

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
Escola de Engenharia
Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas

Adriana Carla Vieira

**ESTUDO DA INFLUÊNCIA DE DIFERENTES TIPOLOGIAS DE MINÉRIO DE
FERRO NO CONSUMO DE ENERGIA NO PROCESSO DE REMOAGEM**

Belo Horizonte

2024

Adriana Carla Vieira

ESTUDO DA INFLUÊNCIA DE DIFERENTES TIPOLOGIAS DE MINÉRIO DE FERRO NO CONSUMO DE ENERGIA NO PROCESSO DE REMOAGEM

Dissertação de Mestrado apresentada ao curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial para a obtenção do Grau de Mestre profissional em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas.

Área de concentração: Tecnologia Mineral

Orientador: Dr. Roberto Galery

Coorientador: Andréia Bicalho Henriques

Belo Horizonte

2024

V658e	<p>Vieira, Adriana Carla.</p> <p>Estudo da influência de diferentes tipologias de minério de ferro no consumo de energia no processo de remoagem [recurso eletrônico] / Adriana Carla Vieira. - 2024.</p> <p>1 recurso eletrônico (64 f. : il., color.) : pdf.</p> <p>Orientador: Roberto Galery. Coorientadora: Andréia Bicalho Henriques.</p> <p>Dissertação (mestrado profissional) - Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.</p> <p>Bibliografia: f. 61-64. Exigências do sistema: Adobe Acrobat Reader.</p> <p>1. Engenharia de minas - Teses. 2. Tecnologia mineral - Teses. 3. Moagem (Beneficiamento de minério) - Teses. 4. Minérios de ferro - Teses. 5. Energia - Consumo - Teses. I. Galéry, Roberto. II. Henriques, Andréia Bicalho. III. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. IV. Título.</p> <p style="text-align: right;">CDU: 622(043)</p>
-------	----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------



ATA DA DEFESA DA DISSERTAÇÃO DA ALUNA **ADRIANA CARLA VIEIRA**

Realizou-se, no dia 28 de março de 2024, às 13:00 horas, demin, da Universidade Federal de Minas Gerais, a defesa de dissertação, intitulada *Estudo da influência de diferentes tipologias de minério de ferro no consumo de energia no processo de remoagem*, apresentada por ADRIANA CARLA VIEIRA, número de registro 2022681899, graduada no curso de ENGENHARIA METALÚRGICA, como requisito parcial para a obtenção do grau de Mestre em ENGENHARIA METALÚRGICA, MATERIAIS E DE MINAS, à seguinte Comissão Examinadora: Prof(a). Roberto Galery - Orientador (Universidade Federal de Minas Gerais), Prof(a). Andreia Bicalho Henriques (UFMG), Prof(a). Leonardo Junior Fernandes Campos (UFMG), Prof(a). Luiz Claudio Monteiro Montenegro (Departamento de Engenharia de Minas - UFMG).

A Comissão considerou a dissertação:

Aprovada

Reprovada

Finalizados os trabalhos, lavrei a presente ata que, lida e aprovada, vai assinada por mim e pelos membros da Comissão.

Belo Horizonte, 28 de março de 2024.

Documento assinado digitalmente
gov.br ROBERTO GALERY
Data: 17/04/2024 11:02:59-0300
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Prof(a) Roberto Galery (Doutor)

Documento assinado digitalmente
gov.br ANDREIA BICALHO HENRIQUES
Data: 17/04/2024 12:56:02-0300
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Prof(a). Andreia Bicalho Henriques (Doutora)

Documento assinado digitalmente
gov.br LEONARDO JUNIOR FERNANDES CAMPOS
Data: 17/04/2024 11:37:33-0300
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Prof(a). Leonardo Junior Fernandes Campos (Doutor)

Documento assinado digitalmente
gov.br LUIZ CLAUDIO MONTEIRO MONTENEGRO
Data: 17/04/2024 13:06:49-0300
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Prof(a). Luiz Claudio Monteiro Montenegro (Doutor)

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus, por sempre estar ao meu lado.

Agradeço à minha família por sempre me apoiar e incentivar aos estudos.

Ao meu orientador Roberto Galéry e minha coorientadora Andréia Bicalho Henriques por ter me acolhido nesta jornada.

A Fundação Gorceix por todo apoio técnico e financeiro na realização dos testes, em especial ao meu gestor Jefferson Mendes pelo grande apoio e incentivo.

RESUMO

Dentro da indústria, o funcionamento dos moinhos é fortemente influenciado pela moabilidade das diferentes tipologias dos minérios de ferro. Além disso, devido aos custos que se tem com os processos de fragmentação, qualquer melhoria na operação proporciona uma importante economia no processo.

Neste trabalho foram estudadas as características de 3 diferentes amostras de minério de ferro do quadrilátero ferrífero denominadas de *pellet feed AV*, *pellet feed BS* e *pellet feed CB*, provenientes de 3 minas distintas. As amostras em estudo são provenientes do processo de concentração por separação magnética. Para avaliar a qualidade desses minérios, essas amostras foram caracterizadas por processos físicos, químicos e mineralógicos, como também foram avaliados o comportamento das mesmas durante o processo de remoagem. As etapas experimentais consistiram de análises de densidade, granulometria, mineralogia, difração de raios-X, superfície específica, química, perda por calcinação e testes de moagem. O foco do estudo foi a correlação das características investigadas e como estas influenciam os resultados dos ensaios de moabilidade. Os resultados dos experimentos, realizados com os *pellet feeds*, demonstraram uma forte correlação da mineralogia com o consumo de energia na etapa de remoagem. De fato, ao avaliar o último tempo de moagem dos minérios em estudo os *pellet feeds AV* e *CB* alcançaram a granulometria de 90% passante em 44 μ m, o que não ocorreu para o minério *BS*. Por outro lado, em relação à superfície específica “*blaine*”, os minérios *BS* e *CB* atenderam o parâmetro desejado industrialmente ($1800 \pm 30 \text{cm}^2/\text{g}$) para o processo de pelotização, já o minério *AV* não alcançou tal especificação.

Palavras-chave: *Pellet Feed*; remoagem; consumo de energia.

ABSTRACT

Within the industry, the operation of mills is strongly influenced by the grindability of different types of iron ores. Furthermore, due to the costs associated with fragmentation processes, any improvement in the operation provides important savings in the process.

In this work, the characteristics of 3 different samples of iron ore from the iron quadrangle called *pellet feed AV*, *pellet feed BS* and *pellet feed CB*, coming from 3 different mines, were studied. The samples under study come from the magnetic separation concentration process. To evaluate the quality of these ores, these samples were characterized by physical, chemical and mineralogical processes, as well as their behavior during the regrinding process. The experimental stages consisted of analyzes of density, granulometry, mineralogy, X-ray diffraction, specific surface, chemistry, calcination loss and grinding tests. The focus of the study was the correlation of the investigated characteristics and how they influence the results of grinding tests. The results of the experiments, carried out with pellet feeds, demonstrated a strong correlation between mineralogy and energy consumption in the regrinding stage. In fact, when evaluating the last grinding time of the ores under study, the *pellet feeds AV* and *CB* reached a particle size of 90% passing at 44 μ m, which did not occur for the *BS* ore. On the other hand, in relation to the specific “*blaine*” surface, the *BS* and *CB* ores met the industrially desired parameter (1800 \pm 30cm²/g) for the pelletizing process, while the *AV* ore did not reach this specification.

Keywords: Pellet Feed; regrinding; energy consumption.

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1- Região do quadrilátero ferrífero com os municípios integrantes.....	16
Figura 3.2 - Corpos moedores mais usuais (Von Kruger, 2004).....	18
Figura 3.3 - Representação gráfica do moinho de bolas usado nos testes e diagrama esquemático do circuito fechado de moagem (Barbato <i>et al.</i> , 2007)	27
Figura 3.4 - Fotomicrografias dos principais tipos texturais de cristais de óxidos e óxido-hidróxidos de ferro (Adaptação de Silva <i>et al.</i> , 2003).....	32
Figura 4.1 - Quadrilátero ferrífero (Piuzana, 2011).....	34
Figura 4.2 - Fluxograma da metodologia.....	35
Figura 4.3 - Moinho utilizado para o estudo de moabilidade.....	39
Figura 5.1 - Correlação entre a densidade, o %Fe e o %PPC dos <i>Pellet feeds</i>	41
Figura 5.2 - Análise granulométrica.....	42
Figura 5.3 - Análise mineralógica.....	43
Figura 5.4 - Imagem ótica (MOLR) da amostra de <i>Pellet feed</i> AV do material retido em 0,105mm.....	44
Figura 5.5 - Imagem ótica (MOLR) da amostra de <i>Pellet feed</i> BS do material retido em 0,105mm.....	44
Figura 5.6 - Imagem ótica (MOLR) da amostra de <i>Pellet feed</i> BS do material retido em 0,105mm.....	45
Figura 5.7 - Difratoograma da amostra de <i>pellet feed</i> AV.....	46
Figura 5.8 - Difratoograma da amostra de <i>pellet feed</i> BS.....	46
Figura 5.9 - Difratoograma da amostra de <i>pellet feed</i> CB.....	46
Figura 5.10 Análise gráfica comparativa das granulometrias <i>pellet feed</i> AV.....	48
Figura 5.11 - Estudo de moabilidade <i>pellet feed</i> AV.....	48
Figura 5.12 Análise gráfica comparativa das granulometrias <i>pellet feed</i> BS.....	49
Figura 5.13 - Estudo de moabilidade <i>pellet feed</i> BS.....	50
Figura 5.14 Análise gráfica comparativa das granulometrias <i>pellet feed</i> CB.....	51
Figura 5.15 - Estudo de moabilidade <i>pellet feed</i> CB.....	52
Figura 5.16 - Estudo de moabilidade.....	53
Figura 5.17- Função quebra versus função seleção <i>pellet feed</i> AV.....	53
Figura 5.18- Função quebra versus função seleção <i>pellet feed</i> BS.....	54
Figura 5.19.-Função quebra versus função seleção <i>pellet feed</i> VB.....	54

Figura 5.20 - Superfície específica dos produtos das moagens.....	55
Figura 5.21 - Correlação entre a superfície específica e o índice de moabilidade.....	55
Figura 5.22 - Correlação entre o diâmetro médio da alimentação e o índice de moabilidade.....	56
Figura 5.23 - Correlação entre o %PPC e a superfície específica.....	57

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 - Correlação dos moinhos, da alimentação e da %sol na moagem (Adaptado de Taggat, 1945).....	19
Tabela 3.2 - Condição de moagem do ensaio segundo o método de Donda.....	28
Tabela 4.1 - Parâmetros operacionais para testes em bancada.....	37
Tabela 5.1 - Densidade dos <i>Pellet feeds</i>	40
Tabela 5.2 - Análise química dos <i>pellet feeds</i> AV,BS e CB.....	40
Tabela 5.3 - Análise granulométrica inicial dos <i>pellet feeds</i> AV,BS e CB.....	42
Tabela 5.4 - Estudo de moabilidade do <i>pellet feed</i> AV.....	47
Tabela 5.5 - Estudo de moabilidade do <i>pellet feed</i> BS.....	49
Tabela 5.6 - Estudo de moabilidade do <i>pellet feed</i> CB.....	51
Tabela 5.7 - Análise do estudo de moabilidade dos <i>pellet feeds</i> AV,BS e CB.....	52

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
2	OBJETIVOS	14
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
3.1	Minério de Ferro e o Quadrilátero Ferrífero.....	15
3.2	Processos de Fragmentação	16
3.3	Teoria da Moagem.....	17
3.3.1	Regime de Operação dos Moinhos.....	22
3.3.2	Moagem com barras.....	23
3.3.3	Moagem com bolas.....	23
3.4	Consumo de Energia.....	24
3.5	Índice de Trabalho (WI) (Método Bond).....	25
3.6	Índice de Moabilidade (Método Donda).....	28
3.7	Caracterização Tecnológica.....	29
4	METODOLOGIA	34
4.1	Descrição da Metodologia.....	34
4.2	Análise Granulometria	35
4.3	Análise Química	35
4.4	Densidade real.....	35
4.5	Análise Mineralógica por Microscopia Ótica.....	36
4.6	Análise de Difração de raios-X.....	36
4.7	Estudo de Moabilidade - Método Fundação Gorceix.....	37
4.8	Condições dos Ensaios.....	37
4.9	Aplicação do Ensaio de Moabilidade.....	37
4.10	Análises de <i>Blaine</i>	39

5	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	40
5.1	Caracterização Física e Química dos <i>Pellet feeds</i> (AV, BS e CB).....	40
5.2	Avaliação Mineralógica e Difração de raios-X da Alimentação de Moagem.....	43
5.2.1	Análise Mineralógica.....	43
5.2.2	Análise de Difração de raios-X.....	45
5.3	Avaliação do Estudo de Moagem.....	47
6	CONCLUSÕES.....	58
7	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	60
8	REFERÊNCIAS.....	61

1. INTRODUÇÃO

A indústria mineral convive, ao longo do tempo, com a menor disponibilidade de minério com alto teor de ferro. Esse fato conduz para iniciativas que estimulam o uso de tecnologias e equipamentos de fragmentação que promovem a liberação e permitem concentrar minérios de menor teor de ferro contido.

No entanto, as etapas de redução granulométricas implicam em um maior custo devido ao alto consumo de energia. Diante disso, o consumo energético, do ponto de vista do processo, é a variável que melhor reflete o comportamento dos diferentes tipos de minérios submetidos à etapa de moagem.

Assim, o estudo dessa variável fornece a previsão do consumo específico de energia para os moinhos industriais. Também a caracterização tecnológica abrangendo a composição mineralógica, a redução granulométrica em uma malha específica e a composição química, fornece importante embasamento no entendimento do consumo energético característico do minério. (Cordeiro, 2021; Rodrigues e Brandão, 2018; Parapari, 2020).

Na pesquisa realizada por (Rodrigues e Brandão, 2018), fica claro que a classificação dos minérios quanto à compacidade, não deve ser baseada apenas na estratificação granulométrica, já que essa não traz relação direta com a resistência à fragmentação.

Assim, a tipologia do minério deve ser fundamentada pela composição mineralógica, já que minérios semi-compactos e compactos apresentam diferentes resultados de valores energético, sendo os minérios anfíbolíticos mais duros, com maiores valores de solicitação energética, e os minérios essencialmente especularíticos e martíticos com menor resistência ao processo de cominuição, com valores de exigência energética próximos aos minérios friáveis (Rodrigues e Brandão, 2018).

O presente trabalho envolve a avaliação das características e da qualidade de diferentes minérios, classificados granulometricamente como *pellet feeds* grosseiro. Também busca entender o comportamento dessas amostras durante a remoagem. O estudo busca correlacionar as propriedades físicas, químicas e mineralógicas dos minérios com o consumo de energia na remoagem.

2. OBJETIVOS

O estudo do trabalho proposto possui os seguintes objetivos abaixo.

- **Objetivo Geral**

Avaliar a influência das propriedades físicas, químicas e mineralógicas de diferentes *pellet feeds* no consumo de energia na remoagem. O estudo proposto ajudará a prever qual mina ou região oferece o minério com melhores características para a moagem.

- **Objetivos específicos**

- Caracterização física, química e mineralógica dos *pellet feeds*;
- Avaliar a correlação das propriedades físicas, químicas e mineralógicas dos diferentes *pellet feeds* estudados;
- Realizar estudo do comportamento dos *pellet feeds* no processo de remoagem;
- Avaliar e comparar a granulometria e a superfície específica dos produtos das remoagens.
- Determinar a influência das propriedades estudadas e das correlações estabelecidas dos diferentes *pellet feeds* estudados.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Minério de Ferro e o Quadrilátero Ferrífero

No território Brasileiro, as principais regiões produtoras de minério de ferro são: o Quadrilátero Ferrífero, a Província Mineral de Carajás e a região de Corumbá, essas contêm depósitos em rochas constituintes de FFB (formações ferríferas bandadas), chamadas no país de itabirito.

De acordo com o autor Dorr (1964), o minério itabirito é considerado “a rocha mãe de todos os minérios de ferro”. A sua formação se dá a partir de ferro laminado e metamorfoisada apresentado normalmente como hematita, mas também podendo ser encontrada como magnetita, goethita ou martita, e que se intercala com formações de quartzo cristalino, produto de recristalização do chert ou jaspe (Dorr, 1964, 1969).

Os minérios de ferro explorados para fins comerciais são os seguintes: itabirito, hematita e canga. Os diferentes minérios de ferro explorados comercialmente no Brasil têm teores elevados de ferro e quantidades pequenas de elementos indesejados nos processos siderúrgicos, como o enxofre, o alumínio, o fósforo e os carbonatos (Carvalho, *et al.*, 2014).

Na região do Quadrilátero Ferrífero estão localizadas as grandes reservas de minério de ferro. Estes podem ser classificados de forma geral em dois grupos principais: os itabiríticos (minérios de mais baixo teor de ferro), mais heterogêneos e contendo óxidos e hidróxidos de ferro, e os hematíticos de alto teor, quimicamente mais homogêneos e ricos em óxidos de ferro (Rosière, 1983). Ambos os minerais compõem o Run of Mine (ROM), minério lavrado direcionado para o primeiro estágio de fragmentação, em que são utilizados britadores de mandíbulas (Costa, 2013).

As análises mineralógicas de amostras de itabiritos compactos de minas do Quadrilátero Ferrífero mostram majoritariamente a presença de hematita e quartzo podendo conter, em alguns casos, uma pequena proporção de goethita. Esta classificação é utilizada para denominar itabiritos com menor ação de intemperismo e, conseqüentemente, apresentam liberação mais fina, maior tenacidade e menor teor de ferro (Pinto *et al.*, 2019; Ribeiro, 2011). Na Figura 3.1 segue a localização da região do quadrilátero ferrífero e os municípios integrantes.

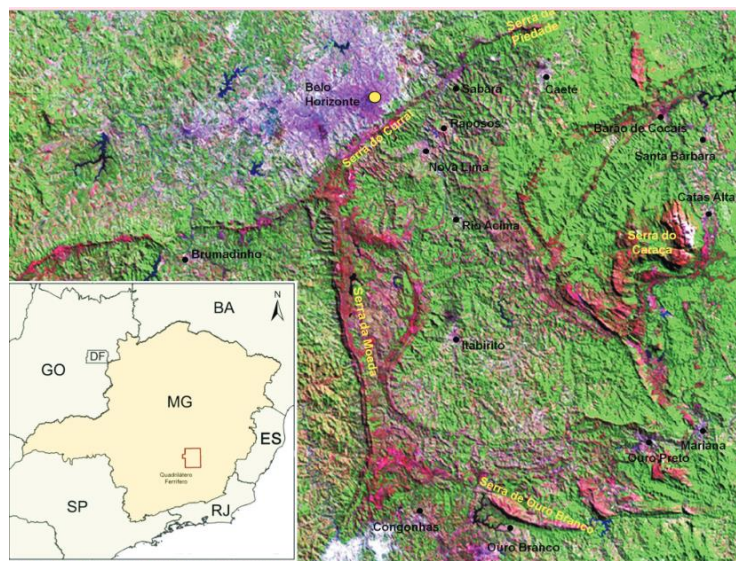


Figura 3.1. Região do quadrilátero ferrífero com os municípios integrantes.

Os minérios da região do quadrilátero ferrífero possuem a característica de ser bastante friável e com uma alta quantidade de finos naturais. Segundo os estudos de (Turrer *et al.*, 2013), ele observou que o itabirito friável possui grãos de quartzo maiores que a amostra de itabirito compacto. Esta diferença poderia justificar o maior consumo energético da amostra de itabirito friável. Essa é uma das razões da dificuldade de se prever o comportamento desse material durante o processo de moagem.

O minério de ferro dessa região é objeto de estudo para vários autores, em destaque o estudioso Donda que procurou estudar um pouco do comportamento desse minério durante o processo de moagem e as variáveis que influenciam os resultados (Donda, 2003).

3.2 Processos de Fragmentação

Em virtude do crescimento econômico mundial há uma elevada demanda de minério de ferro. Neste sentido, a exploração das reservas cada vez mais pobres tem sido justificada, e para o bom aproveitamento desses minérios, torna-se necessário um tratamento mais complexo para se atingir principalmente teor em Fe e grau de liberação das partículas (Chagas, 2008).

Dentro do processamento mineral, o processo de cominuição é o fator responsável pela maior parcela de consumo de energia, que pode ser responsáveis por 30% a 50% do consumo energético da usina representando tipicamente 50% dos custos operacionais de uma mineração. Por essa razão é que se estuda há mais de um século meios de se reduzir o consumo de energia nessa etapa (CETEM, 2008, Cohen, 1983).

Os autores Chaves & Peres (2006), considera que os circuitos de processamento é composto

por uma sequência de operações unitárias, que tem como finalidade atender às características específicas de cada minério. Neste sentido, os processos de fragmentação têm por finalidade reduzir as partículas minerais ao tamanho adequado as diversas operações de beneficiamento a que vão ser submetidas.

Na maioria dos minérios, os minerais de interesse normalmente se encontram associados aos minerais de ganga. Dessa forma, precisam ser reduzidos em tamanho, por fragmentação para que as partículas resultantes seja constituída, idealmente, por uma única espécie mineral (Chaves e Peres, 2006).

O primeiro processo, no caso a britagem, reduz o tamanho do minério ROM – Run of Mine até a granulometria ideal para alimentar a moagem, e é nesse último estágio em que as partículas são reduzidas, pela combinação de mecanismos de impacto, abrasão e compressão, a um tamanho adequado à liberação do mineral, que geralmente é concentrado nos processos subsequentes. Dependendo da malha de liberação, cada minério tem sua relação de redução específica (Wills, 2007 e Cetem, 2018).

Com o intuito de se evitar uma redução excessiva do minério, faz-se uso de operações de separação por tamanho ou classificação (peneiramento, ciclone etc.), nos circuitos de fragmentação. Uma vez que o minério foi submetido à redução de tamanho, promovendo a liberação adequada dos seus minerais, estes podem ser submetidos à operação de separação das espécies minerais, obtendo-se, nos procedimentos mais simples, um concentrado e um rejeito (Cetem, 2010).

3.3 Teoria da Moagem

De acordo com o trabalho de Luz *et al.* (2004), a moagem é a etapa de fragmentação do minérios que requer maiores investimentos, maior gasto de energia e é considerada uma operação importante para o bom desempenho de uma instalação de tratamento. Assim, percebe-se que a moagem deve ser muito bem estudada na fase de dimensionamento e escolha de equipamentos e, também, muito bem controlada na etapa de operação da usina.

Para Chaves & Peres (2006), os objetivos principais da moagem são para se obter a liberação das espécies minerais, adequação de produtos às especificações granulométricas industriais, facilitar o transporte em minerodutos, adequação de granulometrias para os processos subsequentes e o aumento da área de superfície para facilitar as reações químicas em processos hidrometalúrgicos.

A etapa de moagem é normalmente realizada em equipamentos cilíndricos, chamados

moinhos tubulares. Esses contêm corpos moedores e são livres para se mover dentro do moinho, e assim produzir a fragmentação do minério. No processo, são usados diversos tipos de corpos moedores como barras, bolas, cilindros curtos (chamados cylpebs) de aço, pedaços de rocha dura, ou em alguns casos, partículas do próprio minério (Von Krüger, 2004).

A Figura 3.2 apresenta os corpos moedores mais freqüentemente empregados no setor mineral.

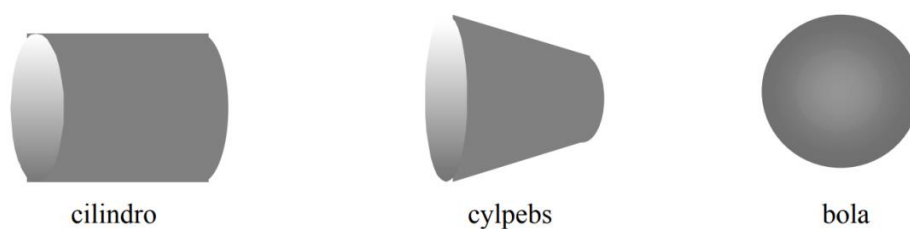


Figura 3.2. Corpos moedores mais usuais (Von Kruger, 2004).

De acordo com Kallembäck (2012), na etapa de moagem há algumas variáveis que podem alterar o desempenho desse processo, como:

- As características do minério: distribuição granulométrica da alimentação, forma inicial das partículas, moabilidade e composição mineralógica;
- Heterogeneidade da alimentação;
- Taxa de alimentação;
- Condições operacionais dos equipamentos, tais como grau de enchimento, velocidade de rotação do moinho e distribuição de tamanhos dos corpos moedores.

Nos estudos desenvolvidos por Ribeiro *et al.* (2002), foi observado a influência do formato do corpo moedor, neste caso, o autor fez uma comparação do uso de carga moedora de cylpebs e de bolas, na eficiência da moagem para produção de “*pellet feed*”. E observou-se uma melhoria de eficiência de moagem, ou seja, o menor tamanho de partícula obtido, com a menor energia consumida, em um menor tempo de moagem. E isso representou cerca de 26%, quando se substituiu uma carga de cylpebs de 28 mm por uma de bolas formada por 50% de bolas de 30 mm e 50% de bolas de 40 mm de diâmetro.

O processo de moagem de minério de ferro utilizando cargas de barras e bola é considerada como o circuito mais econômico do ponto de vista de consumo energético, bem como o de maior investimento (Beraldo, 1984).

Nos estudos desenvolvidos por Wills (1977) apud Von Krüger (2004), observou-se que o tamanho, a quantidade, o tipo de movimento e os espaços entre os corpos moedores no interior de um moinho vão influenciar a moagem. A moagem é um processo aleatório sujeito

às leis da probabilidade e o grau de moagem de uma partícula de minério vai depender da sua probabilidade de penetrar numa zona entre os corpos moedores e da probabilidade da ocorrência de algum evento posterior.

No processo de moagem o movimento dos corpos moedores dentro do cilindro é realizado pela ação rotativa, planetária, vibratória, ou ainda, pela agitação. A denominação do tipo de moinho irá depender do tipo de corpos moedores nele usado (Tavares, 2009).

A eficiência do processo de moagem é dependente da área superficial dos corpos moedores. Neste sentido, esses devem ter o menor tamanho possível e a carga deve ser graduada de modo que as bolas maiores sejam pesadas o suficiente para moer as partículas mais duras e com maiores tamanhos da alimentação (Wills, et al., 2006).

Segundo o autor Von Krüger (2004) existem, também, custos que podem ser chamados de indiretos e estão ligados à eficiência da moagem e que são influenciados pela forma, pelo tamanho máximo dos corpos moedores, pela sua distribuição granulométrica e também por sua densidade.

As variações na eficiência, além de se refletirem numa variação do consumo específico de energia, devem também ser consideradas tanto na adequabilidade do produto às suas especificações finais quanto na sua compatibilidade com os processos subsequentes.

Na Tabela 3.1 segue a relação do tipo de moinho, do tamanho da partícula na alimentação, e da % sólido a ser utilizado no processo de moagem.

Tabela 3.1. Correlação dos moinhos, da alimentação e da % sólido na moagem.

Tipos de moinhos	Granulometria da alimentação e % sólidos				
	6,73 a 1,2 (mm)	1,2 a 0,6 (mm)	0,6 a 0,3 (mm)	0,3 a 0,212 (mm)	0,212 mm
Barras	80 a 60%	75 a 70%	70 a 65%		
Bolas (descarga por transbordo)	75 a 50%	80 a 65%	85 a 65%	85 a 65%	80 a 60%
Bolas (descarga de grade)	80 a 75%	75 a 65%	80 a 70%	85 a 70%	80 a 65%

Fonte: Adaptado de Taggat (1945).

Os tamanhos corretos para compor a carga de bolas do moinho são determinados através de tentativa e erro, apesar de várias fórmulas terem sido propostas para determinar a relação entre o tamanho das bolas e o tamanho das partículas minerais. Geralmente em se tratando de moagem primária, utilizam-se bolas com tamanhos que variam entre 10 e 5 cm de diâmetro, enquanto para moagem secundária, utilizam-se bolas de 5 a 2 cm de diâmetro (Wills, et al., 2006).

É importante mencionar que o tamanho dos corpos moedores influenciam na eficiência e

capacidade do moinho. Assim a determinação do diâmetro máximo da barra ou da bola é de grande importância, visto que o tamanho próprio das bolas a serem adicionadas num moinho em operação é o tamanho adequado para quebrar as maiores partículas da alimentação (Figueira *et. al.*, 2004).

A teoria da moagem relaciona a energia utilizada para a obtenção de uma granulometria de produto, a partir de uma granulometria de alimentação. Walker *et al.* (1937), descreve a teoria geral da moagem como:

$$dE = -C \frac{dx}{x^n} \quad \text{Equação (1)}$$

E – energia de moagem por unidade de massa

C – constante do minério a ser moído

x – granulometria da partícula

n – constante do moinho

O autor Austin (1973), discorda da equação de Walker, pois a considerada absurda, uma vez que na moagem a massa é conservada e certa quantidade de partículas finas é produzida juntamente com partículas de granulometria próxima à original. Assim, ele ilustra isso através da lei de Rittinger mostrada na equação 2.

O autor Wills (2007) cita as três teorias da cominuição, sendo elas:

1. A teoria do autor Von Rittinger de 1867, que diz que a energia consumida na redução da granulometria é proporcional à área da nova superfície produzida. A área de superfície de uma partícula de diâmetro uniforme é inversamente proporcional ao diâmetro.

$$E = K \left(\frac{1}{D_2} - \frac{1}{D_1} \right) \quad \text{Equação (2)}$$

Onde:

E = energia

D1 = diâmetro inicial

D2 = diâmetro final

K = constante

Analisando a teoria de Rittinger, Austin (1973) explica que na moagem, onde o produto moído é composto por partículas grossas e partículas finas, as áreas de todas essas partículas compõem a área total de nova superfície produzida e não somente as partículas grossas. Assumindo que a energia é constante, a área de superfície produzida na moagem é

proporcional ao tempo de moagem e a granulometria de alimentação.

2. A Teoria de Kick de 1885, mostra que o trabalho necessário é proporcional à redução em volume das partículas. A relação de redução é:

$$R = f^{80}/p^{80} \quad \text{Equação (3)}$$

Onde,

F80 = é a malha que 80% da alimentação é passante

P80 = é malha que 80% do produto é passante.

Ainda de acordo com a lei de Kick, a energia requerida para que uma partícula saia de uma granulometria x_f para uma granulometria x_p é proporcional a:

$$E = k \log\left(\frac{x_f}{x_p}\right) \quad \text{Equação (4)}$$

3. A Teoria de Bond de 1952, se baseia na ideia de que o trabalho realizado é proporcional à quebra da partícula. Em partículas de formas similares, a área da superfície é inversamente proporcional ao diâmetro.

$$w = \frac{10w_i}{\sqrt{p}} - \frac{10w_i}{\sqrt{f}} \quad \text{Equação (5)}$$

Onde:

W = Consumo energético (kWh/t);

W_i = Work Index (kWh/st);

P = Diâmetro que deixa passar 80% do produto (μm);

F = Diâmetro em que deixa passar 80% da alimentação (μm).

O autor Austin (1973) fez uma análise sobre as três leis da moagem e concluiu que as teorias de Bond e de Rittinger podem ser verdadeiras para um mesmo intervalo de dados, indicando compatibilidade entre as duas leis. Neste sentido, vale ressaltar que cada uma das leis de fragmentação é válida, preferencialmente, para um intervalo granulométrico. É que a formulação matemática de Bond é a mais aplicável para o intervalo granulométrico característico da moagem.

3.3.1 Regime de Operação dos Moinhos

O autor Beraldo (1984), afirma que o regime de operação dos moinhos está entre 60 a 85% da velocidade crítica, lembrando que de acordo com a velocidade utilizada no processo, o regime de operação será classificado como cascata ou catarata e que essa variável influencia a potência requerida pelo moinho.

Um revestimento mais liso favorece o regime cascata e existe uma predominância de moagem por atrito, sendo mais aplicados em moagem fina. Conforme Luz (2010), na moagem em cascata a velocidade baixa do moinho e o alto fator de enchimento fazem com que as bolas ao alcançarem uma certa altura, rolem sobre as outras, não havendo quase impacto e a moagem se dá por abrasão e atrito. Neste regime para se obter um produto com granulometria mais fina deve-se utilizar como corpo moedor bolas menores, um alto fator de enchimento e revestimentos lisos favorecem para o efeito cascadeamento.

O revestimento mais rugoso do moinho favorece a operação em regime de catarata e é mais recomendável para uma moagem mais grossa. Na moagem em catarata a velocidade do moinho carrega as bolas até uma posição bem elevada e essas caem sobre as outras bolas e sobre a polpa causando fragmentação por impacto. Grande parte dos autores salientam que este tipo de regime é adequado para moer um minério com partículas mais grosseiras e para reduzir a produção de finos, deve-se ainda priorizar o uso de bolas maiores para se obter mais energia dos corpos moedores e baixo porcentagem de enchimento (Luz, 2010).

O revestimento dos moinhos protege o cilindro do desgaste provocado pelo atrito com os corpos moedores e com o material da alimentação e, também, reduz o deslizamento da carga moedora dentro da carcaça. Esses podem ser feitos tanto de ligas metálicas quanto de borracha, ou a combinação destes.

O fator de enchimento, que é também uma importante variável operacional, se relaciona com os corpos moedores à medida que é definido como a porcentagem do volume do moinho ocupado com esses corpos, incluindo os vazios entre eles.

A porcentagem de sólidos na polpa está relacionada com a granulometria da alimentação e do tipo de moinho. Logo, uma polpa mais diluída proporciona uma moagem menos eficiente, pois as partículas sólidas se encontram mais dispersas, reduzindo os choques entre elas e as bolas (Beraldo, 1984).

Nos estudos de Chaves e Peres (2012), observa-se que a quantidade de água no processo influencia a velocidade das partículas presentes no interior do moinho, a viscosidade e a

densidade da polpa, por isso a porcentagem de sólidos é uma variável importante e deve ser analisada cuidadosamente.

Os moinhos podem ser utilizados para a moagem a seco ou a úmido, segundo Chaves e Peres (2003), em tratamento de minérios o processamento via úmida é regra geral, devido à razão básica de que a água é um excelente meio de transporte e dissipação de calor. Adicionalmente, ela por si só resolve o problema de abatimento das poeiras.

Neste sentido, Tavares (2009), fez uma comparação entre a moagem a seco e a úmido e observou-se que a moagem a úmido necessita aproximadamente 30% menos energia. Entretanto, caso for necessária a secagem do material, essa diminuição é mais do que compensada pelos custos da secagem. Também o desgaste de corpos moedores e revestimentos é de 3 a 5 vezes maior na moagem a úmido. E que devido à alta taxa de desgaste na moagem a úmido, a contaminação do produto é muito maior do que na moagem a seco.

Vale a pena destacar que, segundo Figueira *et. al.*, (2004), quando o material a ser moído apresenta reações químicas ou físicas com a água, utiliza-se a moagem a seco. Esta causa menor desgaste no revestimento e no corpo moedor, entretanto ocorre a produção de grande quantidade de finos.

3.3.2 Moagem com barras

O moinho de barras é normalmente utilizado na moagem primária recebendo o minério com granulometria que varia de $3/4$ a $3/8$ de polegada (19 a 9,53 mm). O meio moedor, sendo formado por barras de peso considerável, torna este moinho apto a moer material mais grosso, pois a queda de uma barra produz um impacto significativo. O impacto é o mecanismo de fragmentação predominante no moinho de barras. O moinho geralmente trabalha em circuito aberto. O moinho de bolas em regime de catarata também pode ser alimentado com material grosso (3 a 4 mm), mas geralmente trabalha em circuito fechado com classificador, pois, apesar de predominar o impacto, a abrasão e o atrito também têm ação destacada (CETEM, 2018).

3.3.3 Moagem com bolas

O moinho de bolas, em regime de cascata, é o mais utilizado em moagem secundária com a finalidade de fragmentar o minério na malha requerida ao processo subsequente. A

alimentação deve ser mais fina e é constituída do produto da moagem primária feita em um moinho de barras ou de bolas, em regime de catarata.

Em ambos os processos de moagem os tempos de moagem devem ser ajustados para os minérios caso esses atinjam ou excedam muito o d_{90} . Na moagem primária recomenda-se iniciar com uma energia de 8 kwh/t, já no processo de remoagem 12 kwh/t e a partir da informação obtida com essa energia faz-se as outras moagens. Geralmente são realizadas 4 moagens em tempos distintos para então plotar um gráfico de tendência (Donda e Rosa, 2014).

3.4 Consumo de Energia

De acordo com o trabalho Kawatra e Eisele (1988), o consumo de energia no processo de moagem na indústria de beneficiamento mineral é muito significativo, uma vez que em média, esse consumo atinge cerca de 25% do total requerido para o processamento global da usina. Tem-se que somente menos de 5% dessa energia é efetivamente destinada à geração de nova superfície, logo, otimizar o processo de moagem está diretamente relacionado com a otimização do consumo de energia.

Bond e Rowland desenvolveram equações para moinhos de grande e de pequeno porte que permitem calcular a potência absorvida por tonelada de corpos moedores. De posse dessa potência e com o tempo de moagem, pode-se obter a energia consumida para uma determinada tarefa de moagem, que é dada pelas granulometrias da alimentação e do produto. O autor Wills (2007), reafirma que menos de 1% da energia total utilizada no moinho de bolas é aproveitada na redução da granulometria, já que a maior parte da energia é dissipada na forma de calor. Além disso, um material plástico vai consumir energia alterando sua forma, sem criação de nova superfície. Todas as teorias assumem que o material é frágil e que nenhuma energia é adsorvida no processo.

Nos estudos de Luz (2010), ele também aborda que a energia demandada para o processo de moagem não é toda utilizada na quebra da partícula. Pois, a movimentação dos corpos moedores consome grande parte da energia fornecida ao moinho, assim como outros fatores influenciam no consumo de energia dos moinhos. São estes: velocidade de operação, fração do volume do moinho ocupado pela carga de meio moedor (fator enchimento), porcentagem de sólidos na polpa, tamanho do meio moedor e carga circulante.

Dentro do processo de moagem são realizadas análises granulométricas e determinações da superfície específica da amostra da alimentação e dos produtos de moagem. Assim com os

resultados pode-se determinar o consumo de energia para atingir uma determinada superfície específica e/ou a fração passante em uma determinada malha (Beraldo, 1984).

A energia calculada é considerada como uma função do trabalho de moagem, e tem validade em condições bastante limitadas. Assim, sabe-se que o trabalho útil do processo, o qual está ligado a uma função do diâmetro das partículas, é uma fração muito reduzida da energia consumida nos próprios equipamentos de cominuição (Beraldo, 1984).

3.5 Índice de Trabalho (WI) (Método de Bond)

Após muitos anos de estudos sem sucesso, Fred Bond publicou, em 1952, as conclusões de seu estudo, no qual estabelece que a energia necessária para fragmentar um determinado minério é inversamente proporcional à raiz quadrada do diâmetro das partículas. Bond, então, estabelece a relação entre energia consumida e grau de fragmentação, sendo esta utilizada até os dias atuais, conhecida como a Terceira Lei da Cominuição.

$$E = 10W_i \left(\frac{1}{\sqrt{P_{80}}} - \frac{1}{\sqrt{F_{80}}} \right) \quad \text{Equação (6)}$$

onde W_i é o índice de trabalho (em inglês, work index) de Bond, calculado pela (Equação 7), representando o nível de resistência de um determinado material em ser cominuído, ou seja, a energia específica por tonelada do material (kWh/t) para reduzir a partícula de um tamanho infinito até 80% passante em 100 μm . O índice de trabalho (WI) ou índice de moabilidade (K_b) é um parâmetro definido por Bond para prever a resistência do minério a cominuição (Figueira *et al.*, 2004).

$$W_i = \frac{44,5}{P_i^{0,23} * Gbp^{0,82} * \left(\frac{10}{\sqrt{P_{80}}} - \frac{10}{\sqrt{F_{80}}} \right)} \quad \text{Equação (7)}$$

Onde:

P_i = abertura da malha teste em μm .

Gbp = Massa líquida de “undersize” produzida/ número de revoluções.

F_{80} e P_{80} - tamanho em que passa 80 % da alimentação e do produto.

Bond (2003) e Rowland (1997) desenvolveram equações para moinhos de grande e de pequeno porte que permitem calcular a potência absorvida por tonelada de corpos moedores.

De posse dessa potência e com o tempo de moagem, pode-se obter a energia consumida para uma determinada tarefa de moagem, que é dada pelas granulometrias da alimentação e do produto.

$$kWb = 6,3 \times D^{0,3} \times \text{sen} \left(51 - 22 \times \left(\frac{2,44 - D}{2,44} \right) \right) \times (3,2 - 3 \times V_p) \times C_s \times \left(1 - \frac{0,1}{2^{(9 - 10 \times C_s)}} \right) \quad \text{Equação (8)}$$

kWb – quiloWatts por tonelada de bolas no eixo pinhão ;

D – diâmetro do moinho, em metros, interno ao revestimento;

VP – fração do volume do moinho ocupado pelas bolas;

CS – fração da velocidade crítica.

Os resultados podem ser expressos na forma de uma curva logarítmica, cuja equação é:

$$E = \frac{1}{k} \ln \left(\frac{\%F}{\%P} \right) \quad \text{Equação (9)}$$

Onde:

E = consumo específico líquido de energia específica em kWh/t;

F = massa retida de partículas na malha de interesse na alimentação do circuito;

P = massa retida de partículas na malha de interesse no produto do circuito;

k = parâmetro característico do minério para a malha de interesse, naquela condição de moagem.

O método além de ser usado para prever o consumo energético, o W_i também é usado no escalonamento de moinhos de dimensões maiores e condições diferentes às do ensaio padrão a partir do ajuste da equação de energia específica com o auxílio de fatores de correção (Kallembach, 2012).

O ensaio para determinar o WI, em laboratório, é conduzido em um moinho padrão, usado para essa finalidade, cujo desenho esquemático, bem como o diagrama do circuito fechado encontra-se na Figura 3.3 (ABNT – NBR 11376). A moagem é conduzida, a seco, em circuito fechado, com a carga circulante de 250%, quando a operação atinge o seu estado de equilíbrio.

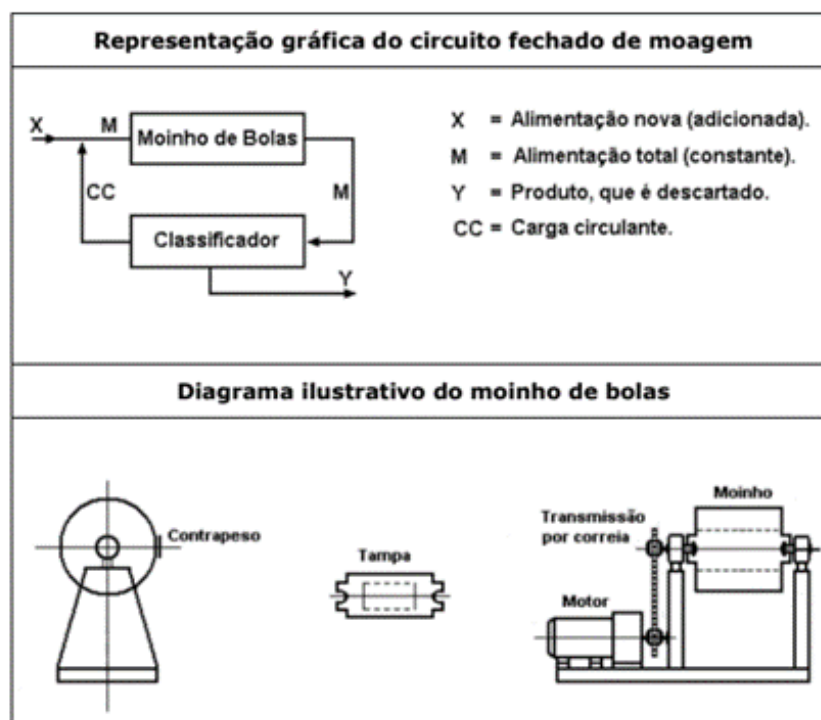


Figura 3.3. Representação gráfica do moinho de bolas usado nos testes e diagrama esquemático do circuito fechado de moagem (Barbato *et al.*, 2007).

O ensaio de WI (*Work Index*) se tornou uma referência quanto à moabilidade, devido a sua metodologia prática e à sua extensa base de dados. Na literatura, também há diversas variações da metodologia de Bond, adotadas tanto sob o viés da simplificação do ensaio quanto sob aquele da sua adaptação a condições específicas. Porém, não há consenso na literatura especializada sobre a aplicação do método de Bond à moagem fina (Rosa, 2019).

Os autores (Rowland, 1982 e Bakker, 2014) afirmam que o ensaio de Bond não é adequado quando a razão de redução for inferior a 6:1, o que é pertinente à maioria das aplicações de moagem fina. Nesse caso, recomenda utilizar uma malha inferior à da aplicação industrial (para garantir a razão de redução mínima) ou a aplicação de um ensaio de remoagem “especial”. Além disso, o ensaio de Bond é válido para P₈₀ até 75 micrômetros.

O ensaio de WI é o parâmetro mais amplamente utilizado no dimensionamento de moinhos de Bond. Entretanto, dependendo das características físicas do minério nem sempre é possível determiná-lo de forma adequada. Já que alguns minérios, ao serem preparados para o teste padrão de Bond, geram uma quantidade excessiva de finos, obtendo um valor de F80 muito pequeno. Este fato trará uma distorção para os valores encontrados de work index e resultará em uma situação não prevista pela norma para determinação do BWI (Ferreira, 2015).

O autor Austin *et al.* (1984), aborda em seus estudos as deficiências do método de Bond, sendo essas:

- ✓ O método de Bond não leva em consideração as seguintes variáveis que influenciam a operação em circuito fechado como a carga circulante, a eficiência do classificador, a distribuição e nível de enchimento da carga de bolas, as diferentes reologias da polpa e as variações no nível de polpa no interior do moinho (devido a variações nas taxas de alimentação) e também o design do revestimento;
- ✓ A referência granulométrica utilizada é estritamente F80 e P80, sem considerar a distribuição em sua amplitude;
- ✓ Não inclui variações na distribuição de tempo de residência (devido à geometria do moinho);
- ✓ Não distingue claramente as causas da ineficiência de operação do moinho, em determinadas condições.

As deficiências apresentadas pelo método de Bond podem determinar desvios da ordem de 20% entre experimental e industrial, o que pode ser ainda maior, para moinhos de maiores diâmetros, como os que têm sido implantados em novos projetos no Brasil e no mundo (Herbst e Fuerstenau, 1980 e Tavares, 2013).

3.6 Índice de Moabilidade (Método Donda)

Em um estudo realizado nos concentradores da empresa Samarco, que sempre se destinaram ao tratamento de itabiritos de baixos teores, observou-se que os ensaios de moagem tradicionais, como o de Bond, não eram assertivos em prever o consumo específico de energia dos circuitos industriais. Diante desse obstáculo, foram desenvolvidos métodos para ensaios de bancada pela própria equipe técnica da empresa, tanto para a moagem primária quanto para a remoagem, conforme (Donda, 2003; Donda, 1999).

Tabela 3.2. Condição de moagem do ensaio segundo o método de Donda.

Parâmetro	Condições	
	Ensaio de moagem primária	Ensaio de remoagem
Alimentação	- 9,52 mm	- 1,00 mm
Moinho	12" x 12" (304,8 x 304,8 mm)	10" x 10" (254 x 254 mm)
Rotação	70% da velocidade crítica	65% da velocidade crítica
Carga de bolas	30,6 kg, escalonada entre 63 a 25 mm	18kg, escalonada entre 30 a 15 mm
Porcentagem de enchimento do moinho	30%	30%
% Sólidos da polpa	79%	75%
Massa de amostra por ciclo	5,0 kg (p/ densidade de sólidos de 3,8 g/cm ³)	3,5 kg (p/ densidade de sólidos de 4,95 g/cm ³)

Fontes: Donda, Galinari e Rabelo (1999) e Donda (2003).

DONDA (2003) desenvolveu e validou o método de previsão de consumo de energia em moinhos industriais, que basicamente faz a aplicação das equações de Bond-Rowland (equação 8 e 9) para o cálculo do consumo de energia, aplicando diferentes níveis de energia na moagem, em moinho de laboratório, utilizando diferentes tempos de moagem.

O tempo de moagem é convertido em consumo específico de energia através da equação adaptada de Rowland. A aplicação dessa equação é que permite a simplificação dos procedimentos, uma vez que não são necessárias medições do consumo de energia. O método é simples, padronizável, utiliza pequenas quantidades de material e é facilmente reproduzível. São feitas três moagens com tempos que vão corresponder a cerca de 6, 12 e 18 kWh/t. A alimentação e os produtos das três moagens são analisados granulométricamente e têm a sua superfície específica determinada pelo método de *Blaine*. Com esses resultados pode-se determinar a energia necessária para se atingir uma determinada superfície específica ou o passante em uma determinada malha de controle.

No estudo de moagem, elas são feitas em diferentes tempos, de tal forma que em cada uma delas seja aplicada uma quantidade de energia preestabelecida, por exemplo, 5 kWh/t, 10 kWh/t e 15 kWh/t (Donda, 2003).

Segundo Von Krüger (2004), diversos são os métodos de se avaliar a moabilidade de um minério, sendo o mais conhecido o Método de Bond, que é inadequado para o caso de moagem fina. Para o caso de moagem fina, são bem aceitos os métodos baseados na lei de Rittinger, que diz que o trabalho necessário para a fragmentação é proporcional à nova superfície gerada.

O termo moabilidade é definido pela razão entre a superfície gerada e a energia consumida para a obtenção da mesma. Esse cálculo é expresso pela unidade $(\text{cm}^2/\text{g})/(\text{kWh}/\text{t de minério})$. Esse valor calculado tem sido considerado um parâmetro para medir a previsibilidade do desempenho dos moinhos e a qualidade do produto moído (Conti *et. al.*, 2001).

3.7 Caracterização Tecnológica

A morfologia dos minerais interfere na granulometria do produto obtido na moagem, bem como na energia necessária para atingir o grau de liberação adequado para a concentração.

Assim, a definição da tipologia dos minérios, obtida em função de suas características granuloquímicas e mineralógicas, são essenciais para otimização de reservas e melhores resultados no beneficiamento. Entretanto, muitas vezes, esta definição tipológica é baseada apenas em dados granuloquímicos (friável/compacto, rico/pobre) e petrográficos, o que pode

acarretar em uma definição errônea ou não adequada (Rocha, 2008).

A caracterização tipológica como a composição mineralógica, a redução granulométrica em uma malha específica e a composição química, fornecem importante embasamento no entendimento do consumo energético na etapa de moagem (Cordeiro, 2021 e Rodrigues e Brandão, 2018, Parapari, 2020).

- Granulometria

Nos estudos desenvolvidos por (Chagas, 2008), ele correlacionou o diâmetro médio das partículas na alimentação como o valor da moabilidade, assim ele observou que outras variáveis influenciam no valor dessa propriedade, ou seja, a granulometrias da alimentação sozinha não é suficiente para se afirmar se um determinado material é moído com mais facilidade ou não.

Para Wills (2007), a granulometria do produto moído depende da forma como o mineral minério está disperso na ganga e do processo de concentração subsequente a ser utilizado.

Outro ponto relevante no estudo da remoagem de *pellet feeds* e que requer o controle dos principais parâmetros de qualidade do produto remoído como a superfície específica e a porcentagem passante em 44 μ m.

- Química

Em referência ao trabalho de (Bueno, 2019), observa-se que os minérios mais porosos e com maior PPC, apresentaram maior geração de área superficial específica, já os minérios menos porosos e com menor PPC foram os que geraram uma distribuição granulométrica com maior percentual passante na malha de 0,044 mm. O autor explica que tal fato pode estar relacionado à saturação dos minérios, onde os minérios mais porosos e com maior PPC apresentaram uma saturação mais pronunciada que os minérios com menores porosidades e valores de PPC.

- Mineralogia

A Vale realizou um estudo com o intuito de entender a relação entre o índice de moabilidade dos minérios de ferro e sua microestrutura, para tal pesquisa, ela estudou as características

microscópicas dos minérios e diante dos resultados dos ensaios descontínuos de moagem em laboratório para levantamento dos parâmetros das funções seleção e quebra de diferentes tipos de minérios.

Assim, Silva (2003) apud Ribeiro (2004), observou-se que a maior resistência à moagem é apresentada por minérios de menor proporção de partículas policristalinas é atribuída ao mecanismo de quebra dos cristais, enquanto nos minérios mais policristalinos ocorre o destacamento de cristais. Observaram-se também nos ensaios que as partículas monocristalinas aumentam com o tempo de moagem à medida que seu tamanho vai diminuindo.

No estudo de Ribeiro (2004), ele avaliou a influência da moagem do minério de ferro utilizado no complexo de pelotização da Vale em Vitória, no que diz respeito à geração de superfície específica e com base no desaparecimento do material em 44 μ m.

O autor agrupou as morfologias e mineralogias e as classificou na seguinte ordem crescente de moabilidade com relação à superfície específica:

- i) hematita lobular;
- ii) hematita lamelar e especular;
- iii) hematita granular;
- iv) martita; goethita e limonita;
- v) hematita microcristalina.

Já a classificação para a relação à taxa de desaparecimento do material no tamanho de 44 μ m encontrada por Ribeiro (2004) foi:

- i) hematita lobular;
- ii) martita, goethita e limonita;
- iii) hematita granular;
- iv) hematita lamelar e especular;
- v) hematita microcristalina.

A Figura 4.3 traz fotomicrografias em microscopia óptica dos principais tipos texturais de cristais de óxidos e óxido-hidróxidos de ferro.

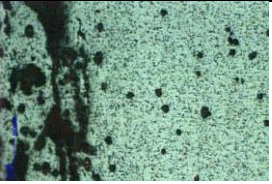


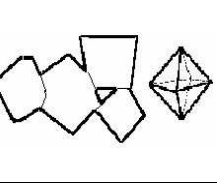

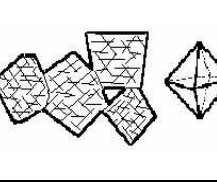
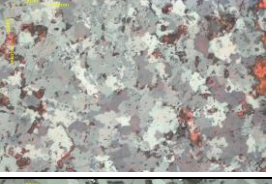
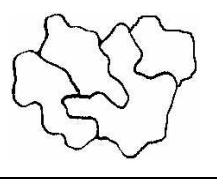
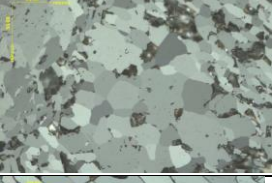
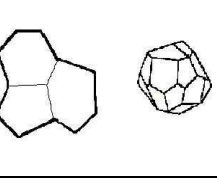

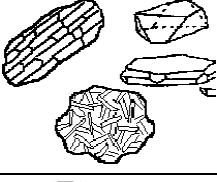

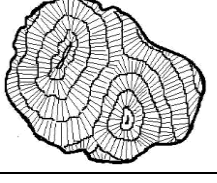
TIPO	CARACTERÍSTICAS	FORMA E TEXTURA	ILUSTRAÇÃO ESQUEMÁTICA
HEMATITA MICRO-CRISTALINA	<ul style="list-style-type: none"> • Cristais muito pequenos, <math><10\mu\text{m}</math>. • Textura porosa. • Contatos pouco desenvolvidos. 		
MAGNETITA	<ul style="list-style-type: none"> • Cristais euédricos, isolados ou em agregados. • Cristais compactos. 		
MARTITA	<ul style="list-style-type: none"> • Hematita com hábito de magnetita. • Oxidação segundo os planos cristalográficos da magnetita. • Geralmente porosa. 		
HEMATITA LOBULAR (OU RECRISTALIZADA)	<ul style="list-style-type: none"> • Formatos irregulares inequidimensionais. • Contatos irregulares, geralmente imbricados. 		
HEMATITA GRANULAR	<ul style="list-style-type: none"> • Formatos regulares equidimensionais. • Contatos retilíneos e junções trípticas. • Cristais compactos. • Comprimento do cristal menor que o dobro da largura. 		
HEMATITA LAMELAR (OU TABULAR)	<ul style="list-style-type: none"> • Hábito tabular; cristais compactos inequidimensionais. • Contatos retilíneos. • Chamada especular quando a largura do cristal é cinco ou mais vezes menor que o comprimento. 		
ÓXIDO-HIDRÓXIDOS DE FERRO (GOETHITA-LIMONITA)	<ul style="list-style-type: none"> • Material amorfo ou microcristalino. • Estrutura coliforme, hábito botrioidal. • Textura porosa. 		

Figura 3.4. Fotomicrografias dos principais tipos texturais de cristais de óxidos e óxido-hidróxidos de ferro (Adaptação de Silva *et al.*, 2003).

Segundo Ferreira (2013), a liberação mineral é obtida pela redução do tamanho de partículas ao longo dos processos de cominuição, como a britagem e, principalmente, a moagem. Neste sentido, acredita-se que quanto maior a dureza do minério, maior a dificuldade para a obtenção do grau de liberação e, que também há uma correlação entre a liberação mineral e a fragmentação, já que quanto mais fina a fragmentação mais liberada devem estar as fases minerais e quanto maior o grau de liberação melhor o desempenho das etapas consequentes de concentração como a flotação.

- Superfície Específica

A medida da área superficial específica de um *pellet feed* ou de uma produto de moagem é um parâmetro importante para garantir a qualidade física das pelotas e, portanto, é um parâmetro de controle fundamental do circuito de remoagem para a pelotização. Todavia, não há um método para a medição direta da superficial específica de partículas. Uma alternativa é pelo método de *Blaine*, que é uma medida indireta da área superficial, muito utilizada na indústria de cimento e aceita como referência na operação de pelotizações de minério de ferro.

Assim, têm-se na literatura como referência, os valores de $1800 \pm 30\text{cm}^2/\text{g}$ para a superfície específica e o mínimo de 90% passante em $44\mu\text{m}$ (Vieira *et al.*, 2002 , ABNT NBR ISO 21283,2020).

Nos estudos de (Schulz, 1974), ele mediu a superfície específica usando o método de *Blaine* para vários concentrados de minério de ferro com diferentes porosidades no leito de amostra, que foram gradativamente reduzidas por compactação. O autor observou que os valores de superfície específica variaram fortemente e aumentaram à medida que a porosidade diminuiu.

4 METODOLOGIA

4.1 Descrição da Metodologia

O presente trabalho aborda o estudo de moabilidade no processo de remoagem de minério de ferro. Na pesquisa foram estudadas 3 amostras de minérios de ferro, provenientes de etapas de concentração magnéticas (AV, BS e CB), de minas distintas do quadrilátero ferrífero. A Figura 4.1 a seguir ilustra no mapa a região de coleta de cada minério em estudo.

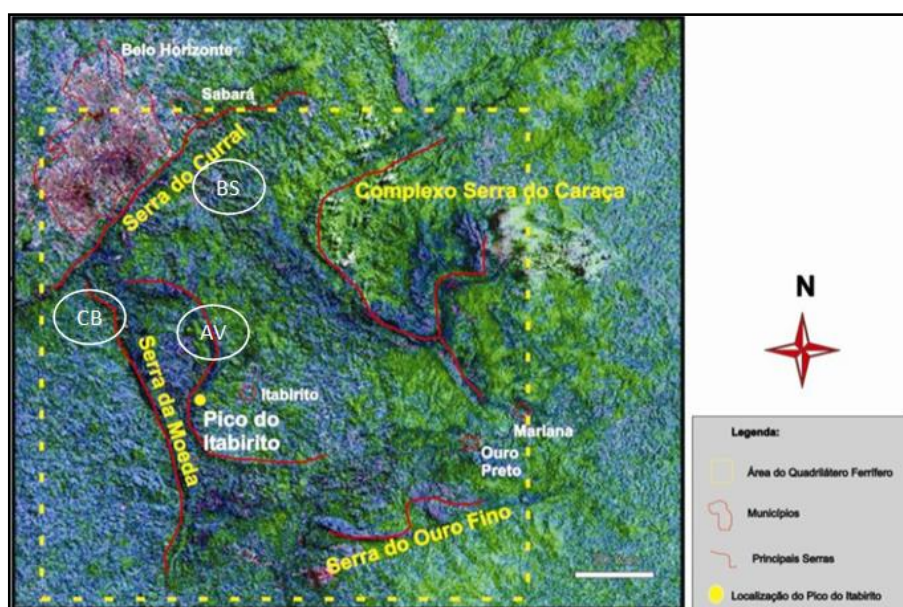


Figura 4.1. Quadrilátero ferrífero (Piuzana *et. al.*, 2011).

As amostras em estudo possuem a granulometria de um *pellet feed* grosseiro, todavia como o objetivo final é produzir um *pellet feed* fino que atenda ao processo de pelotização, fez-se necessário fazer a adequação granulométrica por meio do processo de moagem. Logo, para cada amostra “cabeça” foram realizadas as análises de densidade real, granulometria, difração de raios-X, química e mineralógica. Após o estudo de moabilidade, foi realizada a análise granulometria e a de *blaine* e por fim foram estabelecidas as correlações entre as variáveis. O fluxograma da Figura 4.2 descreve os ensaios que foram realizados em cada amostra.

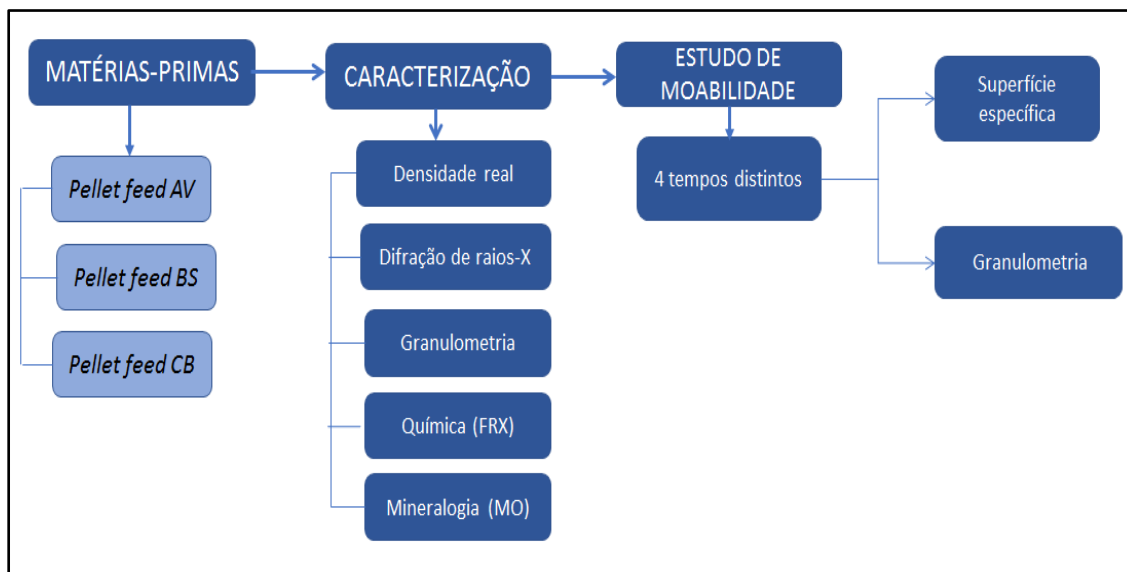


Figura 4.2. Fluxograma da metodologia

4.2 Análise Granulometria

Os minérios passaram inicialmente por um processo de homogeneização e quarteamento e uma alíquota de 200 g de cada amostra “bruta” foram utilizadas para a análise granulométrica em peneirador suspenso com vibração controlada. O peneiramento foi via úmido, utilizando-se peneiras até 44 μ m Tyler, também após cada moagem foi retirado uma mesma porção para a mesma análise.

4.3 Análise Química

A análise química dos *Pellet feeds* foi realizada pelo método de fluorescência de raios X, no departamento DEPAI (**Departamento de Análises e Inovações**) da Fundação Gorceix com a utilização de pastilhas fundidas, sendo analisados os seguintes elementos e compostos: Fe, SiO₂, Al₂O₃, Mn, P, CaO, MgO, TiO₂, Na₂O, K₂O, Cr₂O₃. O teor de PPC foi obtido por calcinação.

4.4 Densidade Real

Para a determinação da densidade utilizou-se uma massa de aproximadamente 200g de cada *pellet feed* em um Multipicnômetro a gás, marca Quantachrome que utiliza o princípio de Arquimedes de deslocamento de fluido para determinar o volume. O volume do material é

determinado através da medida da diferença de pressão quando uma quantidade de hélio sob pressão flui, de um volume conhecido de referência, em uma célula contendo a amostra. Utiliza-se o esse gás para penetrar em poros menores (1Å), dada sua pequena dimensão atômica.

4.5 Análise Mineralógica por Microscopia ótica

Uma alíquota de aproximadamente 200g de cada *pellet feed* foi utilizada para realizar a determinação da análise mineralógica, as amostras foram divididas em quatro frações granulométricas (+105 µm; -105 +74 µm; -74 +45 µm; -45 µm). O estudo foi realizado de forma quantitativa pela composição percentual de fases presentes na microestrutura, da distribuição dos diâmetros e forma dos grãos.

Na técnica de microscopia ótica, a microestrutura da amostra é estudada por imagens obtidas pelo Microscópio Óptico (MO) a partir da luz visível, cujo limite superior de magnificação, ou ampliação, é de 2.000 vezes (Callister, 2008). Para materiais opacos à luz visível (todos os metais e muitos cerâmicos e polímeros), utiliza-se o Microscópio Óptico de Luz Refletida (MOLR) uma vez que apenas a superfície destes é submetida à análise, já para materiais transparentes, utiliza-se o Microscópio Óptico de Luz Transmitida (MOLT) (Santos, 2002; Callister, 2008).

4.6 Análise de Difração por raios-X

A análise realizada por difratometria de raios-X (DRX) é uma técnica rápida e amplamente utilizada para a identificação mineral de uma dada amostra. A técnica permite determinar as fases presentes na estrutura cristalina por meio da geração de espectros identificando, então, as espécies minerais (Oliveira, 2006).

As amostras de *pellet feeds* (AV, BS e CB) foram submetidas a análises semiquantitativas por difratometria de raios-X (DRX), realizadas em um difratômetro Philips-PANalytical PW1710, utilizando radiação $\text{CuK}\alpha$ e cristal monocromador de grafita.

A técnica utilizada de análise se baseou na comparação dos valores das distâncias interplanares e das intensidades dos picos nos difratogramas das amostras analisadas e uma amostra de referência, utilizando o padrão do banco de dados PDF-2 do ICDD – International

Centre for Diffraction Data e o software X'Pert HighScore versão 2.1-2004.

4.7 Estudo de Moabilidade - Método Fundação Gorceix

O estudo de moabilidade para determinação do consumo específica de energia proposto por Von Krüger (2004) se assemelha ao apresentado (Donda, 2003). A experimental segue o mesmo padrão de moagens sucessivas e a utilização da equação de Rowland para cálculo da energia consumida. A diferença está nos parâmetros de moagem como, por exemplo, diâmetro do moinho, top size do minério, distribuição da carga moedora entre outros (Ferreira, 2016). Para a realização dos ensaios de moabilidade dos minérios de ferro estudados as amostras passam por um processo de homogeneização e quarteamento do qual 4 alíquotas de cada amostra foi separada para os ensaios de remoagem. De acordo com a densidade, tamanho do moinho, % de sólido entre outras variáveis a massa de alimentação da moagem foi calculada.

4.8 Condições dos Ensaios

Na tabela abaixo se apresentam os parâmetros operacionais para previsão de consumo específico de energia na moagem, fundamentado em Donda e Rosa (2014), com pequenos ajustes.

Tabela 4.1. – Parâmetros operacionais para testes em bancada

Diâmetro Interno do moinho (m)	0,25
Comprimento Interno do moinho (m)	0,15
% Velocidade Crítica	84,4
Dens. Aparente das bolas (t/m ³)	7,6
% Enchimento	29,6%
Preenchimento Intersticial da carga (Vpolpa/Vvazios)	107%
Carga de Bolas Distribuída	(15 a 30 mm)
% Sólidos em volume	49,75%
% Sólido em peso	Dependente da densidade do minério (neste estudo ± 80%)

4.9 Aplicação do Ensaio de Moabilidade

Foram realizados quatro moagens com cada *pellet feed* com quatro níveis de consumo específico de energia (7 kwh/t, 10 kWh/t, 13 kwh/t, 16 kwh/t). A alimentação e os produtos das quatro moagens foram analisados granulométricamente, também os produtos das quatro moagens tiveram a superfície específica determinada.

De acordo com as análises gráficas que foram obtidas, se observar que o material retido em uma malha de controle em função da energia específica calculada normalmente segue uma lei exponencial, à partir da qual se pode obter uma constante que denominamos taxa de redução granulométrica, que vai permitir o cálculo da energia necessária para se obter uma determinada quantidade de material retido em uma malha de referência ou inversamente a quantidade de material retido, para uma energia fornecida.

Neste sentido a fração retida na malha de referência (**Mr**), em função da energia específica de moagem temos uma equação do tipo:

$$y = a * e^{kx} \quad \text{Equação (10)}$$

Onde:

$Y \rightarrow$ é a fração retida na malha de referência, dos produtos de moagem (**PMr**),

$a \rightarrow$ é fração retida na malha de referência, da alimentação da moagem (**FMr**),

$x \rightarrow$ é a energia específica, **kWh/t**,

$k \rightarrow$ é a constante que representa a taxa de redução da fração retida na malha de referência.

A equação pode ser escrita:

$$PMr = FMr * e^{k Mr * kWh/t} \quad (e = 2,71828) \quad \text{Equação (11)}$$

Para calcular-se a energia específica necessária para atingir uma determinada fração retida na malha de referência, utiliza-se a equação abaixo:

$$kWh/t = Ln (PMr / FMr) / kMr \quad (Ln = \text{logaritmo Neperiano}) \quad \text{Equação (12)}$$

Nos estudos realizados foi adotada a peneira de 44µm como alvo, entretanto, qualquer outra malha pode ser utilizada como referência para outros estudos. Segue abaixo na Figura 4.3 o moinho utilizado para a realização dos ensaios.



Figura 4.3 Moinho utilizado para o estudo de moabilidade.

4.10 Análises de *Blaine*

A superfície específica (SE) foi determinada pelo método de *Blaine*, essa propriedade está relacionada com a superfície referida à massa que é medida pela comparação com uma amostra de cimento padrão por meio do método de permeabilidade ao ar (método de *Blaine*). A principal finalidade desse ensaio é checar a uniformidade do processo de moagem como também caracterizar a finura de um pó, visto que quanto mais alto seu valor, mais fino é o pó (NBR NM 76, 1998). O método consiste em medir a diferença de pressão por unidade de vazão de ar (ou fluido) através de um leito de partículas uniformemente compactado, em um cilindro de dimensões padronizadas (Rosa, 2019).

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Caracterização Física e Química dos *Pellet feeds* (AV, BS e CB)

A Tabela 5.1 apresenta a determinação das densidades, sendo que o *pellet feed* AV teve sua densidade fornecida pela empresa que cedeu o minério, já os *pellet feeds* BS e CB (obtidas por picnômetro a hélio).

Tabela 5.1- Densidade dos *Pellet feeds*.

Identificação das amostras	Densidade g/cm ³
<i>Pellet feed</i> AV	4,20
<i>Pellet feed</i> BS	4,67
<i>Pellet feed</i> CB	4,97

A Tabela 5.2 apresenta as análises químicas dos *Pellet feeds* AV, BS e CB, obtidas por fluorescência de Raio X.

Tabela 5.2- Análise química dos *Pellet feeds* AV, BS e CB.

AMOSTRA	ANÁLISES QUÍMICAS												
	Fe	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Mn	P	CaO	MgO	TiO ₂	Na ₂ O	K ₂ O	Cr ₂ O ₃	PPC	SUM
	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
<i>Pellet Feed</i> AV	64,88	4,95	0,21	0,14	0,03	<0,01	0,1	0,03	<0,01	<0,01	<0,01	1,25	99,55
<i>Pellet Feed</i> BS	65,76	3,13	1,20	0,31	0,036	<0,01	0,05	0,08	<0,01	<0,01	<0,01	0,97	99,94
<i>Pellet Feed</i> CB	67,21	2,99	0,44	0,04	0,012	<0,01	<0,01	0,04	<0,01	<0,01	<0,01	0,30	99,95

O gráfico da Figura 5.1 apresentam a correlação entre a densidade, o %Fe e o %PPC dos *Pellet feeds* AV, BS e CB.

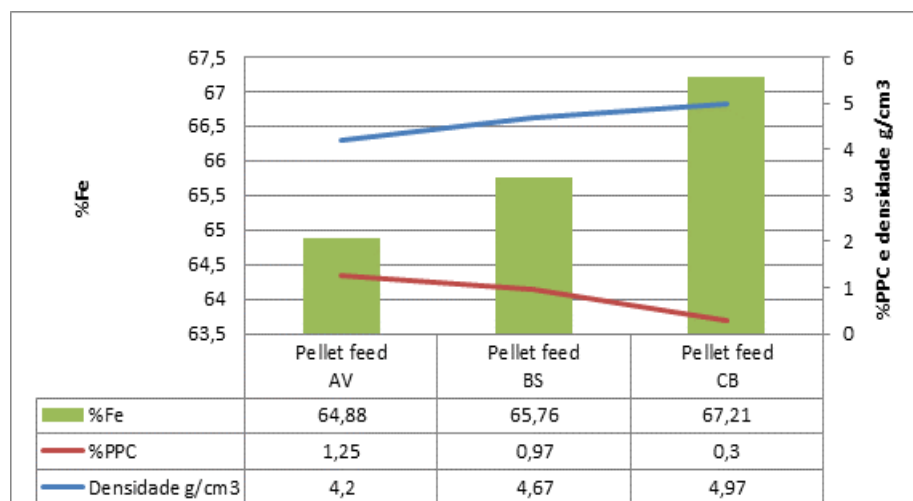


Figura 5.1 Correlação entre a densidade, o %Fe e o %PPC dos *Pellet feeds*.

Observa-se que há diferenças na qualidade química dos *pellet feeds* (Tabela 5.2), sendo que o AV e o BS apresentam um valor de Fe mais baixo se comparado com o CB, como também o teor de sílica do *pellet feed* mais rico (CB) é menor se comparado com o AV. Percebe-se que o teor de PPC (Figura 5.1) das amostras é inversamente proporcional ao aumento do teor de ferro e que o %PPC está dentro de uma faixa aceitável industrialmente para alto forno cujo valor de referência é de 1,93% quando se trata de minerais hidratados (Takehara, 2004). Já a densidade tem uma relação diretamente proporcional ao aumento do teor de ferro nas amostras.

A tabela 5.3 e o gráfico da Figura 5.2 apresentam a distribuição granulométrica da alimentação de cada amostra.

Tabela 5.3- Análise Granulométrica inicial dos *Pellet feeds* AV, BS e CB

Granulometria dos <i>Pellet Feeds</i>			
Malha	%Passante	%Passante	%Passante
mm	<i>Pellet Feed AV</i>	<i>Pellet Feed BS</i>	<i>Pellet Feed CB</i>
1190		94,21	95,48
840	96,40	88,04	90,00
594	92,70	82,79	85,23
420	89,77	78,66	81,43
297	85,79	74,00	76,80
210	81,10	68,03	69,40
149	76,01	60,11	58,71
105	64,71	50,79	47,00
74	49,39	37,68	32,52
53	26,75	21,26	18,38
44	17,42	18,92	15,89

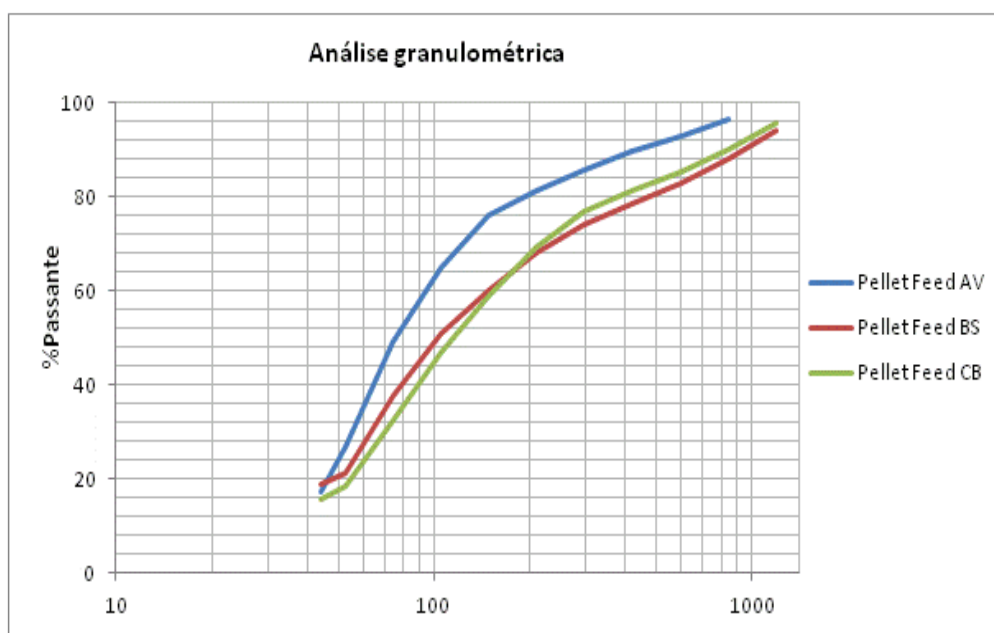


Figura 5.2. Análise granulométrica

Pelo gráfico da Figura 5.2 observa-se que os *Pellet feeds* BS e CB possuem granulometria inicialmente parecidas, já o minério AV possui uma distribuição de tamanhos ligeiramente menor quando comparado aos outros dois minérios.

5.2 Avaliação Mineralógica e Difração de raios-X da Alimentação de Moagem

5.2.1 Análise Mineralógica

Na Figura 5.3 apresentam-se a análise mineralógica % em volume dos principais minerais presentes nos *Pellet feeds* AV, BS e CB.

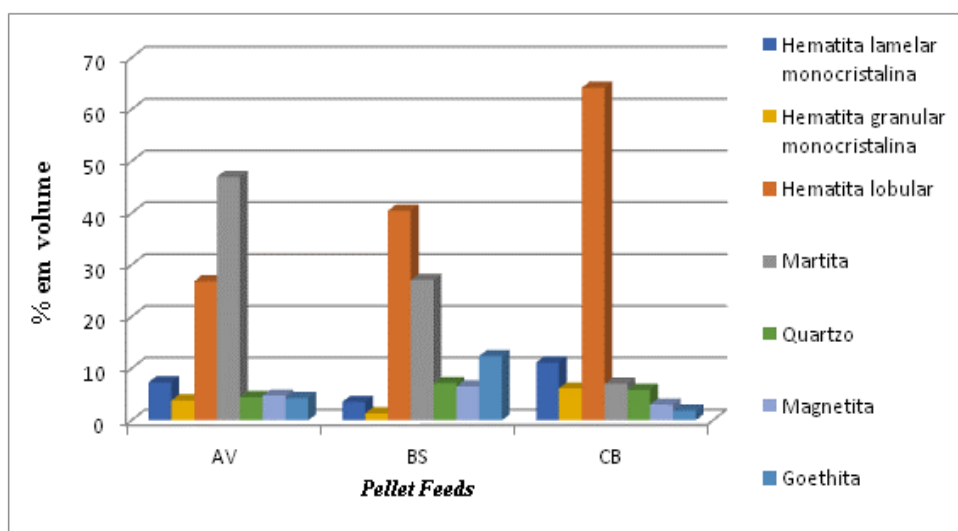


Figura 5.3. Análise mineralógica

Nas Figuras 5.4, 5.5 e 5.6 apresentam-se as imagens obtidas por microscopia ótica por luz refletida (MOLR) dos *Pellet feeds* AV,BS e CB.

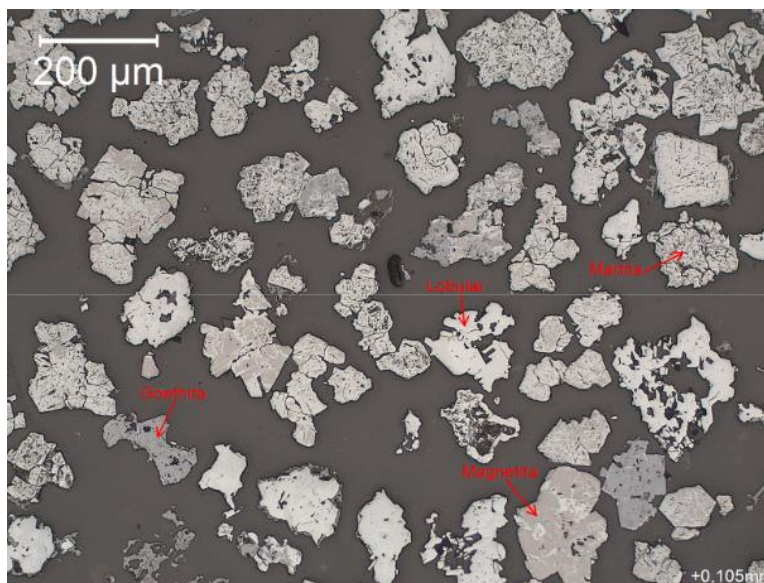


Figura 5.4. Imagem ótica (MOLR) da amostra de *Pellet feed* AV do material retido em 0,105mm.

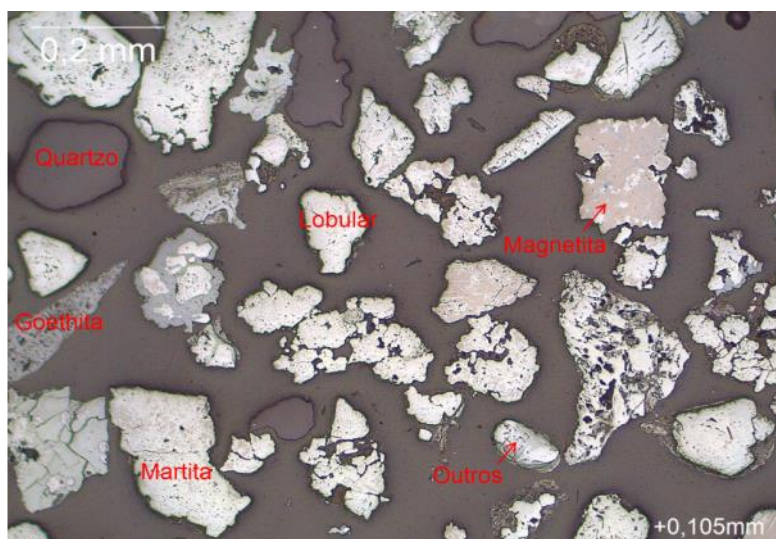


Figura 5.5. Imagem ótica (MOLR) da amostra de *Pellet feed* BS do material retido em 0,105mm.

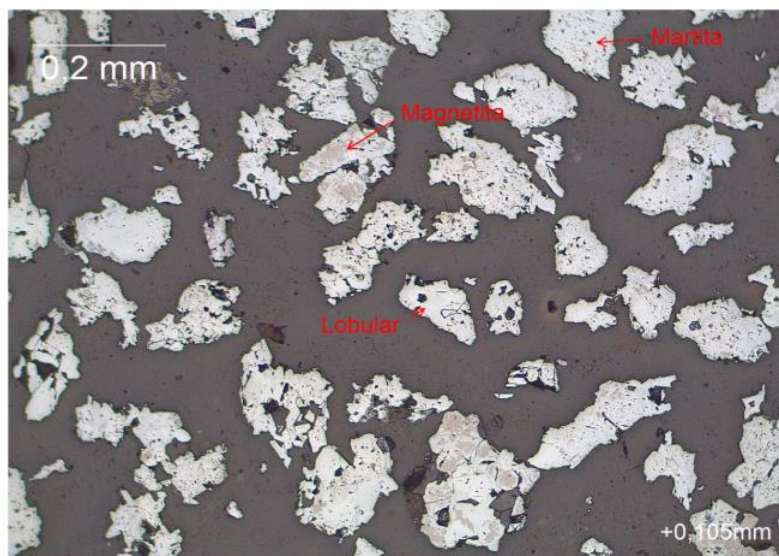


Figura 5.6. Imagem ótica (MOLR) da amostra de *Pellet feed* CB do material retido em 0,105mm.

Os resultados da mineralógica da Figura 5.3 e as imagens microscópicas (Figura 5.4,5.5,5.6) mostram os principais minerais presentes em cada minério. Os *pellet feeds* possuem a predominância dos minerais de hematita lobular e da martita, sendo o primeiro mineral em ordem crescente e o segundo em ordem decrescente. Observa-se também a presença de outros minerais em menores quantidades e sem correlação direta.

Nos estudos desenvolvidos por Ribeiro (2004), onde ele classificou os minerais que favorecem o aumento da geração de área superficial e a diminuição granulométrica na peneira de $44\mu\text{m}$, a hematita lobular é o primeiro mineral apontado.

Assim sendo, pode-se dizer que os resultados obtidos no trabalho vão de encontro com a teoria do autor.

5.2.2 Análise de Difração de raios-X

Nas Figuras 5.7, 5.8 e 5.9 apresentam-se as análises de difração de raios-X dos *Pellet feeds* AV,BS e CB.

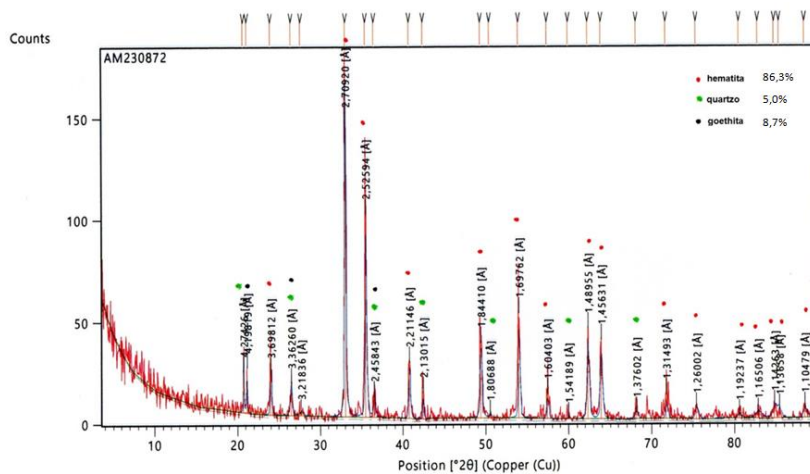


Figura 5.7. Difratoograma de raios-X da amostra de *Pellet feed* AV.

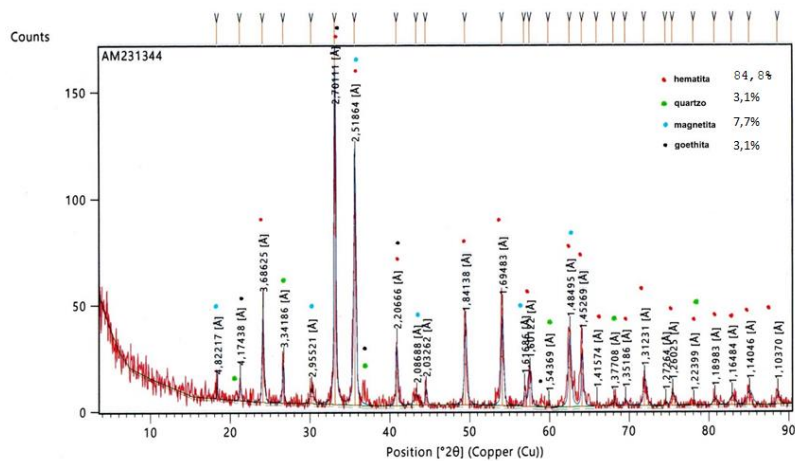


Figura 5.8. Difratoograma de raios-X da amostra de *Pellet feed* BS.

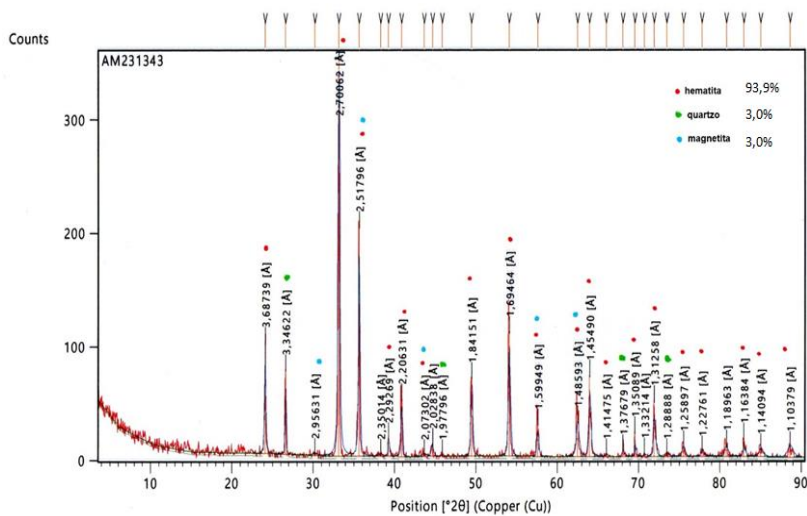


Figura 5.9. Difratoograma de raios-X da amostra de *Pellet feed* CB.

Os difratogramas dos *pellet feeds* das Figuras acima mostram as principais fases minerais presentes nas amostras, assim pode-se observar que eles possuem a predominância da fase cristalina da hematita acima de 80% para todos os minérios, como também as fases de quartzo, goethita e magnetita em proporções menores.

5.3 Avaliação do Estudo de Moagem

As tabelas a seguirem trazem os principais resultados fornecidos pelo estudo de moabilidade realizado nas amostras de *pellet feed* em estudo. A tabela 5.4 apresenta a planilha com os resultados do estudo de moabilidade do *pellet feed* AV juntamente com os valores de superfície específica do mesmo.

Tabela 5.4 Estudo de moabilidade do *pellet feed* AV.

Moabilidade	Amostra	Pellet Feed AV				
Parâmetros	Enchimento 29,6%	% Sol V/V 49,5%	% Sol W/W 80,61%			
Dens. Real do minério	4,2	Taxa de decaimento granulométrico				
Carga de bolas	Distribuídas					
Fração da vel. Crítica	0,75					
Preenchimento intersticial	107					
Energ. Espec. calculada	0	7,0	10,0	13,0	16,0	Wh/kg
Tempo	0	00:24:52	00:35:32	00:46:12	00:56:51	h:mins
Granulometrias		% Retido acumulado				
μm	%acm.	%acm.	%acm.	%acm.	%acm.	mm
4760	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	4,760
3366	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	3,366
2380	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	2,380
1680	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	1,680
1190	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	1,190
840	3,6%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,840
594	7,3%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,594
420	10,2%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,420
297	14,2%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,297
210	18,9%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,210
149	24,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,149
105	35,3%	0,6%	0,0%	0,0%	0,0%	0,105
74	50,6%	3,4%	0,7%	0,0%	0,0%	0,074
53	73,3%	25,6%	13,4%	5,3%	2,3%	0,053
44	82,6%	34,1%	22,0%	11,5%	4,8%	0,044
Superfície específica	0	826	1111	1354	1458	cm ² /g

Segue abaixo no gráfico da Figura 5.10 uma análise gráfica comparativa da granulometria do percentual acumulado passante da alimentação com as demais granulometrias após os tempos de moagens em malha de referência de 150 μm para baixo.

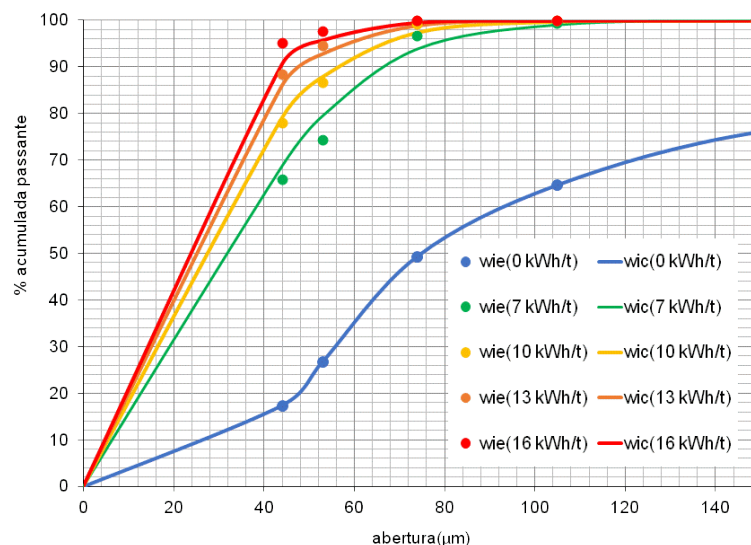


Figura 5.10. Análise gráfica comparativa das granulometrias *pellet feed AV*.

Segue abaixo na Figura 5.11 uma análise gráfica do percentual retido na malha de referência de 44 μ m e também da análise de superfície específica ambos em relação ao aumento do nível de energia da moagem.

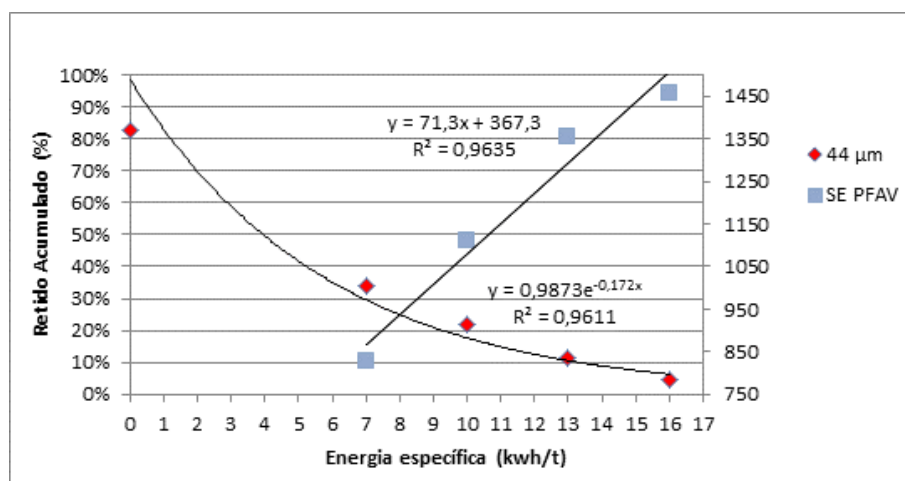


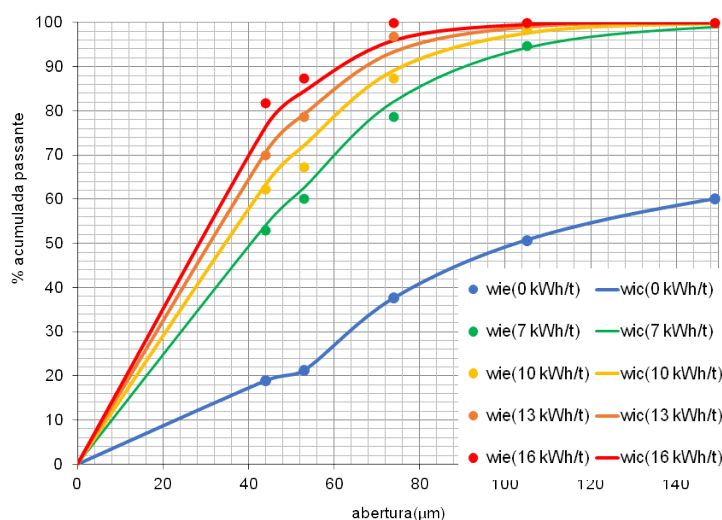
Figura 5.11. Estudo de moabilidade do *pellet feed AV*.

A tabela 5.5 apresenta a planilha com os resultados do estudo de moabilidade do *pellet feed BS* juntamente com os valores de superfície específica do mesmo.

Tabela 5.5 Estudo de moabilidade do *pellet feed* BS.

Moabilidade	Amostra	Pellet Feed BS				
Parâmetros	Enchimento 29,6%	% Sol V/V 49,5%			% Sol W/W 82,22%	
Dens. Real do minério	4,67	Taxa de decaimento granulométrico				
Carga de bolas	Distribuidas					
Fração da vel. Crítica	0,75					
Preenchimento intersticial	107					
Energ.Espec.calculada	0	7,0	10,0	13,0	16,0	wh/kg
Tempo	0	00:27:40	00:39:31	00:51:22	01:03:14	h:mins
Granulometrias	% Retido acumulado					
µm	%acm.	%acm.	%acm.	%acm.	%acm.	mm
4760	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	4,760
3366	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	3,366
2380	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	2,380
1680	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	1,680
1190	5,8%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	1,190
840	12,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,840
594	17,2%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,594
420	21,3%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,420
297	26,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,297
210	32,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,210
149	39,9%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,149
105	49,2%	5,3%	1,5%	0,0%	0,0%	0,105
74	62,3%	21,3%	12,6%	3,2%	0,0%	0,074
53	78,7%	39,8%	32,8%	21,2%	12,5%	0,053
44	81,1%	47,0%	37,8%	29,9%	18,1%	0,044
Superfície específica	NA	1149	1354	1791	1869	cm ² /g

Segue abaixo no gráfico da Figura 5.12 uma análise gráfica comparativa da granulometria do percentual acumulado passante da alimentação com as demais granulometrias após os tempos de moagens em malha de referência de 150µm para baixo.

Figura 5.12. Análise gráfica comparativa das granulometrias *pellet feed* BS.

Segue abaixo na Figura 5.13 uma análise gráfica do percentual retido na malha de referência de 44 μ m e também da análise de supercie especifica ambos em relação ao aumento do nível de energia da moagem.

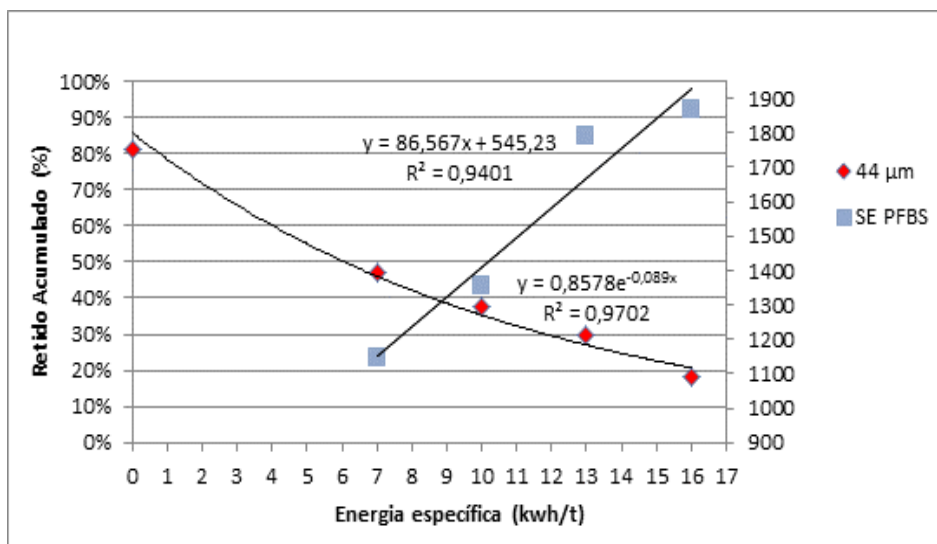


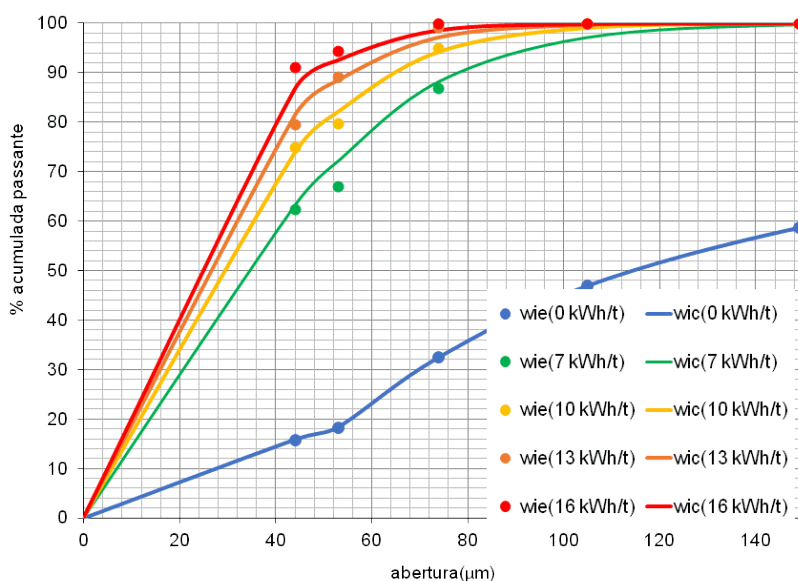
Figura 5.13. Estudo de moabilidade *pellet feed BS*.

A Tabela 5.6 apresenta a planilha com os resultados do estudo de moabilidade do *pellet feed CB* juntamente com os valores de superfície específica do mesmo.

Tabela 5.6 Estudo de moabilidade do *pellet feed* CB.

Moabilidade	Amostra	Pellet Feed CB				
Parâmetros	Enchimento 29,6%	% Sol V/V 49,5%		% Sol W/W 83,12%		
Dens. Real do minério	4,97	Taxa de decaimento granulométrico				
Carga de bolas	Distribuidas					
Fração da vel. Crítica	0,75					
Preenchimento intersticial	107					
Energ.Espec.calculada	0	7,0	10,0	13,0	16,0	wh/kg
Tempo	0	00:27:40	00:39:31	00:51:22	01:03:14	h:mins
Granulometrias	% Retido acumulado					
μm	%acm.	%acm.	%acm.	%acm.	%acm.	mm
4760	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	4,760
3366	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	3,366
2380	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	2,380
1680	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	1,680
1190	4,5%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	1,190
840	10,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,840
594	14,8%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,594
420	18,6%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,420
297	23,2%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,297
210	30,6%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,210
149	41,3%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,149
105	53,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,105
74	67,5%	13,2%	5,0%	0,7%	0,0%	0,074
53	81,6%	32,9%	20,2%	10,7%	5,7%	0,053
44	84,1%	37,5%	25,1%	20,3%	8,8%	0,044
Superfície específica	NA	1383	1637	1711	2106	cm ² /g

Segue abaixo no gráfico da Figura 5.14 uma análise gráfica comparativa da granulometria do percentual acumulado passante da alimentação com as demais granulometrias após os tempos de moagens em malha de referência de 150 μm para baixo.

Figura 5.14. Análise gráfica comparativa das granulometrias *pellet feed* CB.

Segue abaixo na Figura 5.15 uma análise gráfica do percentual retido na malha de referência de 44µm e também da análise de supercie especifica ambos em relação ao aumento do nível de energia da moagem.

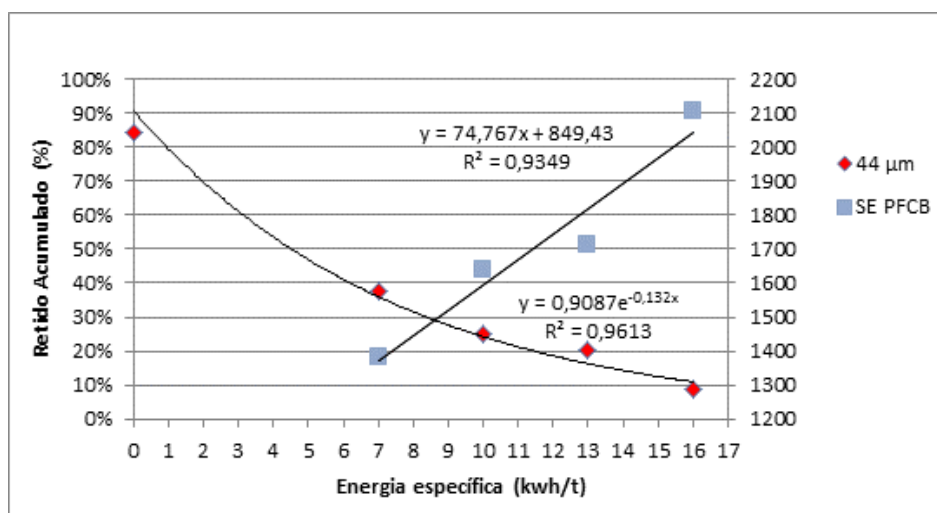


Figura 5.15. Estudo de moabilidade *pellet feed* CB.

A Tabela 5.7 e o gráfico da Figura 5.16, apresentam a correlação entre o consumo específico de energia e o percentual retido acumulado na malha de 44µm do estudo de moabilidade dos *Pellet feeds* AV, BS e CB.

Tabela 5.7- Análise do estudo de moabilidade dos *Pellet feeds* AV,BS e CB

Estudo de moabilidade					
Tempos (Kwh/t)	0	7	10	13	16
Abertura de 44 µm					
<i>Pellet Feed AV</i>	82,60%	34,10%	22,00%	11,50%	4,8%
<i>Pellet Feed BS</i>	81,08%	47,00%	37,80%	29,90%	18,10%
<i>Pellet Feed CB</i>	84,11%	37,50%	25,09%	20,34%	8,80%

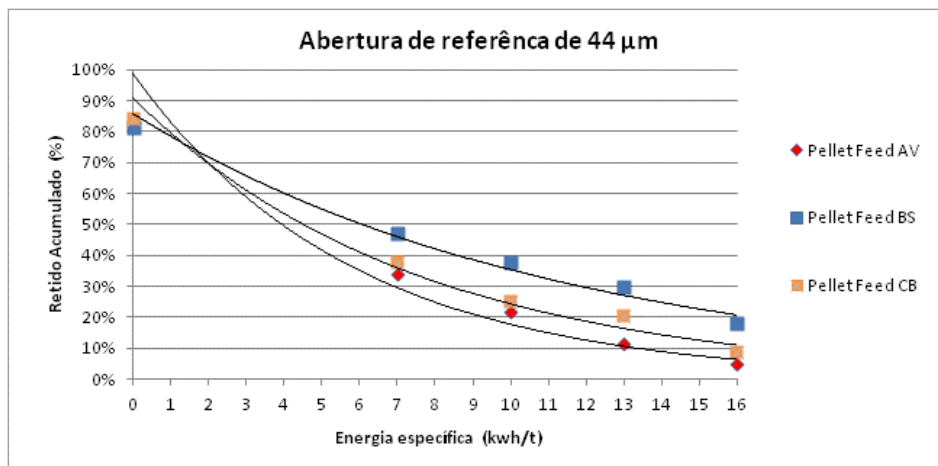


Figura 5.16. Estudo de moabilidade.

No gráfico da Figura 5.16 observa-se a relação entre a granulometria inicial, os produtos de moagens de cada material e o consumo de energia. Pelas curvas de moagens nota-se um tamanho de partícula da alimentação similar em relação a malha de 44μm, todavia o compartimento do minério nas moagens foram diferentes.

Nós gráficos das Figuras 5.17, 5.18 e 5.19 observa-se a o modelo do balanço populacional aplicado aos minérios em estudo, onde foi comparada a velocidade de fragmentação (Função seleção, S_j) e a distribuição dos Fragmentos (Função quebra, b_{ij}).

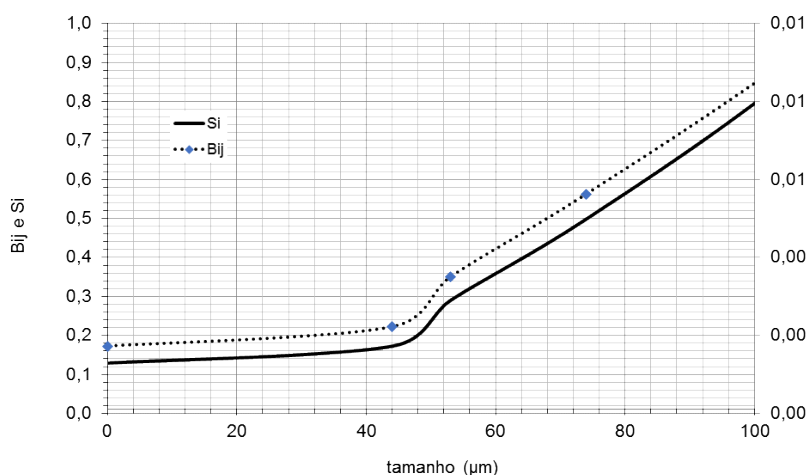


Figura 5.17. Função quebra versus função seleção *pellet feed AV*.

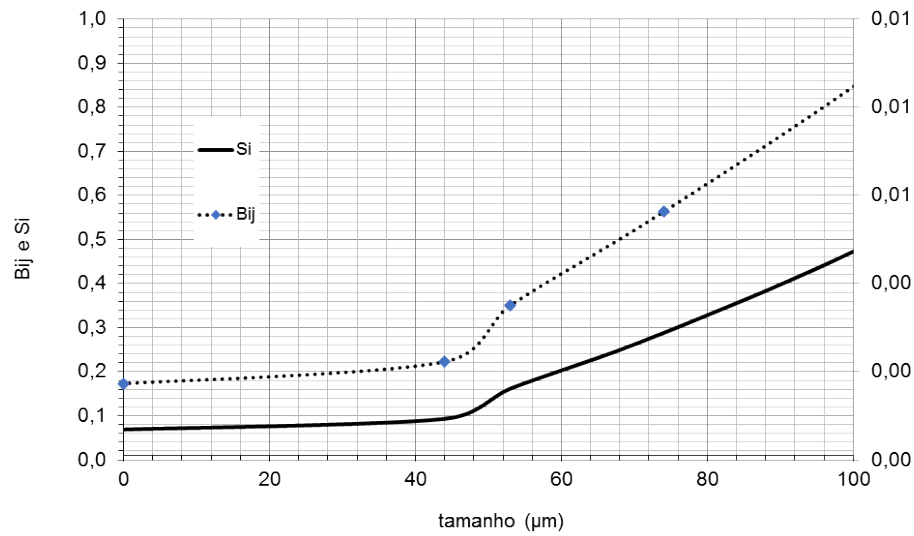


Figura 5.18. Função quebra versus função seleção *pellet feed* BS.

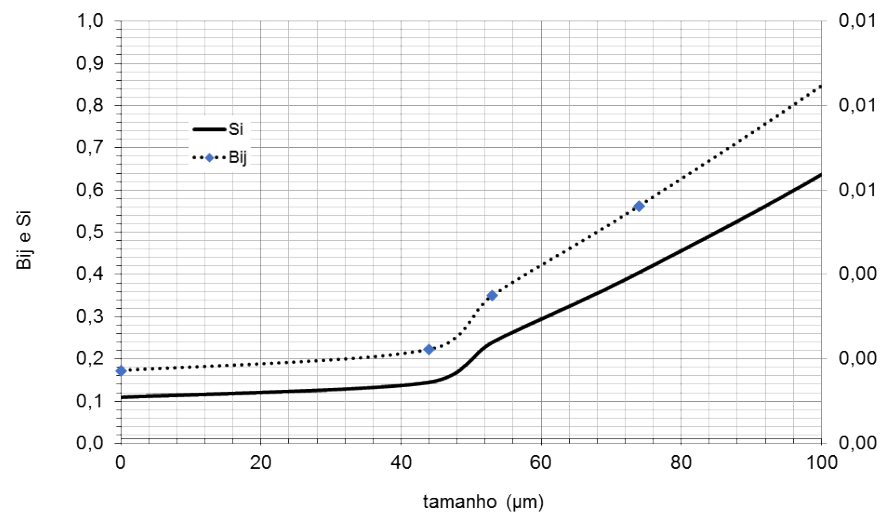


Figura 5.19. Função quebra versus função seleção *pellet feed* CB.

O modelo do balanço populacional realizado com os *pellet feeds* AV, BS e CB confirmou que o minério com maior cinética de quebra é o AV, seguida pelo CB e o BS.

A Figura 5.20 traz o gráfico da superfície específica dos *Pellet feeds* AV, BS e CB em função da energia de moagem utilizada.

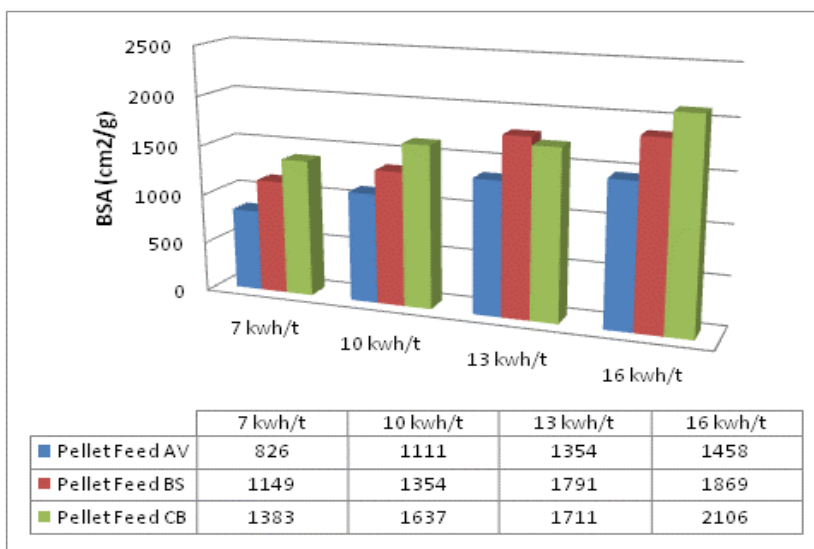


Figura 5.20. Superfície específica dos produtos das moagens.

Observa-se pelo gráfico da Figura 5.20 que os *pellet feeds* BS e CB, possuem os maiores valores de superfície específica, sendo o minério CB superior ao BS, já o *pellet feed* AV se mostra inferior os demais, tal afirmação confirma a teoria do autor (Ribeiro, 2004), como mencionada acima, ou seja, influência da hematita lobular.

Segue na Figura 5.21 a correlação entre a energia de moagem aplicada para cada *pellet feed* e o índice de moabilidade.

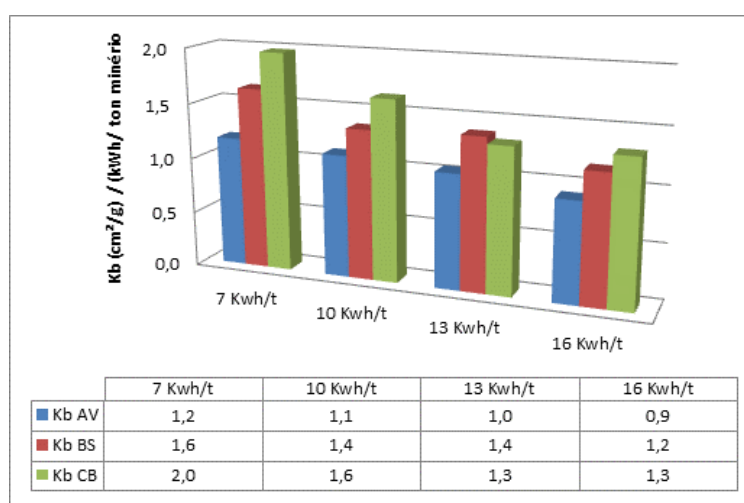


Figura 5.21. Correlação entre a energia de moagem e o índice de moabilidade.

Observa-se pelo gráfico da Figura 5.21 que para uma mesma energia aplicada o comportamento dos *pellet feeds* são diferentes, de fato, os minérios CB e o BS foram os que apresentaram os maiores valores de Kb, o que reforça os resultados obtidos pela análise de

índice de *blaine*. Já o *pellet feed AV* como esperado apresentou um valor inferior aos demais. Outro fator importante é que o *Kb* dos minérios tende a estabilizar com o aumento da energia, ponto no qual ocorre a saturação do minério, ou seja, fica difícil reduzir a partícula mesmo com o aumento da energia aplicada.

A Figura 5.22 do gráfico abaixo correlaciona o diâmetro médio da alimentação de moagem dos minérios com o valor de *Kb* do produto final da moagem.

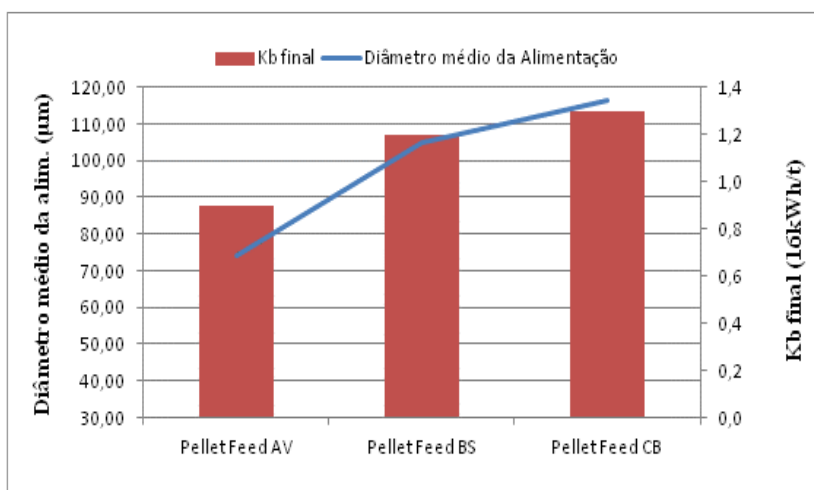


Figura 5.22. Correlação entre o diâmetro médio da alimentação e o índice de moabilidade.

Observa-se na Figura 5.22 uma correlação diretamente proporcional entre o diâmetro médio da partícula na alimentação e o índice de moabilidade, uma vez que o *Kb* final aumenta com o aumento do diâmetro médio das partículas. Neste sentido observa-se que para uma mesma energia o minério com menor superfície específica (AV) também teve o menor valor de *Kb*. Já o minério com maior valor de *Kb* (CB) teve o maior valor de *Kb*. Tal evento está associado a tipologia do minério, que teve comportamentos diferentes no processo de moagem, nesse caso, os minérios com maiores quantidade de hematita lobular foram favorecidos em termos de superfície específica.

Outro fator que pode estar associado e que, Segundo (Bueno, 2019) em granulometrias maiores é possível se atingir maiores ganhos de área superficial específica até que se chegue ao ponto de saturação, enquanto as granulometrias menores atingem a saturação a energias mais baixas, atingindo, assim um menor ganho de área superficial específica.

No gráfico da figura 5.23, tem-se a correlação entre o % de PPC na alimentação com o valor de superfície específica do produto moído com a energia de 16 kwh/t.

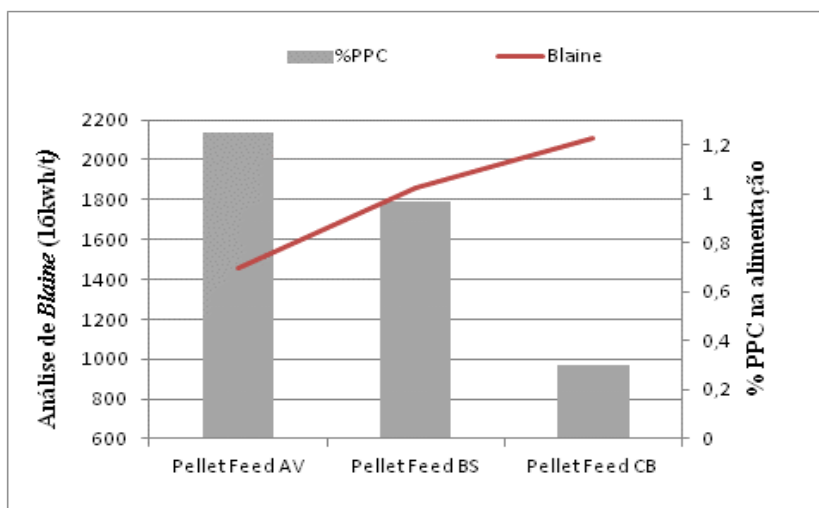


Figura 5.23. Correlação entre o %PPC e a superfície específica.

No gráfico da Figura 5.23, observa-se uma relação inversamente proporcional, pois os minérios com maiores %PPC (AV e BV) foram os que apresentaram menor geração de superfície específica, já o minério CB que possui menor %PPC é o que teve maior. Em referência ao trabalho de (Bueno, 2019), observa-se que os minérios mais porosos e com maior PPC, apresentaram maior geração de área superficial específica, já os minérios menos porosos e com menor PPC são os que geraram uma distribuição granulométrica com maior percentual passante na malha de 0,044 mm. O autor explica que tal fato pode estar relacionado à saturação dos minérios, onde os minérios mais porosos e com maior PPC apresentaram uma saturação mais pronunciada que os minérios com menores porosidades e valores de PPC. Assim os resultados obtidos no trabalho da (Figura 5.23) difere das afirmações de Bueno (2019).

6. CONCLUSÕES

A partir da avaliação da influência das propriedades físicas, químicas e mineralógicas dos diferentes *pellet feeds* no consumo de energia na remoagem pode-se concluir que:

Em relação à análise química dos minérios, observou-se que existem diferenças entre os *pellet feeds*, sendo que o AV e o BS apresentam um teor de Fe mais baixo se comparado com o CB, como também o teor de sílica do *pellet feed* mais rico (CB) é menor se comparado com o AV. O PPC (Perda por calcinação) das amostras ficaram abaixo do valor de referência de 1,93% o que é explicado pela baixa presença de minerais hidratados nos minérios em estudo.

A mineralogia dos *pellet feeds* (AV,BS e CB) apresentou a predominância dos minerais de hematita lobular e da martita, sendo o primeiro mineral em ordem crescente e o segundo em ordem decrescente. Observa-se também a presença de outros minerais em menores quantidades e sem correlação direta. Já os resultados da difração de raios-X relevou as principais fases minerais presentes nos minérios, sendo esses ricos principalmente em hematita com valores em menores proporção de quartzo, goethita e magnetita.

Ao avaliar a granulometria dos minérios pode-se afirmar que os *Pellet feeds* BS e CB possui granulometria inicialmente parecidas, já o minério AV possui uma distribuição de tamanhos ligeiramente menor quando comparado aos outros dois minérios.

Por outro lado, ao avaliar as curvas de moagens com foco na malha de 44 μm nota-se um tamanho de partícula da alimentação similar, todavia o compartimento do minério nas moagens foi diferente. Tal evento provavelmente ocorre devido a maior proporção do mineral da hematita lobular nos minérios (BS e CB) que favoreceu o aumento da geração de área superficial visto que o mineral AV possui um teor menor desse mineral.

A correlação estabelecida entre a superfície específica e a energia aplicada, mostrou que após o processo de remoagem os minérios BS e CB foram os que tiveram os maiores valores de superfície específica atendendo assim os requisitos de mercado ($1800\text{cm}^2/\text{g} \pm 30$) para o processo de pelletização. Já o *pellet feed* AV atingiu apenas um valor de $1458\text{cm}^2/\text{g}$.

A correlação do K_b e da energia aplicada mostrou que para uma mesma energia o comportamento dos *pellet feeds* são diferentes, sendo que os minérios CB e o BS foram os que apresentaram os maiores valores de K_b , já o *pellet feed* AV como esperado apresentou um valor inferior aos demais. Outro fator importante é que o K_b dos minérios tende a estabilizar com o aumento da energia, ponto no qual ocorre a saturação do minério, ou seja, fica difícil reduzir a partícula mesmo com o aumento da energia aplicada.

Já em relação ao diâmetro médio da alimentação o K_b final aumenta á uma correlação diretamente proporcional uma vez que o K_b final aumenta com o aumenta do diâmetro médio das partículas. Tal evento pode ter ocorrido devido ao fato das partículas do minério AV serem mais finas e isso promoveu a saturação do minério precocemente, o que não ocorreu nos outros *pellet feeds*.

A comparação entre a superfície específica e o teor de PPC relevou uma relação inversamente proporcional, pois os minérios com maiores %PPC (AV e BV) foram os que apresentaram menor geração de superfície específica. Já o minério CB que possui menor %PPC é o que teve maior área superficial, logo se pode dizer o teor de PPC tem pouca influencia no processo de remoagem neste estudo.

7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- ✓ Realizar estudo de moabilidade com a metodologia do Donda para mais quantidade de minérios do Quadrilátero Ferrífero.
- ✓ Realizar estudo de moabilidade com a metodologia do Donda para minérios fora do Quadrilátero Ferrífero.
- ✓ Realizar estudo de moabilidade variando o % de sólido da polpa.
- ✓ Realizar estudo complementar com a metodologia do Bond (WI).

8. REFERÊNCIAS

ABNT NBR ISO 21283:2020 - Minérios de Ferro — Determinação de área de superfície específica — Método de ensaio usando aparelho de permeabilidade ao ar (Blaine)

Austin, L.G. (1973). A Commentary on the Kick, Bond and Rittinger Laws of Grinding, Powder Technology, v.7, p.315-317, Elsevier Sequoia S.A., Lausanne - Printed in The Netherlands

BAKKER, J. Energy use of fine grinding in mineral processing. Metallurgical and Materials Transactions, ASM, 2014.

BERALDO, J. L. Moagem de Minérios em Moinhos Tubulares. São Paulo, Editora Edgar Blücher, 215 p., 1984.

BERALDO, J.L. Moagem de Minérios em Moinhos Tubulares. São Paulo: Editora Edgard Blucher Ltda, 1987.

BUENO, G. Desvendando a prensagem de *pellet feed* de minério de ferro na unidade de tubarão. [Dissertação de Mestrado]. Universidade Federal do Rio de Janeiro , RJ; 2019.

CARVALHO, Pedro Sérgio Landim de *et al.* Minério de ferro. 2014.

CHAGAS, T.T.R. A moabilidade na moagem secundária de *pellet-feeds* de minérios de ferro em função da mineralogia, química e microestrutura. [Dissertação de Mestrado]. Universidade Estadual de Minas Gerais, Ouro Preto; 2008.

CHAVES, A.P.; PERES, A. E.C. Teoria e prática do tratamento de minérios. São Paulo: Signus Editora, 2006. v. 3.

CHAVES, A.P; PERES, A.E.C. Teoria e Prática de Tratamento de Minérios: Britagem, Peneiramento e Moagem. São Paulo. Oficina do texto, 2012. v.3.

COHEN, H. E. Energy Usage In Mineral Processing. Transactions of the Institution of Mining and Metallurgy. Section C, London, 1983. v. 92, p. 160-163.

CORDEIRO, Kamila Antunes; DE FREITAS, Rodrigo Randow. Moagem do minério de ferro e o processo de cominuição: uma análise bibliométrica: iron ore milling and the comminution process: a bibliometric analysis. Brazilian Journal of Production Engineering-BJPE, p. 119-132, 2021.

COSTA, J.C.V. Caracterização do itabirito dolomítico da Mina de Conceição, visando aproveitamento como matéria-prima na siderurgia. [Dissertação de Mestrado]. Escola de Engenharia da UFMG, 2013.

DE ALENCAR, J. P. S. G., DO CARMO, G. S., SILVA, N. L. A., BASTOS, N. D., & FIGUEIREDO, P. S. Avaliação da influência da tipologia do minério em testes de sticking. Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração, v. 18, p. 0-0, 2021.

DE OLIVEIRA, Paulo Sergio. Rotas para recuperação de ferro fino contido no underflow do

espessador de lama da usina de Conceição. 2006.

DONDA, J. D., “Um método para prever o consumo específico de energia na (re)moagem de concentrados de minérios de ferro em moinhos de bolas”, Tese de Doutorado, CPGEM / UFMG, Abril 2003.

DONDA, J. D.; GALINARI C. M.; RABELO, P. J. B. O Controle da Eficiência Energética nos Circuitos de Pré-moagem e Moagem Primária da Samarco Mineração. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE MINÉRIO DE FERRO – ABM, 1999. Anais: São Paulo, ABM, 1999. p. 144-150.

DONDA, J. D.; ROSA, A. C. A LEI DA MOAGEM – Comprovação para minério de ferro. Fundação Gorceix, Ouro Preto (2014).

DORR, J. V., N. Supergene iron ores of Minas Gerais, Brazil. *Economic Geology*, v. 59, n. 7, p. 1203-1240, 1964.

DORR, J. V., N. Physiographic, stratigraphic, and structural development of the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil. US Government Printing Office, 1969.

FERREIRA RF. Estudo de liberação das fases minerais em minérios de ferro [dissertação de mestrado]. Departamento de Engenharia de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto; 2013.

FERREIRA, K. C., GALERY, R., MONTENEGRO, L. C. M., & PERES, A. E. C. Efeito do escalpe no Work Index de Bond. *HOLOS*, v. 7, p. 59-64, 2015.

FIGUEIRA, H. V. O.; ALMEIDA, S. L. M.; LUZ, A. B. Continuidade. in: Luz, A. D. Tratamento de Minérios, Rio de Janeiro, Cetem/CNPq, 4ª edição p.113-194, 2004.

FONSECA, U.T. - Moagem em Moinhos Tubulares, Apostila Treinamento Interno - Samarco, 2007;

FONTES, A. V.; GOMES, O. F. M. Classificação automática de tipos de hematita em minério de ferro por análise de textura. 2012.

HERBST, J. A.; LO, Y. C. E FLINTOFF, B. Size liberation. In: Fuerstenau, M. C. E Han, K. N. (Ed.). Principles of mineral processing. SME, 2003, p.61-118.

KALLEMBACK, R. D. C. Investigação da moagem de misturas binárias em moinhos de bolas. 2012. Tese de Doutorado. M. Sc. thesis, Universidade Federal do Rio de Janeiro (in Portuguese).

KAWATRA, S.K.; EISELE, T.C. (1988) Rheological effects in grinding circuits. *International Journal of Mineral Processing*, vol. 22, p. 251-9.

LUZ, A. B. D., & LINS, F. A. F. . "Areia industrial." CETEM, 2008.

LUZ, A. B. D., SAMPAIO, J. A., e FRANÇA, S. C. A.. *Tratamento de minérios*. CETEM/MCT, 2010.

LUZ, A. B. D., ALMEIDA, S. L. M. D., e BRAGA, P. F. A. "Cominuição: Britagem e moagem." CETEM/MCTIC, 2018.

NBR NM 76 - *Portland cement - Determination of fineness by the air permeability method (Blaine method)*, Rio Janeiro, 1998.

PARAPARI, P. S.; PARIAN, M.; ROSENKRANZ, J. Breakage process of mineral processing comminution machines—An approach to liberation. *Advanced Powder Technology*, v. 31, n. 9, p. 3669-3685, 2020.

PIUZANA *et al.* Espaços de minerar e caminhos de abastecer: as paisagens, os lugares e o território do Quadrilátero Ferrífero. *TARAIRIÚ—Revista Eletrônica do Laboratório de Arqueologia e Paleontologia da UEPB*. Campina Grande, ano II, v. 1, n. 02, p. 127-141, 2011.

RIBEIRO, M. R. (2004) Investigação das Características dos Minérios de Ferro da CVRD que Influenciam seu comportamento na Moagem - Dissertação de Mestrado em REDEMAT / UFOP-CETEC-UEMG.

ROCHA, J.M.P. Definição da tipologia e caracterização mineralógica e microestrutural dos itabiritos anfíbolíticos das minas de Alegria da Samarco Mineração S.A [tese]. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais; 2008.

RODRIGUES, R. S.; BRANDÃO, P. R. G. Influência da liberação mineral nas etapas de moagem e flotação do minério de ferro. *Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração*, v. 14, n. 3, p. 279-287, 2018.

ROSA, A. C. Método para estimativa do consumo específico de energia de itabiritos em moinhos de remoagem a seco. 2019. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

ROSIÈRE, C. A. A recristalização do minério de ferro da jazida do Pico do Itabirito no Quadrilátero Ferrífero e suas implicações genéticas. In: II Simpósio de Geologia de Minas Gerais, 1983, Belo Horizonte. Boletim da SGB – Núcleo Minas Gerais. Belo horizonte: SBGMG, 1983. v. 3. p.173-186.

ROWLAND, C. A. Selection of Rod Mills, Ball Mills, Pebble Mills and Regrind Mills. In: MULLAR, A. L; JERGENSEN, G. V. Design and installation of comminution circuits. New York: SME, 1982.

ROWLAND, C.A; KJOS, D.M. Rod and ball mills. In: KAWATRA, S.K.. Comminution practices. Littleton, Colorado, U.S.A: SME, 1997. Cap. 39.

SCHULZ, N. F. Measurement of surface areas by permeametry. *International Journal of Mineral Processing*, 1974.

SILVA, C.C. A influência das características microestruturais de minérios de ferro em suas moagens. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais, 2003, 100p. (Tese, Doutorado, Engenharia Metalúrgica e de Minas).

TAGGART, A.F. Handbook of mineral dressing: ore and industrial minerals. New York: John

Wiley, Sec. 19, 1945.

TURRER, H.D.G, SAWASATO, E.Y., GUIMARÃES, F.R., MAGALHÃES, C.R., DIAS, G.S., RUSSO, J.C., PIMENTEL, D.A., MAZZINGHY, D.B. Avaliação do consumo energético na moagem de dois diferentes tipos litológicos da Serra do Sapo, Submetido: 43º Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-Primas - ABM, Belo Horizonte, 2013.

VIEIRA, C.B., ARAÚJO, F.G.S., KRUGER, F.L., KRUGER, P. - Estudo do Comportamento de Moagem de Minérios de Ferro em Escala de Bancada – 2002.

VON KRUGER, F, L. Corpos moedores côncavos. 2004.

WALKER, W.H., Lems, W.K., Mcadams, W.H. e Gilliland, E.R. Principles of Chemical Engineering, McGraw-Hill, p.255, New York, (1937).

WILLS, B.A. Mineral Processing Technology: an Introduction to the practical aspects of ore treatment and mineral recovery. 7th ed. Oxford: Elsevier. (2007).