industriais que tem sua posição geográfica próxima à costa procuram evitar o consumo de água doce e potável para o resfriamento de produto e de maquinário, já que não ha empecilho técnico significativo para este uso com águas salobras e/ou salgadas.

No Brasil, a adoção da cobrança pelo uso da água em uma bacia hidrográfica, instituída em lei, já esta implantada em duas bacias hidrográficas: Paraíba do Sul e Piracicaba, Capivari e Jundiáí, ambas localizadas na Região Sudeste, abrangendo os estados de São Paulo, Minas Gerais e Rio de Janeiro. A cobrança pelo uso da água esta agindo como instrumento eficaz de incentivo ao uso racional de recursos hídricos, sem causar impactos econômicos significativos aos usuários industriais.

A maior parte da água utilizada no processo produtivo das siderúrgicas decorre da necessidade de refrigeração e equipamentos e materiais. Essa característica tem possibilitado as empresas implantarem medidas que aumentam consideravelmente o volume de água reciclada em seus processos. Algumas iniciativas que refletem esse esforço estão relacionadas a aplicação de tecnologias de ponta para a implantação de sistemas de reuso de efluentes, fechamento de circuitos e ações de conscientização dos

operadores da unidade produtiva. O índice médio de recirculação de água na siderurgia nos últimos 5 anos tem sido cerca de 94%.

4. SÍNTESE DOS RESULTADOS DA PESQUISA

Mediante a exposição das informações descritas até o momento, verifica-se que existem várias dificuldades em relação ao aumento da produção de minério de ferro, tanto em termos tecnológicos quanto de restrições ambientais.

A alta dos preços do minério de ferro no mercado internacional e o grande consumo da indústria chinesa dão valor à matéria-prima de baixíssimo teor de ferro encontrada em algumas regiões, como nas reservas do Quadrilátero Ferrífero e do Norte de Minas Gerais, considerada a nova fronteira da mineração no estado. Pilhas de minério pobre acumulado como rejeito e camadas ainda intocadas do subsolo, com 20% a 40% de ferro, começam a ser exploradas por algumas empresas do ramo da mineração. Com isso, estão surgindo projetos que pretendem transformar em produto comercializável, milhares de toneladas hoje sem interesse dos compradores. Esses projetos dependiam do avanço da tecnologia e, para boa parte deles, técnicas estão sendo desenvolvidas, pelos próprios brasileiros, para solucionar os problemas existentes.

Dos anos 1940 ao fim da década de 1960, a primeira fase da mineração em Minas explorou a hematita, rica em ferro, com teores superiores aos 60%. Com a escassez desse material nos anos 1970, foi a vez dos chamados itabiritos friáveis (que se fragmentam com facilidade) e de baixos teores. Com isso, vencido o desafio tecnológico, faz-se necessário a exploração a partir dos itabiritos compactos, material duro que precisa ser moído para retirada da areia que se acumula junto ao ferro. Dessa forma, os itabiritos pobres passariam por um processo de retirada de impurezas para elevar os teores de ferro de no máximo 40% aos 62% a 65% que o mercado pede e valoriza. A tecnologia que enriquece o minério pobre em ferro permite, ainda, a ampliação da vida útil das minas.

Entretanto, por mais eficientes que sejam os processos de beneficiamento dos minérios pobres, eles resultarão em volumes de rejeitos maiores que os atuais, o que se contrapõe a uma legislação ambiental cada vez mais restritiva aos resíduos industriais. Uma das

alternativas para minimizar ou mesmo extinguir o impacto ambiental gerado pelos rejeitos dos minérios de mais baixo teor é a sua utilização em outros segmentos industriais. São ainda poucos os exemplos no país dessa interação do setor mineral com diferentes segmentos industriais para utilização de seus rejeitos como matéria prima alternativa. Mas, esse quadro deverá mudar nas próximas décadas, o que dará uma maior sustentabilidade ao setor mineral.

Uma outra alternativa para minimizar os impactos ambientais dos rejeitos oriundos do aproveitamento de minérios de baixo teor é a inovação tecnológica na própria indústria siderúrgica, adequando seus processos a uma nova realidade, de maior nível de contaminantes na matéria prima que os atuais, como já ocorreu em relação ao uso de finos de minérios.

Com a menor disponibilidade na natureza do minério granulado – *lump ore* – que pode ir diretamente para os altos-fornos, como discutido anteriormente, passou-se a adotar a técnica de aglomeração desses finos previamente à sua alimentação nos processos siderúrgicos, que seja a sinterização ou a pelotização.

Seguindo essa linha, têm sido estudados e desenvolvidos atualmente novas técnicas para reaproveitamento de materiais ultrafinos, os rejeitos do processo da mineração que geralmente são depositadas em lagos artificiais, as chamadas barragens de rejeito. Com isso, as siderúrgicas apostam nas inovações em produtos como aços especiais para as indústrias automotivas e de óleo e gás, as quais têm buscado, cada vez mais, produtos com alta inserção tecnológica e elaborados sob bases sustentáveis.

Em síntese, a projeção de que a demanda por minério de ferro continuará a crescer, inclusive internamente, leva à perspectiva de que minérios cada vez mais pobres serão explorados e que caberá à indústria extrativa mineral inovar em termos dos seus beneficiamentos, utilizando tecnologias cada vez mais limpas ambientalmente, com índices de recuperação elevados para minimizar o volume dos rejeitos que serão inevitavelmente gerados. Quanto à indústria siderúrgica, caberá a ela buscar inovações que contribuam para diminuir seu consumo energético e emissão de gases efeito estufa e rotas tecnológicas alternativas que permitam a utilização de matéria prima com teores

de contaminantes mais altos que os atuais, ou mesmo de novos produtos, mais adequados à realidade da matéria prima que será disponibilizada em um futuro.

Conclui se, portanto, a partir da análise feita, que o crescimento sustentável da cadeia produtiva do minério de ferro depende de ações conjuntas em termos de inovações tecnológicas dos seus segmentos mais importantes: mineração e siderurgia.

Aos desafios tecnológicos para a produção de minério de ferro, somam-se aqueles de origem socioambiental. Resolver a difícil situação imposta hoje para a mineração em áreas com presença de cavidades naturais subterrâneas, que tal como está deixa de ser uma legislação restritiva para assumir o caráter de impeditivo; diminuir o consumo energético dos seus processos, em especial a moagem, e reaproveitamento da água, são desafios ambientais impostos desde o presente e que devem se consolidar ainda mais para o futuro.

Quanto aos desafios sociais, obter a chamada “licença social para minerar” passou a ser e permanecerá como um dos maiores desafios para a atividade mineral. Neste contexto, o diálogo aberto, transparente com a comunidade terá que ser aprendido e praticado, ao longo dos anos que se seguem.

5. CONCLUSÃO

No presente trabalho foi apresentada uma revisão da literatura sobre a evolução da produção de minério de ferro em relação às indústrias mineral e siderúrgica, algumas das tendências futuras em relação a essa produção e os desafios tecnológicos para o futuro. Todas essas questões analisadas sob a ótica do desenvolvimento sustentável.

Nesse contexto, os desafios para a produção de minério de ferro e para a siderurgia em um futuro próximo devem estar centrados nos seguintes pontos:

- Inovações tecnológicas no beneficiamento de minérios que permitam aproximar, o máximo possível, os minérios pobres e com altas porcentagens de finos aos processos metalúrgicos;
- Inovações tecnológicas na siderurgia que possam adaptar seus processos às melhores condições possíveis de concentração dos minérios de baixo teor e altas porcentagens de finos;
- Atender aos desafios impostos pela nova ordem mundial de compatibilizar a produção industrial com o meio ambiente e ganhos sociais.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Brasil, Ministério de Minas e Energia, Plano Nacional de Mineração 2030 - Brasília: MME, 2010

CASTRO, L,F,A; FIGUEIRA, R, P; TAVARES, R, M, Apostila de Siderurgia I, 1980.

Curso de Mineração Básico – Vale, 2009

FERNANDES, F. R. C; SOUZA, V, L, E, S; FREITAS, T, P, R, Centro de Tecnologia Mineral -Tendências Tecnológicas Brasil 2015: Geociências e Tecnologia Mineral - Rio de Janeiro, 2007

GUIMARÃES, M. L. V; TOLEDO, J. P; FARIA, C. A - Estimativa e Monitoramento das Reservas de Minério de Ferro do Sistema Sul – CVRD - Quadrilátero Ferrífero – MG – Brasil Miningsite, 2008

MOURÃO, J, M; Estudo Prospectivo do Setor Siderúrgico - NT Minério de Ferro e Pelotas - Situação Atual e Tendências 2025, 2008

SAMPAIO, J. A; JULIANELLI, K. M; PENNA, M, T, M – Ferro – Mina N5 – Carajás/CVRD – Rio de Janeiro, 2002

QUARESMA, L. F - Ferro e Aço. Sumário Mineral. (Ed.) DNPM – Departamento Nacional de Pesquisas Minerais. 22ª Ed. 64-67, 2002.

VASCONCELLOS, C. Minério de ferro deverá gerar saldo de US\$ 35 bi – Valor Econômico - São Paulo, 2011. Disponível em:

<<http://clippingmp.planejamento.gov.br/cadastrros/noticias/2011/12/13/minerio-de-ferro-devera-gerar-saldo-de-us-35-bi/>>. Acesso em: 25 de junho de 2012.