

**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MINAS**  
**Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais**  
**Curso de Especialização em Engenharia de Recursos Minerais**

**MONOGRAFIA**

**CONSIDERAÇÕES SOBRE O PROCESSO DE BENEFICIAMENTO DE  
MINÉRIO DE FERRO:  
Beneficiamento, pelotização e análise online de teores**

**Aluno: Luiz Henrique Côrtes Santana Pereira**

**Orientador: Prof. Paulo Roberto de Magalhães Viana**

**BELO HORIZONTE**

**2013**

**Luiz Henrique Côrtes Santana Pereira**

**CONSIDERAÇÕES SOBRE O PROCESSO DE BENEFICIAMENTO DE  
MINÉRIO DE FERRO:  
Beneficiamento, pelotização e análise online de teores**

Monografia apresentada à Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial à obtenção do título de Pós Graduação em Engenharia de Recursos Minerais.

Área de Concentração: Processamento de Minério de Ferro.

Professor Orientador: Paulo Roberto de Magalhães Viana.

**BELO HORIZONTE  
UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS  
AGOSTO/2013**

À Deus, aos meus familiares e amigos, que sempre me deram força. Aos mestres, em especial ao meu orientador pelos ensinamentos.

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente agradeço a Deus pela coragem, garra e força para enfrentar e superar as dificuldades encontradas nesta caminhada.

Aos meus familiares por terem me apoiado nos momentos difíceis neste tempo.

Aos professores e aos colegas de trabalho pelo convívio e pelos grandes ensinamentos

## **RESUMO**

Os minérios de ferro têm um teor de ferro e também de sílica variável consoante ao mineral ferrífero e determinar esse teor é fundamental na produção de pelotas. Um importante equipamento pode trazer impactos diretos na produtividade da pelotização, pois determina o teor de sílica presente nos finos de minério de ferro. No processo de pelotização é preciso seguir o teor de ferro e sílica para atender as especificações exigidas pelo mercado. Se a análise de teor for rápida e confiável impactará diretamente na qualidade das pelotas. O objetivo geral desse estudo é rever, de forma sucinta, os processos de beneficiamento e pelotização de minérios de ferro. A metodologia adotada foi a pesquisa bibliográfica que tem como característica a leitura, análise e interpretação de livros, periódicos, textos legais e outros documentos que possam servir de fonte literária para o tema proposto. Posteriormente considerou-se uma palestra dada por um profissional especializado em Mineração e Processos. O trabalho conclui mostrando a importância da análise de teores e controle dos processos de beneficiamento mineral e pelotização.

Palavras-chave: teor mineral; beneficiamento; analisador online; pelotização.

## **ABSTRACT**

The iron ores have an iron and silica content that varies according to the iron and silicate mineral occurring in the ore and is critical in the production of pellets. An important equipment can bring direct impacts on the productivity of the pelletizing process, because it determines the silica content present in the iron ore fines. In the pelletizing process you must follow the silica content to attend the market specifications. If the silica analysis is fast and reliable, it can impact directly the pellets pellet quality. The methodology adopted was the literature research. It was concluded that the content analyze and process control in beneficiation and pelletizing plants are important.

Keywords: mineral content, beneficiation; online analyzer; pellet.

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>11</b>
<b>1.1 Objetivo e relevância .....</b>	<b>12</b>
<b>2. CONSIDERAÇÕES SOBRE O MINÉRIO DE FERRO.....</b>	<b>13</b>
<b>2.1 Panorama nacional do minério de ferro .....</b>	<b>15</b>
<b>2.2 Especificidade da produção do minério de ferro.....</b>	<b>17</b>
2.2.1 Processo produtivo e Beneficiamento de minério de ferro.....	20
<b>2.3 Importancia da tecnologia nos processos .....</b>	<b>24</b>
<b>3. O PROCESSO DE PELOTIZAÇÃO .....</b>	<b>26</b>
<b>3.1 Coneito e panorama da pelotização no Brasil.....</b>	<b>26</b>
<b>3.2 Análise granulométrica e o processo de pelotização .....</b>	<b>28</b>
<b>4. ANÁLISE DE TEOR.....</b>	<b>31</b>
<b>4.1 Importancia da análise de teor no minério de ferro.....</b>	<b>31</b>
<b>4.2 Do processo para a análise de teor .....</b>	<b>34</b>
<b>4.3 Processo do Analisador Online.....</b>	<b>34</b>
<b>5. ANALISE ONLINE APLICADO NA ETAPA DA PELOTIZAÇÃO.....</b>	<b>38</b>
5.1 Ganhos no controle do processo de pelotização .....	38
<b>6 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>40</b>
<b>7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>41</b>

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 2-1: Produção Mundo x Brasil.....</b>	<b>14</b>
<b>Figura 2-2: Etapa Mineração e Siderurgia .....</b>	<b>18</b>
<b>Figura 2-3: Processo produtivo da Samarco .....</b>	<b>22</b>
<b>Figura 3-1: Minério pelotizado.....</b>	<b>30</b>
<b>Figura 4-1: Analisador online CNA - Controlled Neutron Analyzer. ....</b>	<b>34</b>
<b>Figura 4-2: Analisador online CNA em funcionamento .....</b>	<b>36</b>



## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 4-1: Caracterização Minério de Ferro por granuloteria.....</b>	<b>32</b>
<b>Tabela 4-2: Análise granuloquímica do minério de ferro.....</b>	<b>33</b>
<b>Tabela 4-3: Elementos de interesse do analisador online .....</b>	<b>35</b>

## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

IBRAM - Instituto Brasileiro de Mineração.

MME - Ministério de Minas e Energia.

## 1. INTRODUÇÃO

Uma constante preocupação da indústria mineral é investir em tecnologia que possibilita um melhor aproveitamento do potencial econômico dos minérios que está intimamente relacionado às condições geológicas e metalogenéticas das jazidas. A chamada mineralogia do minério trata os teores de ferro, a estrutura e a textura das rochas que contêm o mineral-minério, a paragênese e demais parâmetros geológicos e demais características que determinam a precificação e os negócios minerários (PINHEIRO, 2000).

É sabido que os finos de minério de ferro passam por um processo de beneficiamento por meio da concentração, e, o concentrado deve ser pelotizado para alimentar o alto-forno. A pelotização é o processo de aglomeração de um dado material na forma de um pellet. Vale esclarecer que para o minério de ferro, a pelotização de partículas ultrafinas (-0,044mm) ocorre por meio de uma aglomeração a frio e um tratamento térmico. A pelotização objetiva a produção de aglomerados esféricos de tamanhos na faixa de 8 a 18 mm, com características apropriadas para alimentação das unidades de redução, tais como o alto forno (MOURÃO, 2008) e fornos de redução direta (DNPM, 2010).

É preciso então, projetar e monitorar as plantas de concentração e pelotização de maneira que sejam produzidas pelotas com um custo mais baixo e qualidade mais alta.

Segundo Mourão (2008) tem-se que o minério de ferro é quase que totalmente utilizado na indústria siderúrgica para a obtenção de ferro e aço (> 97 %). Parcelas pequenas do montante da produção são destinadas a indústrias de cimento, química e outros. Nas palavras do autor, extrai-se:

Em termos de ferro contido, o Brasil situa-se em 5º lugar na detenção das reservas mundiais de minério de ferro. Porém, em termos de teor ou concentração em ferro, esse posicionamento muda, significativamente, para a 3ª posição, entre esses cinco países de maiores reservas em ferro contido. Quando são analisados outros elementos da composição química, tais como: SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, P, S, Ti, V, Pb, Na<sub>2</sub>O, K<sub>2</sub>O etc., deletérios para a siderurgia, as reservas brasileiras situam-se lugar de absoluto destaque, configurando-se como as mais puras, mundialmente. O aspecto do teor de ferro coloca o Brasil em posição de real vantagem competitiva em custos de lavra e beneficiamento, em relação à China e à Ucrânia, que apresentam teores médios de 33 e 29%, respectivamente.

Dessa maneira, é importante considerar que os minérios de ferro são rochas a partir das quais pode ser obtido ferro metálico de maneira economicamente viável e é importante mencionar ainda que o ferro pode ser encontrado sob a forma de óxidos, como a magnetita e a hematita ou ainda como um carbonato, a siderita. Os minérios de ferro têm um teor de ferro e

também de sílica variável consoante ao mineral ferrífero, e determinar esse teor é fundamental na produção de pelotas.

Um equipamento de análise online pode trazer impactos diretos na produtividade da pelotização, pois determina de forma rápida o teor de sílica presente nos finos de minério de ferro. Se a análise de teor, usando-se o analisador online, for confiável impactará diretamente na qualidade dos *pellets*, podendo ser de grande importância para o controle de processos minerais. Este equipamento trata-se de um tipo de analisador de teor online, utilizado no controle de processos minerais.

## **1.2 Objetivos e relevância**

O crescimento significativo da indústria de mineração e a sua expressividade econômica tanto em nível nacional como mundial e com significativa repercussão ambiental justifica esse estudo.

Essa pesquisa objetiva ser mais um instrumento de informação e conhecimento para profissionais da área de mineração, mais especificamente da área de processamento mineral, além de demais pessoas interessadas no assunto.

O principal objetivo desta investigação é realizar algumas considerações sobre o beneficiamento mineral e a pelotização. Entre os objetivos específicos estão:

- Abordar os aspectos relacionados ao teor no minério de ferro como fator determinante para sua precificação e comercialização;
- Citar a importância dos controles de processo e análise de teores.

## 2. CONSIDERAÇÕES SOBRE O MINÉRIO DE FERRO

O cenário brasileiro se revela como a quinta maior reserva mundial de minério de ferro. É comum encontrar essa afirmação entre os muitos trabalhos e pesquisas sobre o assunto. Porém, é preciso considerar a presença dos contaminantes e nesse sentido, as reservas brasileiras ocupam lugar de absoluto de destaque, conceituando-se como as mais puras, mundialmente (DNPM, 2011).

Segundo o DNPM (2010), as reservas medidas e indicadas de minério de ferro no Brasil alcançam 26 bilhões de ton., situando o País em quinto lugar em relação às reservas mundiais de 370 bilhões de ton. Entretanto, considerando-se as reservas em termos de Ferro contido no minério, o Brasil assume lugar de destaque no cenário internacional. Este fato ocorre devido ao alto teor encontrado nos minérios Hematita (60% de Ferro) predominante no Pará, e Itabirito (50% de Ferro) predominante em Minas Gerais.

Com base neste cenário, em termos da siderurgia brasileira e demanda de minério de ferro atual e projetada, assim como reservas do país, pode-se afirmar que as empresas desse setor estarão seguras quanto ao suprimento, em quantidade e qualidade, com benefícios para a sua competitividade. Basta citar aqui que o país é, ainda, um dos maiores produtores de minério de ferro do mundo, não só em quantidade, como também em qualidade. As reservas brasileiras têm aumentado ao longo do tempo, onde importa destacar que esse crescimento é relacionado ao incremento da participação dos itabiritos de Minas Gerais, mais especificamente do Quadrilátero Ferrífero (MME, 2011).

Na figura 2-1 podemos observar a produção do Brasil em relação ao mundo.

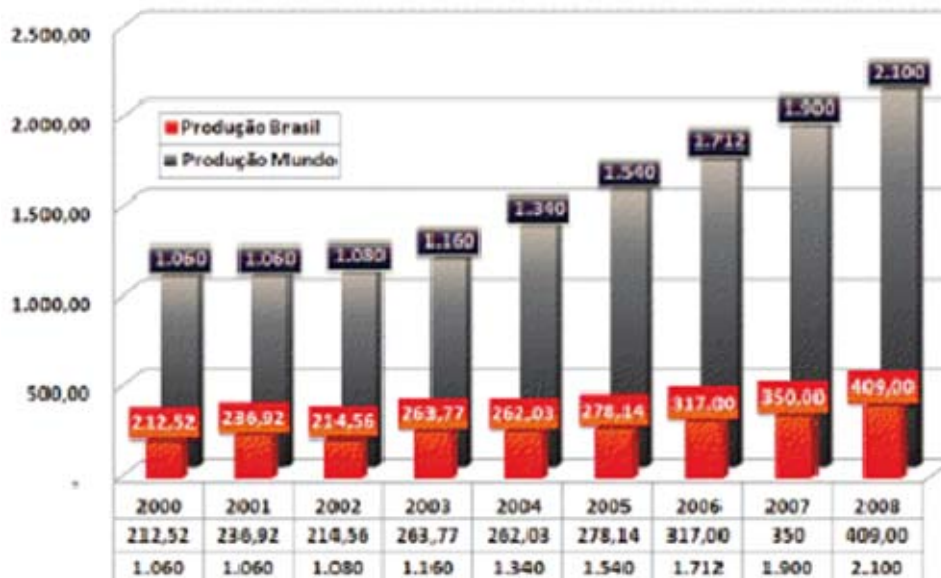


Figura 2-1: Produção Mundo x Brasil.  
 FONTE: DNPM, 2008.

De acordo com o Centro de Gestão e Estudos Estratégicos – CGEE (2010) é preciso conceber a necessidade de se focar na tecnologia de processos, de maneira a incentivar a produção mineral e também em favorecer as novas pesquisas na produção e na própria exploração de novos jazimentos - basicamente de itabirito. Dessa maneira, vale ainda reforçar a posição de que alguns tipos de minérios estão em estado de exaustão nas reservas conhecidas do Quadrilátero Ferrífero e, por conseguinte, haverá escassez de granulado, em futuro não muito distante.

Sendo mais pobres em ferro, os itabiritos necessitam de plantas mais complexas de beneficiamento, com etapas de concentração mais sofisticadas e com menores índices de recuperação metálica. No futuro próximo, existe a expectativa de que os minérios lavrados terão teores mais elevados de fósforo e alumina. O volume de minério ultrafino, tipo pellet feed, também aumentará, principalmente em função dos novos projetos, reforçando a necessidade de plantas de pelotização (CGEE, 2010, p.20).

O estudo de autoria do referido Centro afirma que, diante de um quadro de escassez é preciso ter diretrizes e recomendações que considerem principalmente o fato de que a expansão da produção de minério de ferro está sendo associada à exploração de minérios de pior qualidade. Assim, duas são as diretrizes principais: maiores investimentos em prospecção geológica, visando à descoberta de reservas com maiores porcentagens de granulado e menores teores de impureza, especialmente de fósforo, e estudos adicionais para se adaptar à nova realidade das jazidas de ferro, que apontam para o esgotamento dos granulados e uma

composição química de pior qualidade. Ressalta-se que a primeira diretriz não possui desdobramento em recomendações mais específicas mas já a segunda considera as seguintes recomendações:

- Criar uma plataforma para o desenvolvimento de estudos em minério de ferro, tendo-se em conta os aspectos econômicos, as novas tecnologias e processos, a diminuição do consumo de energia e os impactos ambientais;
- Incentivar, ampliar e consolidar as integrações siderurgia/mineração e siderurgia/mineração/academia, visando ao desenvolvimento de soluções para o aproveitamento de finos de minério de ferro e minérios com maiores teores de impurezas, especialmente de fósforo.
- Incentivar e consolidar os estudos de geometurgia dos minérios de ferro, visando à mensuração dos seus valores de uso (value in use);
- Estimular estudos fundamentais acerca da mineralogia da alumina e do fósforo nos minérios de ferro e as reais possibilidades de sua extração por processos de concentração, em particular a flotação;
- Avaliar, por meio de estudos de caracterização química, o potencial de impacto ambiental dos diferentes minérios de ferro brasileiros (por exemplo, a produção de dioxinas no processo de sinterização);
- Investir nos estudos de beneficiamento dos itabiritos e outros minérios de menor teor de ferro contido (CGEE, 2010, p.22).

Dessa maneira, fica clara a importância de se falar em tecnologia, em qualquer etapa da produção ou beneficiamento do minério. Este estudo considera apenas a questão da análise de teor do minério de ferro e os benefícios da agilidade e da precisão dessa mensuração para a etapa de pelletização. Mas, só é possível compreender o impacto dessa problemática se antes, poder-se entender como se dá a produção do minério de ferro e qual a importância desse mineral para o Brasil e para o mundo. A seguir, são tratados os principais aspectos do minério de ferro no país.

## 2.1 Panorama nacional do minério de ferro

Pretende-se aqui, diferente de outros trabalhos que expõem as muitas táticas e quadros demonstrativos acerca da posição do Brasil na produção de minério de ferro, traçar um panorama dessa produção mineral. Assim, serão considerados aqui, apenas os aspectos relacionados à valoração do minério de ferro, a disposição de investimento e a perspectiva para a indústria do minério de ferro.

Assim, importa esclarecer que o setor de mineração do Brasil cresceu cerca de 6,5 por cento no ano de 2012 e crescerá também em 2013. Sabe-se que o Brasil é o segundo

maior exportador de minério de ferro do mundo e que a produção de minério de ferro deve subir nos próximos anos, como resultado de um investimento planejado da indústria de mineração de 65,8 bilhões de dólares, para o período entre 2011 e 2015 (IBRAM, 2012).

O Ibram (2012) apontou que o valor da produção da mineração em 2011 alcançou a marca de 50 bilhões de dólares e a atividade mineral faz parte do rol de maior interesse por parte dos investidores e tem como pano de fundo o cenário de demanda aquecida e preços elevados. Um comparativo mostra que na China, 800 milhões de pessoas estão deixando o campo para se dedicar à indústria e a expectativa é que até 2050, o país tenha cerca de 20 cidades com mais de 20 milhões de habitantes cada uma. Esse contexto atual e de um futuro breve revela que, em consequência desse aumento da população urbana e do desenvolvimento mundial, a atividade mineral ganha destaque na economia brasileira.

O minério de ferro se apresenta como principal produto a receber os investimentos previstos para a mineração. Segundo o IBRAM (2012) os recursos previstos serão suficientes para elevar significativamente a produção brasileira de minérios. Em alguns casos a quantidade produzida pode vir a dobrar. É o caso do minério de ferro. Os mais de US\$ 40 bilhões aplicados no produto devem elevar em 112% a produção de minério de ferro até 2015, chegando a 787 milhões de toneladas.

Importa ressaltar que a expansão poderia ser ainda maior não fossem alguns entraves, como limitações de infraestrutura e da qualificação da mão de obra. De acordo com a Confederação Nacional da Indústria – CNI (2012), o Brasil forma hoje cerca de 30 mil engenheiros por ano contra 300 mil da China, 190 mil da Índia e 120 mil da Rússia. Este obstáculo é confirmado no cotidiano das mineradoras, visto que existe um déficit de mão de obra especializada para as vagas e atividades a serem executadas nas muitas etapas do processo mineral. Não obstante, representa um fator dificultador para a atividade mineraria a questão da pesquisa mineral. Dentre os países com tradição e relevância na produção de minérios, o Brasil é um dos que menos investem neste tipo de estudo. Situação que fica ainda mais crítica se levarmos em consideração o tamanho do país.

De acordo com o Serviço Geológico do Brasil (CPRM) os investimentos em pesquisa mineral cresceram muito e este é um tipo de investimento que só pode crescer progressivamente, mas é preciso, não só aumentar os recursos destinados a pesquisa em si, como também melhorar os laboratórios para se fazer as análises necessárias, aumentar e qualificar os profissionais, entre várias outras necessidades. Acredita-se que a informação, os dados precisos no que se refere a substância mineral, é tida como uma importante estratégia



para a indústria e é neste sentido que as ações públicas devem ser direcionadas para atrair mais investimento (CPRM, 2010).

Enfim, nota-se que é de suma importância encontrar alternativas para superar os obstáculos que se apresentarem a indústria mineradora e estabelecer medidas que possam garantir uma mineração forte, competitiva e preparada para o desenvolvimento. A tecnologia é um fator que pode potencializar a produção mineral nas suas mais diversas nuances. O estágio em que o País se encontra com relação às tecnologias aplicadas na mineração local e ainda é crítico. Faz-se necessário investir em controle dos processos e tecnologias como a abordada neste estudo (a análise de teor online e a pelotização), objetivando-se propiciar competitividade, sustentabilidade e eficiência nas etapas da mineração.

## 2.2 Especificidade da produção do minério de ferro

Especificamente no que se refere à produção mineral brasileira, o minério de ferro é quase que totalmente utilizado na indústria siderúrgica. Pequenas parcelas do montante da produção são destinadas às indústrias de cimento, química etc. A figura 2-2 revela como ocorre a interdependência da mineração de ferro e da siderurgia em mais detalhes. Através das operações de lavra, faz-se a exploração (aproveitamento econômico) do minério da jazida, encaminhando-se o produto bruto (comumente chamado de run of mine - ROM), para o beneficiamento. Posteriormente, este material é submetido a uma série de operações de fragmentação, classificação por tamanhos, concentração, desaguamento etc., visando adequá-lo química, física e metalurgicamente às exigências dos processos siderúrgicos (CGEE, 2010).

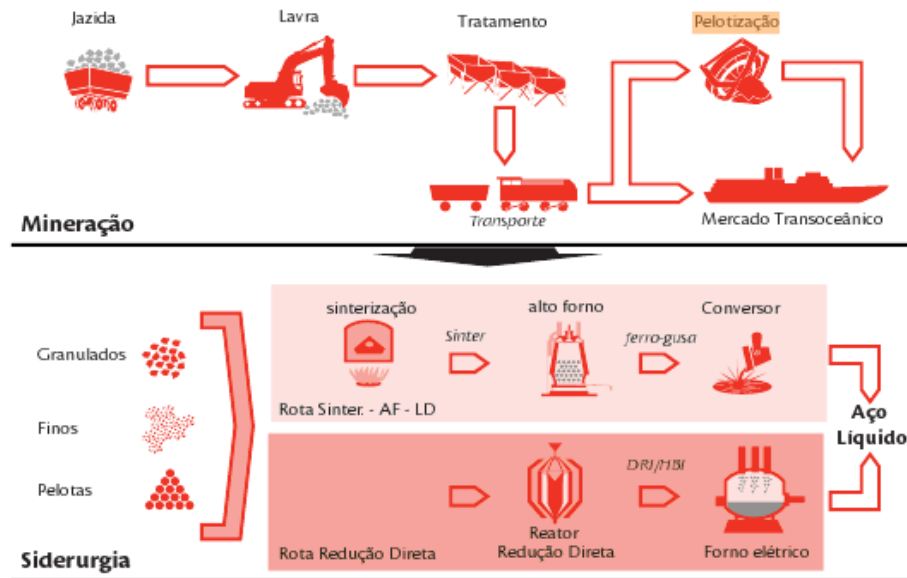


Figura 2-2: Etapa Mineração e Siderurgia.  
 FONTE: CGEE, 2010.

Nesse panorama, um aspecto muito importante para caracterizar os produtos minerais que saem da usina de tratamento é a sua distribuição granulométrica. Ocorre que durante o desmonte, a lavra, a fragmentação e o manuseio, muitos finos são gerados, os quais são inadequados ao uso direto nos reatores de redução (alto-forno e forno de redução direta), sendo aglomerados previamente, em plantas de sinterização ou pelletização. Em geral, na fase de mineração retira-se o material estéril antes da remoção do minério e seu envio para as plantas de processamento. O minério é submetido à britagem e moagem para assegurar a liberação das partículas dos minerais de interesse, permitindo a produção de concentrados (IBRAM, 2011).

O CGEE (2010) esclarece que os processos de concentração dependem dos minerais presentes e das suas formas de ocorrência, sendo estes processos normalmente a concentração gravítica, magnética e a flotação. Sobre a classificação do minério de ferro tem-se que:

Geralmente, produtos de minerais de ferro, em função da granulometria, podem ser classificados em granulado (ou lump), fino para sinterização (sinter feed) e fino para pelletização (pellet feed). A faixa de tamanho do granulado é de 6,3 a 31,7 mm; a do sinter feed, de 0,15 a 6,3 mm; e a do pellet feed, abaixo de 0,15 mm.

Importa ressaltar que na mineração de ferro esta é tanto mais econômica, quanto maior a proporção de granulado. A qualidade das reservas e jazimentos são determinantes nesse aspecto. O que é necessário compreender para melhor elucidar a temática proposta nesse estudo é que os processos de concentração e aglomeração são de alto custo operacional

e requerem grandes montantes de investimento e acarretam considerável impacto ambiental. A produção de *sinter feed* e *pellet feed* nas minas implica na necessidade de suas prévias aglomerações para que possam ser utilizados na siderurgia. As cargas metálicas típicas dos altos-fornos consistem de: granulado, sinter (4 a 50 mm) e pelota (8 a 18 mm). Por outro lado, a carga dos fornos de redução direta contempla granulado e pelota (8 a 18 mm) (CGEE, 2010).

Ou seja, têm-se que para diferentes minérios de ferro, devido às variadas gêneses, tem-se produtos com propriedades totalmente distintas e, em consequência, comportamentos muito variados, não só nas operações de lavra e beneficiamento, mas também nos reatores dos processos siderúrgicos. De igual maneira, aglomerados como as pelotas apresentam características e desempenho na redução, também, muito particulares e variados, dependendo do tipo de *pellet feed*, fundentes, grau de moagem etc. utilizados na sua fabricação. O foco principal desse trabalho acadêmico constituído nas funções dos analisadores online de teor do minério de ferro, considera que os minérios de ferro e as pelotas possuem identidade própria sugere-se que tais produtos não deveriam ser classificados como *commodities*. No estudo CGEE (2010) extrai-se que:

Portanto, considerando que no âmbito mundial, pode-se constatar em estudos como verifica-se a degradação das reservas e da produção de minério granulado, tanto em volume, quanto em qualidade. Em 1983, a produção mundial de granulado foi de 108 milhões de toneladas, o equivalente a 45% do mercado transoceânico e a 25% da produção total de minério de ferro. Em 2000, a despeito do crescimento considerável da produção global de minério de ferro, a quantidade de granulado já havia retraído para 77 milhões, passando a representar apenas 19% do mercado transoceânico e 8% da produção global do minério. Quanto à qualidade, constata-se uma redução progressiva na resistência e nas características químicas dos minérios granulados disponíveis no mercado: teor contido de ferro (quanto maior, melhor é o minério), alumina e fósforo (quanto maior, pior é o minério).

Com base no que se pode perceber em novos projetos de empresas estabelecidas e de potenciais entrantes na mineração mundial de ferro, verifica-se a existência de muitos empreendimentos que tendem a gerar um volume crescente de *pellet feed*. Considera-se ainda, que em alguns casos, este tipo de produto ( *pellet feed* ) responderá pela totalidade da futura produção. Diante do exposto é que nas atuais condições, maiores custos serão incorridos devido à maior intensidade dos investimentos e maior complexidade das operações de mineração e beneficiamento. Portanto, fica claro que a tecnologia deve estar voltada a atender ao máximo possível a recuperação de ferro na substância mineral (IBRAM, 2011).

O referido Instituto aposta na necessidade de um estudo racional, lastreado em informações técnicas consistentes que devem estas sim, orientar as ações de natureza política para que se possa garantir uma mineração forte, competitiva e preparada para o

desenvolvimento. Aproximadamente 4,2% da litosfera são constituídos de ferro e os principais minerais que contêm ferro são: hematita, magnetita, goethita e siderita. No que diz respeito às formações ferríferas bandadas, denominadas itabirito, compostas de hematita ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) e silicatos, se constituem nos maiores depósitos de minério de ferro. Neles é que se deve focar a maior eficiência da análise de teor. Essas formações enriquecidas pelos processos geológicos possibilitaram a existência de itabiritos intercalados com hematita compacta com teores de ferro bastante altos (DNPM, 2010).

A economicidade do aproveitamento dos minérios está também intrinsecamente ligada às condições geológicas e metalogenéticas das jazidas. A mineralogia do minério, os teores de ferro, a estrutura e a textura das rochas que contêm o mineral-minério, a paragênese e toda uma série de parâmetros geológicos influem para que os empreendimentos minerários possam se tornar uma realidade econômica (PINHEIRO, 2008).

Como já citado, a utilização do minério se dá por minérios granulados e minérios aglomerados. Os granulados (entre 25mm e 6mm) são adicionados diretamente nos fornos de redução, enquanto os aglomerados são os minérios finos que devido à sua granulometria necessitam de aglomeração.

Independentemente se granulado ou na forma de aglomerado (sinter ou pelota), o minério de ferro, com teores médios de 65% de Fe, sílica e alumínio em torno de 3% cada e baixo fósforo (0,040 a 0,080%), é utilizado nos altos-fornos para a produção de gusa. Nos fornos de redução direta para produção de ferro-esponja específica de sílica são mais restritos. Mas, para melhor delimitar essa pesquisa, não serão consideradas todas as etapas da mineração. Considera apenas o minério de ferro que será pelletizado e terá o seu teor analisado, sendo necessário, portanto, uma breve abordagem do processo produtivo no minério de ferro e do seu beneficiamento, como exposto a seguir.

### **2.2.1 Processo produtivo e Beneficiamento de minério de ferro**

Em geral, pode-se dizer que as indústrias mineradoras de grande porte possuem um processo de produção integrado, da mina ao porto, e o fluxo desse processo tem foco no controle para garantir a alta eficiência produtiva e baixos custos operacionais e além disso, deve-se primar por operações seguras, com respeito ao meio ambiente que nos últimos anos tem sido um ponto extremamente ressaltado no processo de beneficiamento do minério. Dessa

maneira, como que expõe a SAMARCO (2010) a respeito do beneficiamento mineral: “tudo começa no processo de mineração. A lavra, que é a extração de minério de ferro, acontece na maioria das vezes em mina a céu aberto”. As reservas de minério disponíveis estão relacionadas com a produção de minério em si e a remoção de material estéril também é contemplada nesse processo. Uma frota de equipamentos móveis de grande porte, aliada ao uso de sistema de correias transportadoras inicia a logística de produção e tem o objetivo de reduzir os custos na atividade. Extrai-se que:

O beneficiamento é a área responsável pela adequação do minério para as próximas etapas do processo produtivo. Em duas plantas industriais, o minério proveniente da mina é britado, moído e separado de suas impurezas através do processo de flotação reversa, em que o contaminante é flotado (...). Após essa etapa o minério, agora transformado em polpa, estará dentro das especificações químicas e físicas necessárias para os processos subseqüentes. A polpa de minério concentrado é transportada (...) para a unidade de pelotização. Esse processo é a aglomeração para aproveitamento de minério concentrado ultrafino, transformando-o em pelotas de tamanhos tipicamente entre 8 e 16mm. Após tratamento térmico apropriado, essas pelotas adquirem características desejáveis aos processos de redução, seja no processo de alto-forno ou redução direta. As pelotas produzidas são armazenadas em um pátio com de estocagem que ofereça o maior número de dias de autonomia de produção. Estas pelotas são embarcadas em navios. (SAMARCO, 2010)

De acordo com o exposto por Luz *et al.* (2004), o termo tratamento ou beneficiamento de minérios refere-se ao conjunto de operações, aplicadas aos bens minerais, com o objetivo de modificar a granulometria, a concentração relativa das espécies minerais presentes ou a forma. Não obstante as operações devem ocorrer sem modificar a identidade química ou física dos minerais, lembrando que o mineral é todo corpo inorgânico de composição química e de propriedades físicas definidas, encontrados na crosta terrestre. Já no que se refere ao minério, este é toda rocha constituída de um mineral ou agregado de minerais, possíveis de serem aproveitados economicamente e de ganga que é o mineral, ou conjunto deles, sem valor econômico. Como já citado nesta pesquisa, a maioria dos minérios não traz benefícios se utilizados tal como são lavrados, uma vez que são constituídos também de ganga ou impurezas, daí a importância de seu beneficiamento.

Nas palavras dos autores acima citados tem-se que:

Há, no entanto, autores que defendem um conceito mais amplo para o tratamento, como sendo um processamento no qual os minerais podem sofrer até alterações de ordem química, resultantes de simples decomposição térmica ou mesmo de reações típicas geradas pela presença do calor. A aglomeração (sinterização e pelotização) de minérios finos, ustulação e calcinação são consideradas, dentro desse conceito, como tratamento de minérios; preferimos considerá-las como sendo operações pirometalúrgicas. Os termos beneficiamento e tratamento serão usados, neste texto, indistintamente (LUZ; LINS, 2004, pça.).

A figura 2-3 representa um fluxo simplificado do processo produtivo mineral da Samarco:



Figura 2-3: Processo produtivo da Samarco.  
 FONTE: Samarco, 2010.

No âmbito do beneficiamento mineral é importante mencionar as operações de concentração que consistem na separação seletiva de minerais que baseiam-se nas diferenças de propriedades próprias ou induzidas entre o mineral-minério (o mineral de interesse) e os minerais de ganga. Entre estas propriedades se citam-se: peso específico (ou densidade), suscetibilidade magnética, condutividade elétrica, propriedades de química de superfície, cor, radioatividade, forma etc.

Na maioria das situações, o processo de beneficiamento traz a exigência da separação seletiva entre dois ou mais minerais de interesse. Deve-se compreender que para um minério ser concentrado, é preciso que os minerais constituintes dos minerais estejam fisicamente liberados. Tal fato significa que uma partícula liberada deve apresentar uma única espécie mineralógica. Para se obter a liberação, o minério é submetido a uma operação de redução de tamanho por meio da cominuição, isto é, britagem e/ou moagem, que pode variar de centímetros até micrometros. Devido ao fato das operações de redução de tamanho serem onerosas dado o consumo de energia, meio moedor, revestimento etc., faz-se necessária a classificação durante as operações de fragmentação.

Luz e Lins (2004) afirmam que para a comunicação excessiva, ser evitada é feito uso de operações de separação por tamanho ou classificação (peneiramento, ciclone etc.), nos circuitos de comunicação. Após o minério ser submetido à redução de tamanho, promovendo a liberação adequada dos seus minerais, o mesmo pode ser submetido à operação de separação das espécies minerais, obtendo-se, nos procedimentos mais simples, um concentrado e um rejeito. Nos dizeres dos autores tem-se que:

O termo concentração significa, geralmente, remover a maior parte da ganga, presente em grande proporção no minério. A purificação, por sua vez, consiste em remover do minério (ou pré-concentrado) os minerais contaminantes que ocorrem em pequena proporção. Na maioria das vezes, as operações de concentração são realizadas a úmido. Antes de se ter um produto para ser transportado, ou mesmo adequado para a indústria química ou para a obtenção do metal por métodos hidropirometalúrgicos (áreas da Metalurgia Extrativa), é necessário eliminar parte da água do concentrado. Estas operações compreendem desaguamento (espessamento e filtração) e secagem e, geralmente, na ordem citada. (LUZ; LINS, 2004, pça.).

Sheid (2010) apresenta uma explicação mais objetiva considerando que os métodos de lavra e beneficiamento nas empresas de mineração possuem semelhanças e apresentam a particularidade de consumir grande quantidade de água no processo de beneficiamento. Segundo o autor “as rotas de beneficiamento invariavelmente apresentam operações de britagem, lavagem e peneiramento e apresentam um produto final “com granulometria pré-estabelecida, em geral de 25 mm (lump) e 6 mm. (hematitinha).

Segundo Araújo (2006), o beneficiamento de minérios é o tratamento industrial que prepara granulometricamente, purifica ou enriquece minérios por métodos físicos ou químicos, sem alteração da constituição química dos minerais. O beneficiamento divide o minério bruto em concentrado e rejeito. A polpa que não apresenta valor econômico é disposta como rejeito em barragens.

O processo que será considerado nesse estudo é a pelletização. Entretanto, é válido esclarecer porque é importante inserir e investir em tecnologia dentro da produção mineral e o impacto que a tecnologia tem para a mineração como um todo.

### 2.3 Importancia da tecnologia nos processos

Para compreender o quão importante são os investimentos em tecnologia para o processo produtivo mineral, exemplifica-se com o preço do minério de ferro. Este preço, é fixado para um determinado teor de ferro (base 65% Fe) e por unidade metálica (1%) em centavos de dólar (US\$ cents) em base seca. Este fato mostra que mínimas variações no conteúdo metálico originados do beneficiamento impactam fortemente o valor do minério. Além disso, é preciso compreender que na produção de minério de ferro, os elementos de custo que mais influenciam na formação dos preços são: custos de mineração, concentração e transporte (IBRAM, 2011).

Segundo o DNPM (2010), a proporção que cada item tem no processo como todo, varia de caso a caso, bem como de país para país. Outros fatores tais como o tipo de transação, o status do comprador, transporte transoceânico e condições do mercado na época da transação, são fatores também determinantes na produção mineral. “Bônus e penalidades são aplicados se os teores de ferro contido no minério estiverem fora do padrão contratado. As vendas através de contratos podem, também, determinar variação nas quantidades ( $\pm 10\%$ ), quando da negociação de preço a cada ano”.

O Ibram (2011) diz que as empresas de mineração no Brasil recentemente tem investido em tecnologia para a produção mineral. A tecnologia dentro do processo de produção de minério tem o objetivo de desenvolver processos tecnológicos inovadores nas áreas de metalurgia e mineração, especialmente no que se refere ao processo para produção de ferro e das ligas ferrosas com baixo custo de investimento e operação.

Os equipamentos e as soluções tecnológicas devem apresentar boas perspectivas em termos de competitividade e sustentabilidade ambiental, quando comparada tanto com a rota tradicional de alto-forno, quanto com as tecnologias de produção de ferro primário que usualmente se fazem presentes na indústria mineradora.

Importa ressaltar que nesse sentido, durante o beneficiamento buscam-se alternativas para evitar a perda de minério de ferro no rejeito através do controle da produção e melhorias das diversas etapas do beneficiamento do minério de ferro. Dentre as principais características do programa NTPFM estão a utilização de minério de ferro e carvão em forma de finos, design modular, alta eficiência energética, além de flexibilidade operacional com maior facilidade para desligar e reiniciar o forno (VALE, 2010).



Especialmente para o setor minerador, a tecnologia deve focar principalmente nas plantas de beneficiamento com equipamentos que trabalhem com tecnologia de ponta para beneficiar o minério de ferro, podendo promover um maior aproveitamento do material extraído das jazidas minerais. Em situações onde o minério é encontrado compacto, a melhoria tecnológica no processamento objetiva maior aproveitamento do minério e redução significativa em pilhas de estéril, por exemplo. Em usinas de beneficiamento de mineração do Brasil aponta-se que a tecnologia possibilita a adoção da modularização, tecnologia que utiliza módulos na montagem da planta (FIEMG, 2008).

Vale enfatizar que investimentos em tecnologia são uma necessidade para o mercado minerador sob o ponto de vista ambiental, possibilitando uma usina de beneficiamento de minério de ferro mais moderna com processos ambientalmente mais adequados, e que possibilitem principalmente impactos menores com recuperação de até 95% da água de processo.

Diversas outras possibilidades em termos de equipamentos e sistemas ainda estão sendo consolidados no mercado nacional de mineração e os resultados ainda estão em fase inicial, mas com a expectativa de que a pesquisa resulte em soluções que otimizem e evitem o desperdício durante o processamento mineral.

### **3. O PROCESSO DE PELOTIZAÇÃO**

#### **3.1 Conceito e panorama da pelletização no Brasil**

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

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

Segundo o estudo do CGEE (2010) para o cenário nacional atual, as diretrizes e recomendações para os processos de pelletização são baseadas na experiência brasileira que possui similaridade ao padrão mundial em termos de aglomeração. A preocupação principal decorre da minérios mais finos e incremento dos teores de fósforo e alumina em depósitos de ferro do Quadrilátero Ferrífero. Não obstante, tem-se ainda a geração de finos durante toda a cadeia produtiva e tendência a produzir DRI pirofórico (que se inflama espontaneamente em contato com o ar). Nesse contexto, duas são as diretrizes principais:

Quanto à melhoria do desempenho técnico-ambiental das plantas em operação, recomenda-se:

- Desenvolver estudos com o objetivo de aumentar a eficiência energética dos processos de pelletização e sinterização;
- Desenvolver estudos visando à diminuição e ao controle das emissões nos processos de pelletização e sinterização;

- Desenvolver pelotas e sinteres com maiores teores de ferro, visando à diminuição das emissões, ao incremento da produtividade e ao menor consumo de redutor nos altos-fornos e nos módulos de redução direta.

No que se refere ao desenvolvimento de tecnologias específicas, recomenda-se:

- Avaliar, desenvolver e implantar os processos de aglomeração a frio, tendo-se em conta as tecnologias atuais e as emergentes de redução (Tecnored, Interferro etc.);
- Apoiar os grupos de pesquisa voltados ao estudo e à produção de pelotas com contaminantes autofluxados;
- Fomentar estudos com vistas ao aperfeiçoamento dos mecanismos de micropelotização de finos nas misturas para sinterização;
- Apoiar as investigações objetivando a substituição de particulados de coque por finos de carvão de biomassas na sinterização;
- Estimular as pesquisas sobre o aperfeiçoamento do binômio especularita/processo de pelotização (CGEE, 2010).

A importância da pelotização pode ser entendida através do volume de minério pelotizado produzido no Brasil, que participa com 35% do mercado internacional de pelotas. A indústria brasileira de pelotas é competitiva tanto no mercado europeu quanto no extremo oriente que são os maiores importadores desse material. Neste segmento, alguns fatores contribuem para a vantagem competitiva do Brasil, destacando-se a abundância de minério fino e a possibilidade do aproveitamento e do enriquecimento do minério de baixo teor. É na pelotização que se agrega maior valor ao minério de ferro, possibilitando mais empregos e outros ganhos à indústria nacional (FERREIRA, 2006).

Segundo o autor acima citado, poucos países produzem pelotas de minério de ferro em grande escala: o principal é o Brasil vindo a seguir Canadá, Suécia e o Chile. Praticamente 50% das usinas de pelotização do mundo encontram-se no Brasil.

Vale mencionar que na produção de pelotas predominam as tecnologias: Lurgi-Dravo (LD) de forno reto e Grate Kiln (GK) de forno rotativo sendo que no Brasil todas as usinas de pelotização em operação utilizam o forno Lurgi-Dravo.

A distância da mina à usina de pelotização no Brasil é maior do que nos países concorrentes, onde as minas localizam-se mais perto dos portos e das usinas de pelotização. As grandes mineradoras em geral, operam com usinas próprias e possuem desempenhos

operacionais onde consomem de 35 a 40kwh/tonelada e gastam aproximadamente 1000 MJ/tonelada. Uma desvantagem da indústria brasileira de pelotas é o minério tipo hematítico: a hematita que consome cerca de 5 vezes mais energia térmica do que a magnetita (SINFERBASE, 1999).

### 3.2 Análise granulométrica e o processo de pelotização

Para se compreender um processo de pelotização, é preciso contextualizar que uma planta de minério de ferro necessita de vários equipamentos e que as principais áreas ou processos são concentração, formação de pelotas, endurecimento e manuseio. A concentração é a etapa onde o minério é reduzido a um tamanho de 80% - 45 microns e são retiradas impurezas através de flotação e separação magnética. Dessa maneira, a formação de pelotas ocorrem quando o minério fino é misturado com água e aglomerante, para criar bolas esféricas e passa através de discos de pelotização. A pelota assim formada é denominada por pelota verde. Para criar bolas esféricas. O endurecimento das pelotas verdes é feito no forno de pelotização. (FERREIRA, 2001).

O CGEE (2010) considera que o *sinter feed* ainda é a carga metálica mais importante para a siderurgia. O *sinter feed* é o produto que é aglomerado em plantas de sinterização gerando o *sínter*, que alimenta os altos-fornos. O *sínter* é um produto que possui fragmentação frágil e não apresenta resistência ao manuseio e transporte. Daí a necessidade das plantas de sinterização, serem localizadas predominantemente dentro das usinas siderúrgicas. Extrai-se do estudo que:

O pellet feed é aglomerado nas pelotizações, gerando as pelotas para alto-forno e as pelotas para redução direta. As pelotas constituem-se num material mais resistente ao manuseio do que o granulado e o *sínter*. Outra vantagem é apresentar alto nível de qualidade químico-físico-metalúrgica. Por ajustes no processo produtivo, é possível produzi-las com ampla variedade de composição química, variando-se, por exemplo: os teores de sílica e de alumina, ganga básica (óxido de cálcio + óxido de magnésio) e elementos deletérios (fósforo, enxofre, vanádio, titânio, chumbo e cloro). Embora as pelotizações possam se localizar dentro complexos siderúrgicos, usualmente elas se situam fora do ambiente das siderúrgicas. Como os investimentos em plantas de pelotização são de grande monta, as mineradoras têm assumido essa atividade e dominado o mercado mundial de pelotas (CGE, 2010, p.27) .

A pelota consiste em um produto de alta resistência mecânica, com maior teor de ferro do que os sinteres e, no que diz respeito ao processo de pelletização, este é bem mais complexo do que a sinterização no que tange ao aproveitamento de finos. (CGE, 2010).

Segundo a Metso (2010) o minério de ferro é beneficiado através da concentração e é o concentrado que deve ser pelletizado para alimentar o alto-forno ou plantas que produzem pelotas. Tal processo deve ocorrer com um custo mais baixo e qualidade mais alta e por meio de equipamentos mais modernos e maiores sistemas de alto-forno para que as plantas produzam pelotas com um custo mais baixo e qualidade mais alta. As pelotas são esferas endurecidas com alta concentração de ferro e qualidade uniforme, conforme explicado nessa seção e as plantas de pelletização produzem em geral duas variedades de pelotas: pelotas de alto forno e pelotas de redução direta (pelotas DR). As pelotas dos altos fornos “são utilizadas em processos de alto forno de coque, que é o método mais comum de produção de metal quente (ferro líquido para produção de aço). Pelotas de alto-forno são fornecidas principalmente para usinas de aço” (METSU, 2010).

Assim, espera-se que novas tecnologias de aglomeração, alternativas às plantas de sinterização (e mesmo pelletização), venham a ser desenvolvidas. Enquanto as inovações radicais não se tornam viáveis, percebe-se um esforço importante no tocante às inovações incrementais, tais como:

- Sinteres básicos auto fundentes e de alta redutibilidade;
- Mini sinterizações contínuas;
- Pelotas básicas com óxido de magnésio;
- Pelotas redução direta com colagem e inchamento padrões;
- Prensa de cilindros (rolling press) na pelletização;
- Adição de carvão em pelotas cruas;
- Reciclagem por aglomeração a frio. (DNPM, 2010)

Segundo o DNPM (2010) o processo de pelletização é considerado de suma importância no beneficiamento mineral. A granulometria do minério, deve estar em uma faixa inferior a 0,044 mm. Adiciona-se cerca de 10% de água e, geralmente, um aglomerante de natureza inorgânica, como “bentonita” em proporção de 0,5 a 0,75% de carga. Uma vez obtidas as pelotas verdes, estas são queimadas, através de vários dispositivos de aquecimento. Um deles é constituído por uma grelha contínua e móvel onde as pelotas são inicialmente secadas, depois pré-aquecidas e finalmente queimadas. Utiliza-se também um forno rotativo,

onde as temperaturas podem atingir valores da ordem de 1350 oC, a figura a seguir mostra pelotas retirados do disco de pelletização.



Figura 3-1: Minério pelletizado.  
FONTE: IPT, 2008.

## 4. ANÁLISE DE TEOR

### 4.1 Importância da análise de teor no minério de ferro

Segundo Aquino (2011), o minério de ferro fino deve atender a exigência de apresentar um teor de ferro entre 68% e 70% e possuir níveis baixos de alguns contaminantes como sílica (menor que 0,8%), fósforo (menor que 0,03%) e alumina (menor que 0,8%). Essa fração fina, quando apresenta como característica básica os teores médios de ferro sílica dentro da faixa é que tem a qualificação para ser comercializada.

O processo mais adequado para concentrar esse material fino e, conseqüentemente, elevar o teor do elemento ferro no minério e eliminar parte substancial das impurezas é a técnica de flotação. “Por meio dela, reagentes específicos atuam seletivamente no sentido de separar as partículas de óxidos de ferro daquelas partículas de contaminantes”. Vale considerar ainda que um bom resultado não seria apenas obter, ao final do processo, um minério com alta concentração de ferro para ser comercialmente viável. É preciso que se consiga um expressivo índice de recuperação metálica de pelo menos 80%. Isso significa que, de cada tonelada de minério fino processada, devem-se obter no mínimo 800 quilos de concentrado.

Os minérios de ferro têm um teor de ferro variável consoante mineral ferrífero, e de acordo com essa variação é que se pode qualificar o minério de ferro. Desta maneira tem-se que a definição de pellet feed, onde:

(...) é um tipo de minério concentrado, depois de filtrado, que atinge uma umidade de aproximadamente 10% e pode também ser comercializado para uso em pelotização ou em sinterização - processo em que duas ou mais partículas sólidas se aglutinam pelo efeito do aquecimento a uma temperatura inferior à de fusão. O pellet feed é especificado em dois diferentes produtos: PFL (pellet feed de baixa sílica) e PFN (pellet feed de sílica normal). O mercado de minério de ferro demanda pelotas com granulometria adequada (SAMARCO, 2010, s.p).

Nesse sentido é preciso conceituar a granulometria que segundo Braga (2008) “etimologicamente, significa medida dos grãos e na prática é o conhecimento da distribuição

de tamanho das partículas”. Além disso o autor esclarece que sempre existem especificações granulométricas do mercado, variando de acordo com o produto que se quer comercializar e também com o fim a que se destina. E exemplifica com as especificações granulométricas para o minério de ferro sendo: Pellet ore: 1/4"; Sinter feed: 0,105mm; Pellet feed: menor que 0,105mm.

Sacramento et. al (2010) menciona que:

Os principais ensaios de caracterização tecnológica para determinado produto minerado avaliam sua distribuição granulométrica, sua composição mineralógica e química e o grau de liberação da espécie de interesse. de 37  $\mu\text{m}$  à 100000  $\mu\text{m}$ . Conhecer a distribuição de tamanhos das partículas de um lote de minério de ferro é importante porque isso define os processos que aquela massa poderá ser submetida, como, por exemplo, a pelotização, que é aplicável para massas de granulometria “pellet feed” com teor de ferro adequado. Outros produtos mais comuns de minério de ferro, como “lump comum”, “lump”, “peble”, “natural pellet ore” e “standard sinter feed” também são importantes e caracterizados de forma rigorosa.

Segundo os autores tem-se também a Tabela 4-1 que relaciona as faixas de tamanho do minério de ferro:

**Tabela 4-1: Caracterização Minério de Ferro por granulometria**

<i>Produtos</i>	<i>Faixas de Tamanhos (mm)</i>	<i>Lump Comum</i>
Lump Comum	12,2 – 152,4 (15% é menor que 12,5)	Fe: 68 – 69 P: 0,045 Umidade: 4 – 7
	12,5 – 152,4 (10% é menor que 12,5)	Natural Pellet Ore
Lump	10,0 – 75,0 (20% é menor que 10,0)	Fe: 66 – 68 P: 0,050 Umidade: 2 – 4
	5,0 – 25,0 (10% é menor que 5,0)	Fe: 66 – 68 P: 0,060 Umidade: 2 – 4
Natural Pellet Ore	Menores que 6,35 (Máximo de 10% maior que 6,35)	Fe: 66 – 68 P: 0,070 Umidade: 2 – 4
Standard Sinter Feed	(Máximo de 42% menor que 0,15)	
	(Menores que 6,35 (Máximo de 10% maior que 6,35) (Máximo de 42% menor que 0,15)	Fe: 64,5 P: 0,070 Umidade: 4 – 6
Pellet Feed Fines	Menores que 0,15	Fe: 67,5
SiO <sub>2</sub> – teores menores que 2%	(Mínimo de 80 a 90% menores que 0,044)	P: 0,018 Umidade: 8

Fonte: Sacramento et. al (2010)



Uma composição granuloquímica de um minério de ferro está apresentada na Tabela 4-2. É possível observar os teores globais de Fe e SiO<sub>2</sub> do minério sendo de 35,34 e 48,02%, respectivamente. Nota-se, ainda, que os maiores teores de Fe são vistos nas frações mais finas do minério e o inverso se dá no que diz respeito aos teores de SiO<sub>2</sub>.

**Tabela 4-2: Análise granuloquímica de um minério de ferro**

Tamanho (µm)	% S	Teores (%)									Distribuição (%)	
		Fe	SiO <sub>2</sub>	P	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Mn	TiO <sub>2</sub>	CaO	MgO	PPC	Fe	SiO <sub>2</sub>
105	34,9	29,78	57,3	0,01	0,24	0,02	0,029	0,007	0,036	0,22	30,0	40,78
-31	27,9	32,12	53,8	0,01	0,33	0,02	0,032	0,012	0,028	0,31	25,9	30,61
-36	20,9	37,98	44,5	0,02	0,74	0,07	0,042	0,025	0,111	0,53	22,9	18,97
-38	16,3	45,19	29,04	0,04	3,66	0,10	0,053	0,075	0,255	1,92	21,3	9,65
Total recalculado		35,34	48,02	0,02	0,95	0,04	0,040	0,02	0,080	0,61	100,0	100,0

Fone: Braga, 2008.

Lopes e Lima (2010) consideram que diante de um cenário de exaustão de depósitos de minérios de ferro de altos teores é preciso utilizar métodos de concentração para obtenção de produtos que atendam às especificações da indústria siderúrgica, principal consumidora de concentrados de minério de ferro, cujos teores mínimos de Fe são da ordem de 64%. Os autores mencionam que a determinação de teor de sílica presente nos produtos do processo tem especial impacto no tratamento mineral, em especial no concentrado.

Silva (2008) esclarece que atualmente, esta determinação é feita em laboratório químico por exemplo através de espectrômetro de emissão ótica (plasma), em amostras retiradas periodicamente do processo. O intervalo de tempo entre amostragens para determinação do teor em laboratório é de cerca de 4 horas por linha de produção, o que dificulta o controle do processo desta etapa. Silva considera que um instrumento analisador que fornecesse valores de teor de sílica em intervalos mais curtos, “permitiria a atuação imediata no processo, trazendo ganhos significativos em qualidade, custo e produtividade”.

## 4.2 Do processo para a análise de teor

Explica-se que para o controle do processo de flotação em células mecânicas, é necessária a determinação de teor de sílica presente nos produtos do processo, em especial no concentrado. É comum que a maioria das indústrias mineradoras proceda com a determinação através de espectrômetro de emissão ótica (plasma) ou fluorescência de raio-x em amostras retiradas periodicamente do processo. Assim, o presente estudo mostra as diferenças entre a análise online de teor o modelo de análise laboratorial. (SILVA, 2010).

## 4.3 Processo do Analisador Online

O analisador online é considerado um produto de tecnologia revolucionária e inovadora no controle de processos minerais e de indústrias mineradoras. Cumpre mencionar que a tecnologia não está consolidada e que apenas dois testes foram realizados na produção de minério de ferro no Brasil. A figura a seguir mostra o funcionamento do referido equipamento:



Figura 4-1: Analisador online CNA - Controlled Neutron Analyzer  
FONTE: Sodern, 2011.

Trata-se de um analisador on-line de elementos químicos que pode ser instalado em correia transportadora onde também é possível analisar a umidade do mineral. A tecnologia

consiste em um tubo gerador de Nêutrons (tecnologia própria e patenteada) e que tem as seguintes aplicações:

- Controle de frente de lavra;
- Otimização, controle e formação de pilha;
- Controle da mistura (Raw Mix);
- Plantas de Pelotização;
- Plantas de flotação e lixiviação;

Os principais elementos de interesse, considerando os parâmetros analisados em um intervalo de um minuto pelo referido equipamento estão dispostos na tabela 4-3:

**Tabela 4-3: Elementos de interesse do analisador online**

• Sílica	• Níquel
• Alumina	• Cobre
• Ferro	• Potássio
• Cálcio	• Cloro
• Magnésio	• Titânio
• Enxofre	• Vanádio
• Sódio	• Oxigênio
• Manganês	• Hidrogênio
• Cobalto	• Nitrogênio

FONTE: Sodem, 2011.

Os benefícios apontados foram a possibilidade de substituição da torre de amostragem; redução do custo com análises de laboratório e tempo de resposta, a melhora da eficiência de moagem reduzindo o custo de energia e melhor controle da alimentação da pelotização e da flotação.

A figura 4-2 mostra o analisador online em funcionamento:

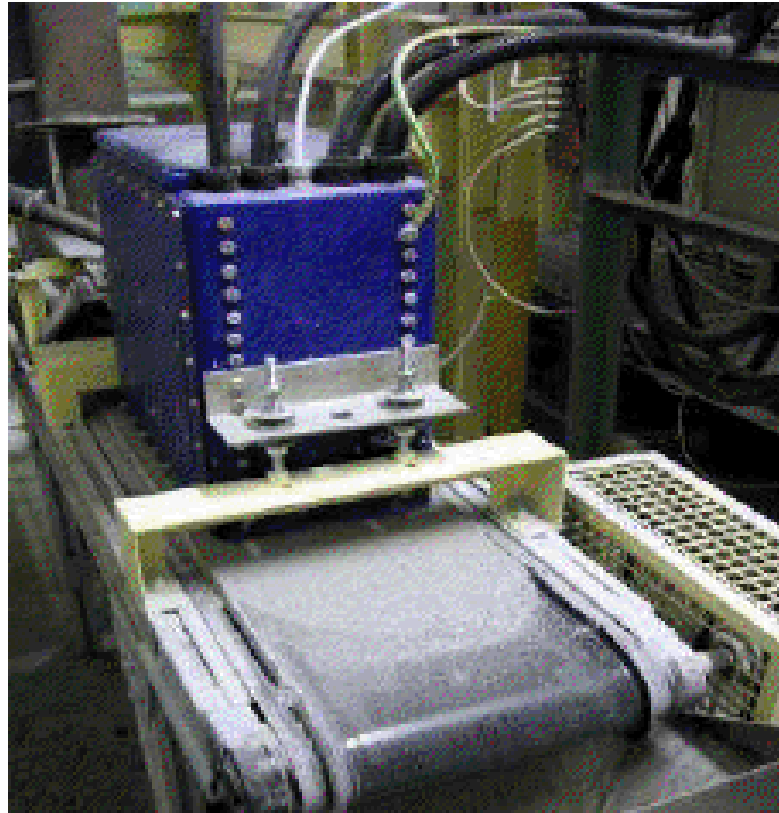


Figura 4-2: Analisador online CNA em funcionamento.  
FONTE: Sodern, 2011.

Trata-se de um equipamento para a análise do teor que atua diretamente no controle em tempo real, do processo de tratamento de minério. O equipamento instalado na correia transportadora dispensa a necessidade de empilhamento e quarteamento da amostra para análise química. Esta é feita no equipamento, em tempo mínimo (um minuto) e constante (INTER FUSÃO).

Segundo Oliveira (2012) o equipamento oferece solução para o processo de produção mineral visto que faz a triagem do material, e faz a definição dos teores com precisão químicas diferenciadas, melhora o funcionamento homogeneização, reduz o custo operacional comum aos teste laboratoriais e etc.

Quando o analisador é instalado, este oferece recursos de calibração, em relação ao equipamento em si, mas já este possui calibração integralizada e de fábrica, que é mantida ao longo do tempo. Como a saída de nêutrons é totalmente controlado, não sofre alterações e oferece estabilidade analítica no que se refere ao seu desempenho. Usando uma fonte de

nêutrons continuamente controlados e estabilizados eletricamente, garante a manutenção do mesmo nível de desempenho por um longo período (OLIVEIRA, 2012).

Vale mencionar em relação ao funcionamento do equipamento, que este possui proteção automática contra a radiação que o sistema que utiliza. Um circuito de segurança é ligado à porta de acesso da área CNA (grade ou prédio) e sempre que for aberta a porta do analisador, a área de geração de nêutrons é automaticamente desligada. Não existe nenhuma radiação quando a CNA não está em operação. Vale frisar o baixo custo de manutenção e operação pois funciona até 4 anos sem necessidade de recalibração (INTER FUSÃO, 2011).

O equipamento não possui custos adicionais para reposição da fonte ou consumíveis. Todos os componentes, conjuntos e sistemas são projetados, construídos ou integrados na empresa onde o equipamento é instalado e estão sujeitos aos mais altos níveis de exigência de segurança do mundo. O software de controle CNA é compatível com Microsoft Windows XP.

Embora tenha sido inicialmente projeto para aplicações em cimenteiras, tem sido aplicado também nos processos de tratamento do minério de ferro.

Dessa maneira pode-se compreender que os benefícios que o analisador online de teor mineral teor estão intimamente relacionados à possibilidade de dispensar a análise de teor do minério em laboratório. A seção seguinte aborda o impacto do uso do equipamento na etapa de pelotização do minério de ferro. Ressalta-se que trata-se de uma abordagem empírica, considerando dados de especialistas e em informações de empresas especializadas em equipamentos para a amostragem mineral.

## **5. ANÁLISE ONLINE APLICADO NA ETAPA DA PELOTIZAÇÃO**

O analisador online em suas aplicações nas mais diversas indústrias minerais, teve como objetivo de sua aplicação proceder a análise de material a granel com um gerador elementar de nêutrons já no início dos anos 80. A precisão da análise de teor da matéria-prima influi diretamente no controle do processo. O que antes era previsto apenas para cimenteiras teve sua aplicação remodelada para uma solução global para controle de processos para as indústrias de carvão, cimento e mineração.

### **5.1 Ganhos no controle do processo de pelotização**

O sucesso obtido na indústria cimento e setores da indústria de carvão, bem como a falta de análise on-line nas indústrias de minério levantam a potencialidade de se usar o equipamento CNA para a determinação do teor de ferro e sílica do minério.

Segundo Oliveira (2012) se a qualidade da pelota que está sendo produzida estiver fora dos parâmetros imediatamente a estratégia de controle pega essa informação para o sistema de controle de USDCD ou supervisorio, ele elabora e toma ações e para poder administrar quais são as adições mais indicadas para uma melhor qualidade da pelota como: mais fundente, menos fundente, mais ligante, menos ligante, e para produzir uma pelota de melhor qualidade precisa do minério mais rico, e é preciso identificar em qual pilha ele está, para manter a qualidade da pelota. Depois que ele fizer essas ações vai precisar realizar esse processo novamente, até ele conseguir identificar as alterações que ocorreu durante esse processo. Para melhorar a qualidade da pelota, ele vai precisar de um equipamento analisador que controla a qualidade do minério que está entrando, sua temperatura, quais os aditivos necessários, e quando a pelota estiver no processo de saída, o equipamento analisador identifica se ela é de boa ou má qualidade. E com esse equipamento ajuda não só monitora a qualidade da pelota, como também a entrega do produto mais rápido.

Se a qualidade da pelota que está sendo produzida estiver fora dos parâmetros porém estabelecidos pela empresa (cliente), imediatamente, a estratégia de controle, por meio dos indicadores de teor fornecidos pelo analisador online, registra tais informações (teor) e alimenta o sistema de controle (de USDCD ou supervisorio) e tem condições para a tomada de decisão no que se refere à administração dos aditivos (reagentes) mais indicados para

uma melhor qualidade da pelota tais como: mais fundente, menos fundente, mais ligante , menos ligante.

Um balanço entre minérios mais “ricos” pode ser melhor conduzindo em um processo de pelletização, e sabendo em tempo real qual o teor do minério de ferro que está na correia transportadora em tempo real, pode-se contrabalancear os tipos de minério existentes de maneira a produzir uma pelota de melhor qualidade. Sendo necessário identificar em qual pilha ele está, para manter a qualidade da pelota, não se perde tempo com a análise laboratorial, a informação é dada *full time* (OLIVEIRA, 2012).

Oliveira afirma que posteriormente às ações necessárias para realizar esse processo de tomada de decisão na pelletização perde muito no tempo gasto com a análise laboratorial, se for possível identificar as alterações de teor em tempo real, tem-se a possibilidade de melhorar a qualidade da pelota, daí é que o analisador online pode ter uma contribuição direta e positiva no processo de pelletização. Portanto, trata-se de um equipamento analisador que controla a qualidade do minério que está entrando, sua temperatura, quais os aditivos necessários, e quando a pelota estiver no processo de saída, o equipamento analisador identifica se ela é de boa ou má qualidade. E com esse equipamento auxilia não só no monitoramento, mas, na qualidade da pelota , assim como no tempo do processo de pelletização e portanto na finalização do processo de beneficiamento do minério de ferro.

## 6. CONCLUSÕES

- Este trabalho evidenciou o desafio da indústria mineral frente ao investimento tecnológico e o foco no potencial econômico do aproveitamento dos minérios e este está intimamente relacionado às condições geológicas e metalogenéticas das jazidas. Pôde-se compreender que o minério de ferro deve atender, por um processo de beneficiamento, à exigência de mercado, afim de garantir as especificações acordadas.
- Os teores do minério definem a qualidade da pelota e, nesse sentido, os equipamentos devem oferecer precisão e agilidade que auxiliem no monitoramento e no controle das plantas e dos sistemas de tratamento do minério de ferro.
- Analisar online o teor do minério de ferro possibilita produzir pelotas com um custo mais baixo e qualidade mais alta. Considerando que o minério de ferro é quase que totalmente utilizado na indústria siderúrgica para a obtenção de ferro e aço e a variação do teor de ferro deve ser mínima, sendo fundamental determinar este teor na produção de pelotas.
- Diante do processo laboratorial que usualmente é realizado para obtenção do teor do minério, o analisador *online* pode trazer impactos diretos na produtividade da pelotização, pois determina o teor de sílica presente nos finos de minério de ferro em tempo real e portanto, através do maior controle do processo qualifica melhor a pelota produzida. Sendo a análise de teor rápida e confiável, esta certamente impacta nos parâmetros que determinam a qualidade dos pellets.



## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AQUINO, José Aury de . Teor Mineral Disponível em: <  
[revista.fapemig.br/materia.php?id=203](http://revista.fapemig.br/materia.php?id=203)>. Acesso em 12 de fev. de 2013.

ARAÚJO, Cecília Bhering de. Contribuição ao estudo do comportamento de barragens de rejeito de mineração de ferro. Dissertação. Engenharia Da Universidade Federal Do Rio De Janeiro Como Ciências Em Engenharia Civil. 2006. CD ROOM.

BRAGA, Antonio Celso de Oliveira. Métodos Geométricos Aplicados nos Estudos de Captação e - Unesp. 2008. Disponível em: <  
[www.rc.unesp.br/igce/aplicada/.../BRAGA/.../Geometricos-V4.pdf](http://www.rc.unesp.br/igce/aplicada/.../BRAGA/.../Geometricos-V4.pdf)>. Acesso em 12 de fev. de 2013.

BOHMELETZ, P.M. Industrialização dos fins de minério de ferro: pelotização. In: Congresso anual da Associação Brasileira de Metais, 18., Belo Horizonte, 1963.

CGEE. Centro de Gestão e Estudos Estratégicos Siderurgia no Brasil. 2010-2025. subsídios para tomada de decisão – Brasília: Centro de Gestão e Estudos Estratégicos, 2010. Série Documentos Técnicos, 9.

CPRM, 2010. Serviço Geológico do Brasil. CPRM (2000). Análise econômica das pequenas e médias empresas de mineração. Relatório Final. Ministério de Minas e Energia. Secretaria de Minas e Metalurgia. Serviço Geológico do Brasil, Brasília, 124p.

DNPM. 2010. Beneficiamento Mineral. DNPM. Disponível:  
<http://www.dnpm.gov.br/beneficiamento.htm>. Aceso em 18 de mar. de 2013.

DNPM. 2011. Produção mineral 2010. Mineração no Brasil Disponível:  
<http://www.dnpm.gov.br/produção.htm>. Aceso em 18 de mar. de 2013.

DNPM. 2008. Reservas Minerais. Mineração no Brasil – Guia do investidor Disponível:  
<http://www.dnpm.gov.br/guia2008.htm>. Aceso em 18 de mar. de 2013.

DNPM. 2010. Anuário Mineral Brasileiro. Disponível no site:  
<https://sistemas.dnpm.gov.br/SCM/extra/site/admin/pesquisarProcessos.aspx>. Acesso em e de abr. 2013.

ENGEDRAR, 2011. Analisador on line. Disponível: < [www.engendrar.com.br](http://www.engendrar.com.br)>. Acesso em: 21 de fev. 2013.

FERREIRA, Murilo Pinto de Oliveira. Pelotização. 2006. Disponível: < [www.vale.com.br/pt-br/investidores/resultados.../FR\\_2011\\_p.pdf](http://www.vale.com.br/pt-br/investidores/resultados.../FR_2011_p.pdf)>. Acesso em: 21 de fev. 2013.

FERREIRA, C. E. L. GONÇALVES, J. E. A. & COUTINHO, R. Community structure of fishes and hábitat complexity on a tropical rocky shore. *Environmental Biology of Fishes*, 61:353–369p., 2001..

FIEMG, 2008. Mineração. Disponível: < [www5.fiemg.com.br/Default.aspx?tabid=13766](http://www5.fiemg.com.br/Default.aspx?tabid=13766)>. Acesso em: 21 de fev. 2013.

GIL, Antônio C. *Gestão de Pessoas: Como Elaborar Projeto de Pesquisa*. 3. Ed. Reimp. – São Paulo: Atlas, 1991.

GIL, A.C. *Métodos e técnicas de pesquisa social*. São Paulo: Atlas, 1999.

GOLDENBERG, M., *A arte de pesquisar - Como fazer pesquisa qualitativa em Ciências Sociais*. Rio de Janeiro: Record, 1999.

IBRAM, 2012. Mineração no Brasil. Disponível: <[www.ibram.org.br/150/15001002.asp?ttCD\\_CHAVE=160379](http://www.ibram.org.br/150/15001002.asp?ttCD_CHAVE=160379)>. Acesso em: 21 de fev. 2013.

INTERFUSÃO. Analisador. Disponível: <[www.interfusao.com.br/instrumentos\\_de\\_processos.php](http://www.interfusao.com.br/instrumentos_de_processos.php)>. Acesso em: 21 de fev. 2013.

LIMA, R. M. F., LOPES, P. R. G., , The Infrared Spectra ofAmine Collectors Used in the Flotation of Iron Ores, *Minerals Engineering*, Vol. 18,2006. p. 267-273

LUZ, A. B. da et alii. *Tratamento de minérios*. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2004. 858 p.

LUZ, J. A. M. da. Aspectos reológicos de polpas em sedimentação. In: CIMINELLI, R. R. et alii (Ed.). In: CONGRESSO DA ABM, 64. Anais... São Paulo: ABM, 2009. p. 1-11. CDROM.LUZ, A. B., LINS, F. F. *Usinas de Beneficiamento de Minérios do Brasil*. 2004.p.93-102. Slides.

METSO. Processo de pelotização. 2010. Disponível em: [www.metso.com.br/pelotizacao](http://www.metso.com.br/pelotizacao). Acesso em 11 de abr. 2013.

MME. Ministério de Minas e Energia. 2011. Produção de minério de ferro. Cartilha impressa.

MOURÃO, José Murilo. NT Minério de Ferro e Pelotas. Situação Atual e Tendências 2025. Estudo Prospectivo do Setor Siderúrgico: 2008. Brasília: Centro de Gestão e Estudos. Estudo Prospectivo para Energia Fotovoltaica: 2008. Brasília: Centro de Gestão e Estudos Estratégicos, 2008.

OLIVEIRA, Faria Denílson. Analisadores online de teor. Informação verbal. Primeira entrevista realizada em 11 de fevereiro de 2013. Belo Horizonte.

PINHEIRO, João César de Freitas. A Mineração Brasileira de Ferro e a Reestruturação do Setor Siderúrgico. Tese de Doutorado – UNICAMP. Campinas: 2000.

PORTAL BRASIL. 2010. Potencial de exploração. Disponível em: <imenteiras, hoje tem sido testado >. Acessado em 05 de mar. de 2013.

SAMARCO. 2010. Beneficiamento do minério. Disponível em: [www.samarco.com.br/beneficiamento.html](http://www.samarco.com.br/beneficiamento.html). Acesso em 22 de mai. 2013.

SANTOS, Marcos Gomes. Produção de um pellet feed a partir da concentração dorejeito da flotação mecânica da SAMARCO. Belo Horizonte: Curso de Pós- Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas – Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), 2008.

SACRAMENTO et. al 2010. Caracterização tecnológica de minério de ferro. em: [www.samarco.com.br/beneficiamento.html](http://www.samarco.com.br/beneficiamento.html). Acesso em 22 de mai. 2013.

SCLIAR, Cláudio. Política Governamental Brasileira de Fomento à Exploração Mineral e Propostas de Aprimoramento. 2010. SGM/Ministério de Minas e Energia –

MME. Disponível em: < [www.mme.gov.br](http://www.mme.gov.br)>. Acessado em 11 de outubro de 2013.

SCHEID, Alexandre - Peneiramento de minério de ferro de Corumbá. 2010. MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO E DO DESPORTO Universidade Federal de Ouro Preto Escola de Minas -Departamento de Engenharia de Minas Pós-Graduação Lato Sensu em Beneficiamento Mineral. Versão Impressa.

SILVA, Edna Lúcia da; MENEZES, Estera Muszkat. Metodologia da pesquisa e elaboração de dissertação. 3. Ed. Ver. Atual. Florianópolis: Laboratórios de Ensino a Distância da UFSC, 2001.

SILVA, L. A. D.; FERREIRA, A. M. Analisadores Químicos On-Line Utilizados na Indústria de Beneficiamento de Minério de Ferro: Pré-Requisitos, Benefícios e Riscos a Serem Avaliados Para Aquisição. IX Simpósio Brasileiro de Minério de Ferro, Ouro Preto, 25 a 28 Novembro 2009.

SILVA, A. J. D. Sistema de Medição Teor de Sílica em Minério de Ferro por Análise de Imagem. Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração, São Paulo, I, janmar 2005. 64-67.

SILVA, Edna Lúcia da; MENEZES, Estera Muszkat. Metodologia da pesquisa e elaboração de dissertação . 3. ed. Ver. Atual. Florianópolis: Laboratórios de Ensino a Distância da UFSC, 2001.

SODERN. Analisadores online. Disponível em:<  
[www.sodern.com/sites/en/.../References\\_113.htm](http://www.sodern.com/sites/en/.../References_113.htm)>. Acesso em 30 de mai. 2013.

TERRA, Lygia; COELHO, Amorim Marcos de. Geografia Geral e Geografia do Brasil - Espaço natural e socioeconômico. 2009. Capítulo 11: Minerais e Rochas: panorama mundial. Disponível em: < [www.moderna.com.br/pnlem2009/fazendo/.../aula\\_geo\\_ligia.ppt](http://www.moderna.com.br/pnlem2009/fazendo/.../aula_geo_ligia.ppt)>. Acessado em: 09 de mar. de 2013.

VALE (2010). Pelotização. Disponível em:< [www.vale.com/pt-br/...a-vale/.../producao-de-pelotas-em-oma.aspx](http://www.vale.com/pt-br/...a-vale/.../producao-de-pelotas-em-oma.aspx)>. Acesso em 30 de mai. 2013.

VIEIRA, A.M. Estudo da viabilidade técnica da concentração de um minério de ferro de baixo teor. Belo Horizonte: Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, 1994. 174p. (Dissertação de Mestrado).