



CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS
DEPARTAMENTO DE MINAS E CONSTRUÇÃO CIVIL
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MINAS

**PROJETO, IMPLANTAÇÃO E AVALIAÇÃO DE MOINHO DE BOLAS EM ESCALA
LABORATORIAL**

ROGÉRIO LEONARDO OLIVEIRA

ARAXÁ

2015

**PROJETO, IMPLANTAÇÃO E AVALIAÇÃO DE MOINHO DE BOLAS EM
ESCALA LABORATORIAL**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro de Minas.

Orientadora: Profa. Dra. Michelly dos Santos Oliveira

ARAXÁ

2015

Rogério Leonardo Oliveira

**PROJETO, IMPLANTAÇÃO E AVALIAÇÃO DE MOINHO DE BOLAS EM ESCALA
LABORATORIAL**

Trabalho de conclusão de curso apresentado
ao Centro Federal de Educação Tecnológica
de Minas Gerais como requisito parcial para
obtenção do título de Engenheiro de Minas.

Data de aprovação: 12 / 08 / 2015

Banca Examinadora:

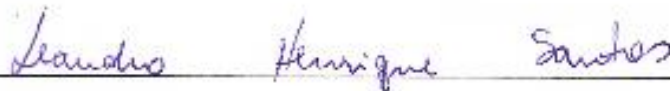


1º Examinador – Presidente da Banca Examinadora - Orientadora

Profª. Dra. Michelly dos Santos Oliveira – CEFET-MG Unidade Araxá



2º Examinador: Prof. Ms. Michel Melo Oliveira - CEFET-MG Unidade Araxá



3º Examinador: Prof.ª Ms. Leandro Henrique Santos - CEFET-MG Unidade Araxá

Dedico este trabalho aos meus pais que tanto me apoiaram durante todos esses anos de estudos. E a minha família em geral que sempre foram meus guias e fonte de inspiração.

Agradecimentos

Agradeço imensamente a Deus por ter me guiado por este caminho até a profissão a qual escolhi. Agradeço a minha mãe Márcia Lêda Ribeiro de Oliveira e ao meu pai Ademir Donizete de Oliveira que juntamente com meus irmãos Cairo e Ademir Jr sempre apoiaram minha caminhada.

A minha namorada Karina de Oliveira Silva que conseguiu ser inspiração nos dias difíceis e porto seguro quando as coisas não caminhavam como desejadas, não deixando que a desistência fizesse parte dos meus planos.

Agradeço muito aquela pessoa que me ensinou boa parte do que eu sei, a minha orientadora Michelly dos Santos Oliveira, que desde os tempos de curso técnico foi paciente, protetora e forjou o meu eu profissional. Não se esquecendo do técnico em laboratório, João Victor da Silva Alves, que sempre esteve presente nos momentos de desenvolvimento experimental.

Agradeço a todos meus colegas de turma que compartilharam suas experiências e também deixaram ensinamentos que serão levados pra vida toda. Agradeço por fim aos meus amigos que durante toda a vida foram incentivadores e considerados meus irmãos.

*Ainda que eu falasse a língua dos homens e
dos anjos sem amor nada seria.*

Coríntios

Resumo

A cominuição é indispensável em quase todos os processos de processamento mineral e sua baixa eficiência energética a torna uma operação extremamente delicada. O estudo dos processos de cominuição são cada vez mais importantes, pois podem orientar novos caminhos que visem a melhoria da eficiência e um moinho laboratorial de qualidade pode auxiliar nestes tipos de avanços. O objetivo deste trabalho foi projetar, implantar um moinho de bolas reformado no laboratório de tratamento de minérios do CEFET – MG, Unidade Araxá avaliando sua operação verificando qual a melhor condição de operação que forneça a maior relação de redução.

Palavras-chave: Cominuição. Moinho laboratorial. Moinho de bolas.

Abstract

The comminution is present in almost all Mineral Processing Processes and low your Energy Efficiency one makes a very delicate operation. The study of comminution processes are increasingly important because they can guide new ways aimed at improving efficiency and a laboratory mill quality can help in these kinds of advances. The objective was to design, implement and evaluate the performance of a ball mill renovated to the laboratory treatment of ores CEFET - MG , Campus IV - Araxá.

Keywords: Comminution, laboratory mill, project mill.

Sumário

1	INTRODUÇÃO	10
2	OBJETIVOS	11
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	12
3.1	Cominuição.....	12
3.1.1	Mecanismos de fragmentação	13
3.1.2	Britagem	14
3.1.3	Estágios da fragmentação	15
3.2	Moagem	16
3.2.1	Moinhos cilíndricos	16
3.2.1.1	Alimentação dos moinhos	18
3.2.1.2	Descarga dos moinhos	19
3.2.1.3	Revestimento dos moinhos	19
3.2.1.4	Variáveis operacionais	22
3.3	Moinhos de Bolas	24
3.4	Moagem Laboratorial.....	25
4	METODOLOGIA.....	26
4.1	Projeto.....	26
4.2	Implantação e Avaliação do Moinho.....	29
4.2.1	Amostra	29
4.2.2	Caracterização granulométrica	30
4.2.3	Cálculo de corpos moedores totais.....	31
4.2.4	Planejamento experimental	31
4.2.5	Determinação do volume de amostra	32
4.2.6	Testes de moagem	33
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	33
5.1	Projeto.....	34
5.2	Avaliação dos parâmetros do novo moinho.....	36
6	CONCLUSÃO	40
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	41

1 INTRODUÇÃO

O processo de moagem de minérios é uma operação presente em praticamente todas as unidades de tratamento de minérios, salvo algumas onde o minério é empregado diretamente em construção civil ou para rochas ornamentais. Tal processo se mostra bastante caro e, por isso, é um ponto sensível no gerenciamento e operação de uma usina. Um exemplo citado por Chaves (2012) é de que no custo de processamento de minérios de cobre, desde a mina até o embarque do concentrado, as operações unitárias de cominuição contribuíram com 40% dos custos totais.

Os equipamentos de moagem mais utilizados são conhecidos como moinhos cilíndricos, tubulares ou de carga cadente que compreendem os moinhos de barras, moinhos de bolas, moinhos de seixos e os moinhos semi autógenos. Esses moinhos são constituídos de um corpo cilíndrico que gira em torno do seu eixo e é revestido por placas de desgaste, metálicas, de material cerâmico ou de borracha que tem como objetivos a proteção da carcaça e o aumento da eficiência da operação.

As dimensões de um moinho industrial variam na ordem de 5 a 10m de comprimento; já os de escala laboratorial não ultrapassam a marca dos 100 cm, com um sistema de acionamento relativamente simples e de fácil manutenção tendo em vista a natureza puramente acadêmica das atividades realizadas pelo mesmo (CHAVES, 2012).

Este tipo de equipamento traz a um laboratório possibilidades muito grandes quanto aos tipos de trabalho que podem ser realizados pelos usuários fazendo com que a eficiência e, conseqüentemente, a confiabilidade, tornem avanços técnicos e tecnológicos uma realidade para a instituição de ensino.

A eficiência do processo, medida através da redução de custos operacionais, se dá através de um correto dimensionamento do moinho, que visa à confecção de um equipamento que possa trabalhar um determinado número de horas produzindo um material de granulometria adequada com um gasto controlado de energia.

A operação de moagem, se executada de maneira incorreta, pode levar a uma sobremoagem, que produzirá um material de granulometria muito fina, ou uma

submoagem que produzirá um material de granulometria mais grosseria. No primeiro caso temos alguns problemas relacionados à produção de finos, além de um gasto desnecessário de energia. Já no segundo corre-se o risco de não atingir o grau de liberação desejado, prejudicando, conseqüentemente, o processo subsequente de concentração, diminuindo a qualidade final do produto e a eficiência do processo como um todo.

Chaves, 2012, numera os fatores que influenciam na operação dos moinhos são basicamente o tipo de processo (a úmido ou a seco), o tipo de circuito (aberto ou fechado), a carga circulante presente na operação, a porcentagem de sólidos, o tipo de corpos moedores, a forma com que a carga se move dentro do moinho, a velocidade de operação (em função da porcentagem da velocidade crítica) e o fator de enchimento do moinho. Tendo em vista que em um laboratório o número de horas trabalhadas é infinitamente menor do que em uma indústria a eficiência do moinho passa diretamente por sua configuração geométrica e pela correta utilização por seus operadores.

O laboratório de tratamento de minérios do curso de Engenharia de Minas do CEFET/MG possuía um moinho com a carcaça em estado avançado de deterioração e passível de otimização. Essa otimização passa pela reforma do moinho existente feita através de uma parceria entre o CEFET e a PRECISMEC LTDA, uma empresa privada da cidade de Araxá, com o objetivo de atingir uma configuração que seja mais eficiente no atual cenário.

2 OBJETIVOS

Os objetivos deste trabalho são aprimorar o moinho já existente através da aquisição de um novo corpo cilíndrico e avaliar o moinho modificado quanto à algumas variáveis. As variáveis testadas foram a quantidade de carga moedora (ou fator de enchimento do moinho) e a velocidade do moinho (estimada em porcentagens de sua velocidade crítica).

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo será apresentada uma revisão sobre a cominuição, moagem em geral e alguns parâmetros de moagem laboratorial que tem por finalidade mostrar as particularidades desta operação em uma escala de laboratório.

3.1 Cominuição

Cominuição é o conjunto de operações de redução de tamanhos de partículas minerais, realizado de maneira controlada de modo a alcançar um objetivo predeterminado como o controle do tamanho máximo dos produtos e a restrição quanto a quantidade de finos produzidos (CHAVES, 2012).

Chaves, (2012) pontua algumas razões das operações de cominuição serem extremamente necessárias em níveis industriais, são elas:

- permitir o manuseio do material de mineração, pois alguns materiais quando não reduzidos são muito pesados e de difícil movimentação em uma instalação de mineração;
- permitir o transporte contínuo em transportadores de correia pois estes são, em algumas ocasiões, muito mais convenientes que caminhões ou outros veículos a diesel;
- adequar o minério a sua aplicação industrial como é o caso das britas, do carvão mineral e do calcário utilizado para calagem de solos, todos estes em granulometrias adequadas para sua utilização eficiente;
- liberar as partículas dos minerais úteis e dos minerais de ganga e permitir a sua separação, por meio dos processos de concentração, em concentrados, rejeitos e produtos intermediários.

Essa operação é realizada através de dois principais processos, a britagem para partículas mais grosseiras (na faixa de 5 a $2\frac{1}{2}$ ft) e a moagem para partículas mais finas (de $\frac{3}{4}$ a $\frac{3}{8}$ ").

3.1.1 Mecanismos de fragmentação

A cominuição sendo um fenômeno basicamente de quebra, ou seja, um fenômeno físico, pode acontecer através de três mecanismos principais e distintos, impacto, compressão e cisalhamento. Eles ocorrem isoladamente ou em conjunto através da movimentação da carga dentro do moinho e do contato direto de partícula/partícula e/ou partícula/carcaça.

A quebra por impacto leva à formação de uma grande quantidade de partículas com ampla distribuição granulométrica, através da aplicação de uma força muito superior à resistência da mesma (VALADÃO E ARAÚJO, 2007). Esse mecanismo ocorre principalmente em britadores.

Na compressão a partícula é submetida à aplicação de uma tensão entre duas superfícies e leva a formação de dois produtos distintos: partículas grossas resultantes da quebra por tensão; e partículas finas da quebra por compressão no ponto onde a carga aplicada foi concentrada (WILLS, 2006).

A quebra por cisalhamento ocorre quando a força aplicada não é suficiente para provocar a fratura em toda a partícula, gerando pequena diminuição do tamanho da partícula original e a formação de partículas muito finas (VALADÃO E ARAÚJO, 2007). Processo dominante nos moinhos.

A figura 1 mostra de maneira simplificada o funcionamento dos três mecanismos que regem a cominuição. Com o aumento da intensidade de energia, a força aplicada promove uma maior fragmentação, sendo assim, com uma intensidade pequena obtemos uma fragmentação de grau menor, cisalhamento, em contra partida com grande intensidade de energia temos um alto grau de fragmentação, promovendo a pulverização da rocha, impacto.

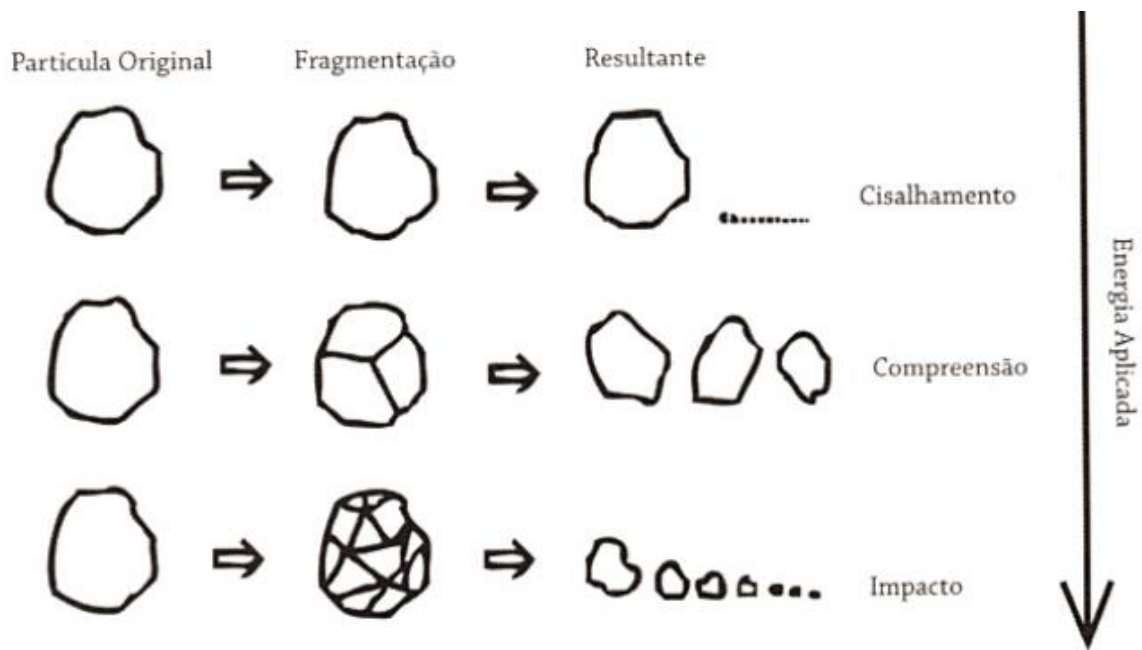


Figura 1 – Mecanismos de fragmentação (Valadão e Araújo, 2007).

3.1.2 Britagem

Sendo a britagem a primeira fase da cominuição é importante entender que a mesma é feita por equipamentos, denominados britadores, que desempenham um papel importante no processo. Vários são os tipos de britadores utilizados na indústria variando principalmente sua forma geométrica, o mecanismo de ação e seu tamanho, definido pelo volume de rocha a ser processado.

Chaves (2012) coloca que a britagem exige um volume de partícula em que possa se desenvolver, se restringindo, portanto aos tamanhos maiores. A britagem possui uma relação de redução (RR) pequena enquanto a moagem leva a grandes relações de redução.

A relação de redução é definida como a quantidade relativa de vezes que uma partícula é reduzida em relação ao seu tamanho original, toma por base a granulometria da alimentação e do produto. A relação de redução pode ser expressa em forma de equação onde A_{80} representa o tamanho da partícula onde 80% da alimentação é passante e P_{80} o tamanho da partícula onde passa 80% do produto. A equação 1 apresenta essa relação.

$$RR = A_{80}/P_{80}$$

Equação 1 – Relação de Redução.

3.1.3 Estágios da fragmentação

Tanto a britagem quanto a moagem são feitas de formas estagiadas, pois devido à pequena eficiência energética, natural da operação, é necessário que a redução seja feita de maneira controlada em etapas. É comum na britagem haver até três estágios sendo que quando existe um quarto este se superpõe a moagem grosseira. Sendo assim, este estágio produz uma granulometria semelhante tanto na britagem quaternária quanto na moagem primária diferenciando-se apenas pelo tipo de equipamento utilizado.

No total são distinguidos seis estágios (CHAVES, 2012) que são apresentados na tabela 1.

Tabela 1 – Fases da cominuição. (CHAVES, 2012).

Estágio	Relação de Redução	Tamanho Máximo	
		Alimentação	Produto
Britagem primária	8:1	5 a 2 ½ ft	> 1 ft a 4"
Britagem secundária	6 a 8:1	25" (cônicos)	4 a ¾"
Britagem terciária	4 a 6:1	Depende da câmara do britador	1 a 1/8".
Britagem quaternária	Até 20	3" ou 1 ¼"	12" a 20 #
Moagem grossa	Até 20	¾" a 3/8"	6 a 35 #
Moagem fina	100 a 200	½"	fino

Os circuitos de cominuição podem ter configurações diversas, mas basicamente teremos circuitos fechados, com recirculação de material e circuitos abertos onde o material não irá recircular dentro do mesmo.

3.2 Moagem

De acordo com Chaves (2012), a moagem envolve as operações de cominuição na faixa de tamanho abaixo de $\frac{3}{4}$ " e é efetuada principalmente pelos mecanismos de arredondamento das partículas, quebra de pontas e abrasão. Sendo assim, a faixa de tamanho em que se trabalha e, principalmente, os mecanismos de redução de tamanhos, que distinguem as operações de moagem e de britagem.

Os objetivos da moagem, como operação unitária de tratamento de minérios são descritos por Chaves (2012) e relacionados como: liberação das espécies minerais com vistas às operações de concentração subsequentes; adequação de produtos às especificações granulométricas industriais como o talco; transporte em minerodutos; adequação ao uso subsequente, como por exemplo moagem de *pellet feed* para a pelotização e aumento da área de superfície para facilitar a reação química em processos hidrometalúrgicos.

3.2.1 Moinhos cilíndricos

Os equipamentos mais importantes na moagem são sem sombra de dúvida os chamados moinhos de carga cadente não se esquecendo que para as chamadas aplicações especiais encontraremos os: moinhos de martelo (principalmente na moagem de carvão), moinhos vibratórios, de discos e de impacto.

Chaves (2012) define os moinhos de carga cadente como equipamentos constituídos de um corpo cilíndrico que gira em torno de seu eixo. Esse equipamento é mostrado na figura 2. De forma geral, a carcaça do moinho (*shell*) é feita de chapa calandrada e soldada com espessura indicada que varia entre 1/100 e 1/75 do diâmetro do moinho (Garcia, 2000). Ela é fechada nas duas extremidades por peças de aço fundido chamadas tampas, cabeças ou espelhos (*heads*). Os moinhos são sempre revestidos internamente por material que seja resistente ao desgaste podendo ser constituído de metal ou borracha. Eventualmente se encontram moinhos com revestimento cerâmico.



Figura 2 – Moinho de carga cadente.

Segundo Beraldo (1987), o acionamento dos moinhos normalmente é realizado por transmissão através de coroa feita de aço em duas metades emendadas por aparufasamento, para maior facilidade de montagem. Toda a carcaça é sustentada através de munhões que giram dentro de mancais do tipo auto-alinhante.

Os moinhos de carga cadente são caracterizados principalmente pelas características de seus corpos moedores. Assim, temos alguns tipos principais como os moinhos de bolas, de barras, autógenos e semi-autógenos. Os moinhos de barras são usados principalmente em moagem primária enquanto os de bolas são utilizados na moagem secundária. Os moinhos autógenos utilizam o próprio minério como corpo moedor. Chaves (2012) escreve que essa operação realiza, em equipamento e estágio único, reduções de tamanho que cobrem desde a fase de britagem primária até a moagem, não pertencente, portanto, em senso estrito, ao campo da moagem.

3.2.1.1 Alimentação dos moinhos

Os moinhos dispõem de diferentes sistemas de alimentação para melhor atender aos requisitos de *layout* e de processo (BERALDO, 1987). A alimentação através de *scoop-feeder* (*bico de papagaio*) é a mais utilizada, pois dispensa, no caso de se empregar classificador espiral e moinho pequeno, o uso de bomba para elevação da polpa. Na classificação por ciclones, o sistema de alimentação mais usado é o *spout-feeder* (*alimentador de tubo*), o qual necessita, entretanto, que os ciclones estejam montados a uma altura suficiente para garantir a alimentação direta do moinho. É também usado o alimentador de tambor (*drum-feeder*), que requer uma altura de queda para alimentação menor que o exigido pelo *spout-feeder*. A figura 3 mostra os sistemas de alimentação mais utilizados.



Figura 3 – Tipos de alimentadores em moinhos cilíndricos. Fonte Manual de britagem METSO (2005).

3.2.1.2 Descarga dos moinhos

A descarga dos moinhos de bolas e de barras pode se dar através de diferentes arranjos de forma a se atender as conveniências de aplicação como mostrado na figura 4.

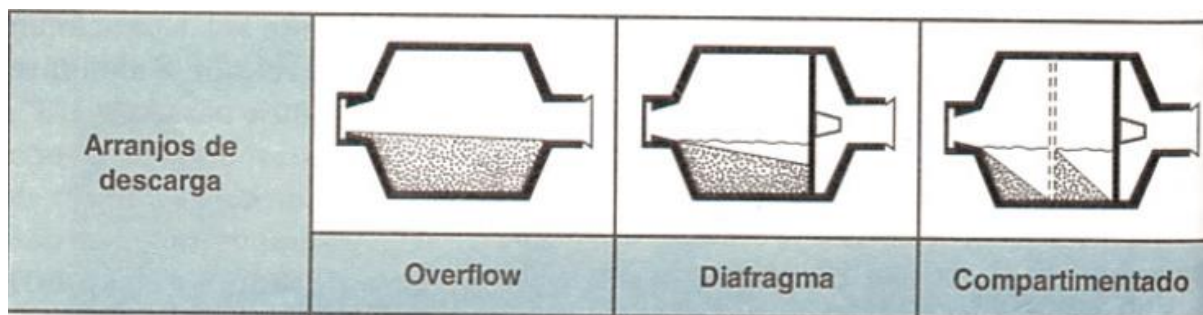


Figura 4 – Tipos de descarga para moinhos. Fonte: Manual de britagem METSO (2005).

A descarga por *Overflow* é utilizada tanto para moinhos de bolas quanto para os de barras e aplicada de preferência em moagem fina por não apresentar dificuldade de escoamento. É característica desse tipo de descarga o desnível entre a alimentação e o transbordo, que permite o deslocamento da polpa mineral. A descarga por Diafragma, que consiste de uma chapa perfurada (crivo), é exclusiva para moinho de bolas e é recomendada quando a alimentação é grosseira. Nesse tipo de descarga a potência consumida é cerca de 15% superior ao anterior (BERALDO, 1987) porém sua disponibilidade é reduzida e seu custo de manutenção é elevado, tornando sua aplicação conveniente apenas em casos de necessidades especiais. A descarga periférica é exclusividade dos moinhos de barras em moagem grosseira e pode acontecer na parte central ou nas extremidades. É mais usada em casos em que se deseja produtos granulados e o desgaste das barras é superior a moagem com descarga por overflow.

3.2.1.3 Revestimentos dos moinhos

Para a proteção da carcaça contra o desgaste e redução do escorregamento entre a carga de corpos moedores e a parede do moinho são utilizados revestimentos que são fabricados de materiais resistentes ao desgaste e de forma que sua substituição seja de fácil realização.

Dentre os vários materiais utilizados podemos destacar a borracha, os revestimentos feitos a partir de ligas metálicas e para aplicações especiais revestimento de cerâmica (BERALDO, 1987). O tipo de revestimento varia de acordo com a aplicação sem deixar de levar em conta os custos envolvidos em sua

aplicação e a função industrial. Em geral, segundo (BERALDO, 1987) para aplicações mais brandas teremos revestimentos de baixo custo. Os materiais mais empregados atualmente como revestimento estão apresentados na tabela 2. O desgaste relativo mostra o consumo de revestimento em relação à dureza Brinell (BHN) do material do qual é fabricado, a tabela 2 mostra que quanto menor é a dureza BHN maior é o desgaste do revestimento.

Tabela 2 – Características dos revestimentos. Fonte: BERALDO (1987).

MATERIAL	DUREZA BHN	DESGASTE RELATIVO
A – Ferro fundido Cr-Mo	600 – 740	100 – 105
B – Ferro fundido alto Cr	550 – 650	110 – 115
C - Ni-Hard	520 – 650	120 – 130
D – Aço martensítico CR-Mo	450 – 555	135 – 145
E – Aço austenítico ao Mn 6-Mo 1	190 – 230	150 – 175
F – Aço perlítico Cr-Mo, de alto C	250 – 420	155 – 200
G – Aço austenítico ao Mn 12	180 – 220	200 – 300

De acordo com Beraldo (1987), as formas de revestimentos utilizadas dependem das condições de operação do moinho. Para revestimento mais liso há uma predominância de moagem por atrito, sendo, portanto, mais aplicado em moagem fina; para moagem mais grossa é recomendável revestimento de maior rugosidade. Para a escolha do tipo mais adequado de revestimento, assim como para a escolha do material de fabricação, é importante considerar diversos fatores como o tipo, o tamanho e a velocidade de operação do moinho, o tipo de descarga, a dureza do minério, a granulometria da alimentação e do produto. Além disso, o diâmetro dos corpos moedores, se a operação é realizada via seca ou úmida, a densidade dos corpos moedores, a presença de fragmentos dos corpos moedores e o modo de recarga dos mesmos também devem ser considerados. Junior *et al.* (2012) escreve que o revestimento ideal além de promover um aumento de eficiência da operação permite um tempo longo de proteção a carcaça aumentando o número de horas trabalhadas e consequentemente o intervalo de paradas para manutenção.

Tanto para os moinhos de barras quanto de bolas o tipo de revestimento será escolhido de acordo com a sua aplicação e eficiência de operação.

Segundo Beraldo (1987) dificilmente o revestimento usado em qualquer moinho é do tipo inicialmente utilizado nesse mesmo moinho. Quando utilizam revestimento de metal, os moinhos geralmente tem uma cobertura de lençol de borracha entre a carcaça e o revestimento, evitando o desgaste da carcaça por material que venha a entrar por trás do revestimento por meio das aberturas existentes. Essa proteção de borracha também serve como um suporte elástico à fixação dos revestimentos e protege a carcaça da corrosão, que é considerável em moagem a úmido (BERALDO, 1987).

Beraldo (1987) explica que o uso de revestimento de borracha em moinhos de bolas começou no início da década de 60 e, desde então, têm-se desenvolvido amplamente no mundo todo. Para sua utilização deve-se alterar o desenho do revestimento metálico para adequá-la a borracha. Desde o início, os revestimentos de borracha têm sido do tipo placa e barra de levantamento. O diâmetro do moinho, sua velocidade e o diâmetro das bolas são fatores preponderantes para a escolha e projeção do revestimento. A aplicação de revestimento de borracha é especialmente vantajosa no caso de moagem fina (bolas pequenas) e material muito abrasivo.

Devido a alta temperatura, revestimento de borracha não devem ser usados em moagem a seco pois suportam bem até temperaturas de 80°C, temperatura essa que é ultrapassada facilmente nesse tipo de operação. Outra contra indicação é no caso de utilização de polpa que contem óleo mineral, pois o mesmo corrói a borracha. Em contra partida a borracha não sofre corrosão por elementos químicos o que acontece com revestimentos metálicos.

A conveniência de substituir ou não o revestimento metálico por borracha dependerá de cada caso e, ainda, dos preços dos mesmos. Na metade dos anos 80 o custo do revestimento de borracha era inferior ao metálico enquanto que após alguns anos esse cenário se inverteu tornando a troca não compensatória (BERALDO, 1987).

3.2.1.4 Variáveis operacionais

De acordo com Chaves (2012), as características principais de um moinho são suas dimensões (diâmetro e seu comprimento) sendo a potência instalada função principal das mesmas sendo diretamente afetada por suas variáveis operacionais. As principais variáveis operacionais são: a quantidade de corpos moedores, a velocidade de rotação e a porcentagem de sólidos.

A quantidade de corpos moedores é expressa em porcentagem do volume interno do moinho podendo ser essa carga de barras, bolas, *cylpebs* ou ainda seixos. *Cylpebs* são peças metálicas cilíndricas que podem ser usadas em lugar das bolas e sua utilização depende diretamente de sua funcionalidade industrial já que possuem um custo de aquisição maior. A utilização de seixos está relacionada com a impossibilidade de contaminação da polpa com o ferro produzido durante a abrasão da moagem.

A moagem é, na maioria dos casos, realizada a úmido com uma polpa entre 50 e 60% de sólidos. A quantidade de água adicionada junto com a alimentação do minério a moer afeta tanto a velocidade com que as partículas passam por dentro do moinho como também a viscosidade e densidade da polpa modificando a ação mecânica das barras ou bolas (CHAVES, 2012).

A variação da velocidade dentro de um moinho de carga cadente permite que aconteçam certos fenômenos e tornando-se uma variável de controle importante e passível de otimização no processo. Abaixo seguem a relação desses fenômenos juntamente com a velocidade em que ocorrem (CHAVES, 2012).

- a) Em velocidades baixas, as cargas de corpos moedores são arrastadas pela carcaça até uma certa altura, de onde rolam sobre ela e umas sobre as outras o que configura o movimento denominado cascadeamento. Tendo os corpos moedores um movimento de translação ocorre um atrito entre corpos moedores, partículas e revestimentos que provoca a abrasão de partículas.

- b) Com um aumento da velocidade de rotação do moinho, as bolas passam a ser lançadas para cima percorrendo uma trajetória parabólica, acabando por cair sobre as outras bolas configurando um movimento conhecido como cataratamento que é de suma importância quando há a presença de partículas grosseiras dentro do moinho.
- c) Se a velocidade for aumentada, as bolas, em sua queda, ultrapassam o leito de bolas e passam a ser lançadas diretamente sobre o revestimento, do lado oposto ao moinho. Situação indesejada pois não ocorre moagem efetiva do minério.
- d) Com a velocidade ainda mais alta é atingida a velocidade crítica que é a rotação onde a carga é centrifugada contra a carcaça do moinho. A velocidade de um moinho é dada pela porcentagem da velocidade crítica que é expressa segundo a equação 2:

$$VC = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{2g}{D}}$$

Equação 2 – Velocidade Crítica do Moinho.

O perfil do revestimento interno afeta também, de forma sensível, a trajetória dos corpos moedores (CHAVES, 2012). Os *lifters*, saliências no revestimento, tem como função levantar a carga de corpo moedor dando-lhes um impulso ascendente. A figura 5 mostra os diversos tipos de revestimentos segundo seus perfis.

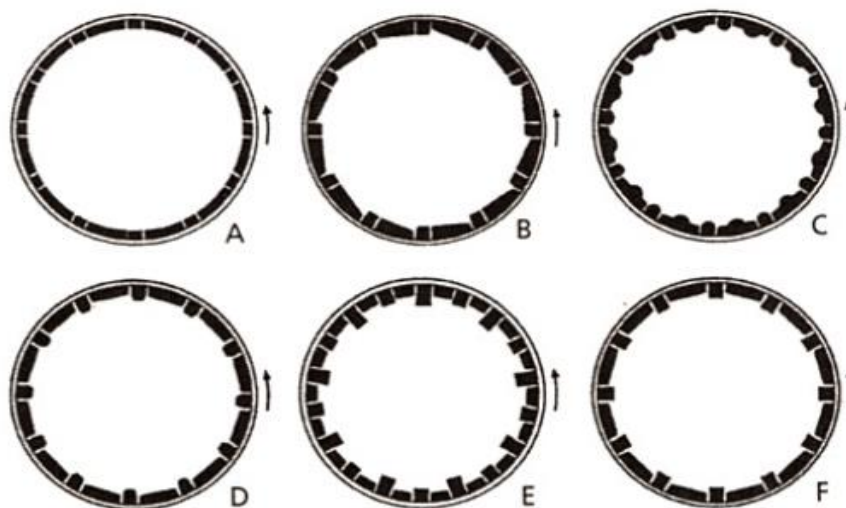


Figura 5 – Perfis dos revestimentos de borracha. Fonte: CHAVES (2012).

O revestimento liso faz com que o rolamento seja favorecido sendo o mais indicado para moagem fina onde não há presença de partículas grosseiras na alimentação.

Silva *et al*, (2013), em estudos realizados na Vale Fertilizantes demonstra que o desgaste do revestimentos não é uniforme numa mesma seção do moinho tendo diferenciações grandes no centro e nos pontos de alimentação e descarga, tudo em função do tempo de funcionamento do mesmo.

3.3 Moinhos de Bolas

Esses moinhos operam com a alimentação na faixa de 14 # (1,18mm) a 28 # (0,592mm) e geram um produto tão fino quanto se queira. Beraldo (1987) afirma que o maior moinho de bolas à época tinha 18ft, cerca de 5m de diâmetro. A relação comprimento/diâmetro interno varia entre 1 e 5 (1 a 2, de acordo com Rowland e Kjos, 1969) aumentando conforme aumente a finura desejada para o produto. As condições usuais de operação são 65% a 80% da velocidade crítica (VC) e 35% a 50% do volume útil cheio de bolas (ROWLAND e KJOS, 1969). A característica dos corpos moedores é definidas segundo sua aplicabilidade industrial. O formato esférico é o mais comumente utilizado podendo variar de acordo com a necessidade da operação. Logicamente, quanto mais dura for a bola maior será sua durabilidade

e sendo a dureza sempre associada a fragilidade essa característica é importante para a escolha do material constituinte da carga moedora.

Maia (1994) recomenda que sempre que possível o engenheiro tratamentista deve acompanhar de perto os trabalhos de fabricação do lote de corpos moedores verificando os resultados da análise química (teor de cromo, por exemplo) e outros parâmetros a fim de comparar as características do lote com as especificações técnicas exigidas. Nesse caso uma amostragem do lote se mostra de extrema importância para com o controle de qualidade do processo.

De acordo com Chaves (2012), é muito frequente um teste denominado *shatter test*, onde as bolas são deixadas cair de uma altura de 5m sobre uma placa de aço, para averiguar e avaliar a resistência das bolas.

3.4 Moagem Laboratorial

A moagem laboratorial é peça importante no desenvolvimento de pesquisas e no avanço do conhecimento, principalmente quando esse tipo de operação acontece em instituições de ensino. Um moinho de laboratório é dimensionado e projetado de acordo com os requisitos que são definidos pelo laboratório. Fatores como quantidade disponível de material a ser ensaiado e características do material são de extrema importância e devem ser levados em conta no momento do projeto.

Se comparado com um moinho industrial, os moinhos laboratoriais têm um número bastante inferior de horas trabalhadas e isso faz com que alguns parâmetros de desgaste, tanto de revestimento quanto de corpos moedores não se apliquem da mesma forma.

Um projeto dessa natureza pode levar em conta questões econômicas, ambientais e científicas. Como normalmente não existem empresas especializadas em moinhos dessa dimensão (menores do que os industriais) os mesmos são projetados e fabricados sob encomenda e o custo pode se mostrar bastante elevado variando de acordo com o tipo de material utilizado em sua confecção, nesses casos algumas empresas especializadas em montagens mecânicas podem fornecer peças que tem qualidade provada e são descartadas devido a impossibilidade de uso em outros equipamentos.

Sendo a cominuição a primeira fase do tratamento, um laboratório que dispõe de um moinho eficaz faz com que todas as operações subsequentes sejam mais eficientes aumentando a qualidade e a confiabilidade dos testes realizados no mesmo.

Uma das aplicações mais efetivas de um moinho em escala laboratorial é na medição do índice de trabalho de moagem também referido como WI (*work index*), ou ainda BWI (*Bond work index*). Esses índices se ferem a parâmetros derivados de ensaios de similaridade realizados em moinhos laboratoriais (SCHNEIDER *et al*, 2013). Índices como esses são bem conhecidos e utilizados como padrão permitindo o dimensionamento de moinhos e outros equipamentos, por engenheiros e técnicos.

4 METODOLOGIA

Este trabalho foi dividido em duas fases principais, são elas: projeto de uma nova carcaça de moinho que possibilite a melhoria do mesmo, e a avaliação do efeito de variáveis operacionais na relação de redução da moagem de minério fosfático.

4.1 Projeto

O trabalho se iniciou com a observação de operação do moinho antigo medindo suas dimensões principais, sua velocidade crítica e capacidade volumétrica, com o objetivo de compreender melhor o equipamento e aprender a melhor forma de operá-lo. A tabela 3 mostra as principais características do moinho antes da reformatigo.

Tabela 3 – Características do moinho antes da reforma.

Parâmetros	Valor
Comprimento interno	520 mm
Diâmetro interno	540 mm

Velocidade crítica	57 rpm
Capacidade Volumétrica	119 litros

O antigo cilindro do moinho era revestido de um material cerâmico já desgastado que promovia um aumento muito grande do peso total do equipamento, dificultando ou impossibilitando a operação com alta velocidade, acima de 60% da velocidade crítica, necessária para maioria dos casos. A carcaça já se encontrava com um alto nível de desgaste chegando a apresentar furos em alguns locais da mesma. O moinho não apresentava a devida proteção em suas partes móveis o que trazia alto risco de acidentes, tendo em vista que essas partes ficavam expostas e podiam ocasionalmente se enroscar nos cabelos ou mesmo atingir membros. A figura 6 mostra o moinho sem as proteções e com a antiga carcaça desgastada.



Figura 6 – Moinho antes do projeto.

O projeto em si surgiu da necessidade de proporcionar ao laboratório um equipamento novo que possibilitasse o desenvolvimento contínuo de trabalhos científicos e do avanço tecnológico na instituição. Foi procurada uma empresa

especializada na fabricação e montagem de equipamentos – PRECISMEC – localizada na cidade de Araxá e com mais de 30 anos de experiência no ramo. Um projeto escrito foi apresentado e definiu-se que por fatores como tempo de execução e diminuição de custos o melhor caminho seria a confecção não de um moinho completo, mas apenas de uma nova carcaça, aproveitando o sistema de sustentação e acionamento do antigo. Foi realizado um desenho no programa AutoCAD e posteriormente uma modelagem no programa Inventor 3D. O desenho foi criado utilizando uma versão do ano de 2012 dos dois programas citados acima utilizando o Laboratório de Informática do prédio de mineração do CEFET Unidade Araxá.

Após a conclusão do projeto a empresa especializada se encarregou de buscar o moinho no laboratório para a desmontagem e preparação que envolvia desempenho, pintura e acabamento para as peças de sustentação e acionamento, que receberam a carcaça nova. A figura 6 apresenta o moinho desmontado e preparado para reforma.



Figura 6 – Moinho desmontado.

4.2 Implantação e Avaliação do Moinho

A implantação, que consistiu na instalação do moinho no laboratório da forma que melhor atendesse aos objetivos, ocorreu de forma que a avaliação dos parâmetros fornecesse as características principais e a melhor forma de operação para o minério fosfático testado.

4.2.1 Amostra

O mineral utilizado foi retirado da mina de fosfato da empresa Vale Fertilizantes, localizada em Tapira - MG. Foi caracterizado através de uma análise visual e em microscópio como um mineral apatítico friável contendo minerais de mica e sílica. A friabilidade do material é uma característica importante, pois como será visto posteriormente influencia no resultado final.

A amostra que já se encontrava no laboratório foi retirada de tambores de armazenamento e homogeneizada em cima de uma lona plástica. Após a homogeneização a amostra era quarteada com a utilização de uma espátula. A figura 7 retrata o quarteamento de uma amostra de aproximadamente 26 kg. Após o primeiro quarteamento com a espátula foi utilizado um quarteador Jones para acelerar o processo e torná-lo mais preciso. Essa homogeneização e quarteamento tiveram o único intuito de retirar uma amostra de aproximadamente 350 g para análise granulométrica.



Figura 7 – Quarteamento de amostra.

4.2.2 Caracterização granulométrica

A caracterização granulométrica da amostra da alimentação e dos produtos das moagens foi feita pelo método do peneiramento a seco, em peneirador suspenso, utilizando as peneiras de malha: 4# (4,74 mm), 8# (2,36 mm), 28# (0,592 mm), 48# (0,296 mm), 100# (0,148 mm), 150# (0,105 mm), 200# (0,074 mm) e 270# (0,052 mm). A Figura 8 mostra o peneirador suspenso pertencente ao laboratório de tratamento de minérios e que foi utilizado para a análise granulométrica das amostras, tanto da alimentação quanto do produto. O tempo de peneiramento foi de 30 min.



Figura 8 – Peneirador suspenso.

4.2.3 Cálculo de corpos moedores totais

Para calcular a quantidade de corpos moedores totais disponíveis no laboratório foi medida a capacidade volumétrica de um balde com água, em seguida o mesmo foi preenchido com os corpos moedores. O volume total encontrado foi de 55 litros que correspondia a 37% do volume do moinho. O laboratório disponibiliza três tamanhos diferentes de corpos moedores que são basicamente constituídos de material cerâmico.

4.2.4 Planejamento experimental

Devido à quantidade de massa necessária para realização dos experimentos foi definido que a melhor alternativa seria a realização de uma moagem a seco, uma vez que a moagem a úmido iria implicar em volume alto de amostra para ser seco e o laboratório não dispõe de toda estrutura necessária para quartear, filtrar e secar tal volume de polpa.

O tempo de moagem foi mantido em 20 min. Um experimento com um tempo de 40min foi realizado e não se encontrou grande influência na relação de redução, se comparado ao tempo de 20min estipulado.

Os testes foram realizados seguindo o planejamento experimental, mostrado na Tabela 4. Os níveis mínimos e máximos foram obtidos através de cálculos e da disponibilidade de material e minério do laboratório. A carga foi determinada através do volume total de corpos moedores disponíveis, sendo o nível máximo igual a 37% e o mínimo 30%, estabelecendo um intervalo significativo. A % da velocidade crítica (VC) foi calculada primeiramente através do diâmetro do moinho encontrando-se um valor de 56 rpm. Estudos realizados em livros e artigos determinaram que a % mais utilizada girava em torno de 70% da VC (39 rpm), sendo este estabelecido como valor máximo e 50% de VC (28 rpm) como valor mínimo para a operação. A variável controlada X1 corresponde a carga de corpo moedores e a variável X2 corresponde a velocidade de rotação do moinho. A velocidade de operação do moinho foi apresentada na tabela 4 em rpm e em % da velocidade crítica.

Tabela 4 – Planejamento Experimental.

EXPERIMENTO	X1	X2	CARGA MOEDORA (%)	VELOCIDADE DE ROTAÇÃO (rpm/%de VC)
I	+1	-1	37	28/50
II	+1	+1	37	39/70
III	-1	-1	30	28/50
IV	-1	+1	30	39/70

4.2.5 Determinação do volume de amostra

O volume de sólidos e, portanto, a massa dos sólidos utilizada foi determinada considerando o volume de espaços vazios entre os corpos moedores disponíveis, medido em baldes de volume conhecido.

Primeiramente os baldes foram preenchidos com os corpos moedores e posteriormente preenchido os espaços vazios com água. O Volume de água que ocupava os vazios correspondia ao volume disponível para deposição do minério. A densidade aparente foi medida com o uso de uma proveta de 100 mL, com o volume e massa calculou-sea densidade aparente do minério.

A massa de minério foi definida através da quantidade de carga moedora e da densidade aparente do mineral que é de $1,19\text{g/cm}^3$, portanto, foram utilizadas massas de 20 kg para 30% de carga e 26 kg para 37% de carga.

4.2.6 Testes de moagem

De acordo com o planejamento experimental o moinho era carregado com o minério e em seguida lacrado e a moagem se iniciava controlando-se o tempo de moagem, o fator de enchimento e a porcentagem da velocidade crítica.

Após a moagem do minério descarregava-se o moinho, separava-se os corpos moedores, quarteava o produto de onde se retirava uma amostra de aproximadamente 350 g para análise granulométrica.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados obtidos na elaboração deste trabalho, assim como na metodologia, foram divididos em duas partes distintas e dependentes. A primeira parte mostra a conclusão do projeto do moinho e a segunda parte traz os resultados referentes à avaliação da relação de redução com a variação dos parâmetros selecionados nos experimentos.

5.1 Projeto

Com o auxílio dos softwares de desenho e projeto, um croqui foi elaborado e entregue a empresa tendo como base as dimensões aproximadas do moinho antigo e uma relação de mudanças propostas para o novo. A figura 8 mostra o layout final do projeto, destacando a carcaça nova que foi confeccionada de ferro carbono.

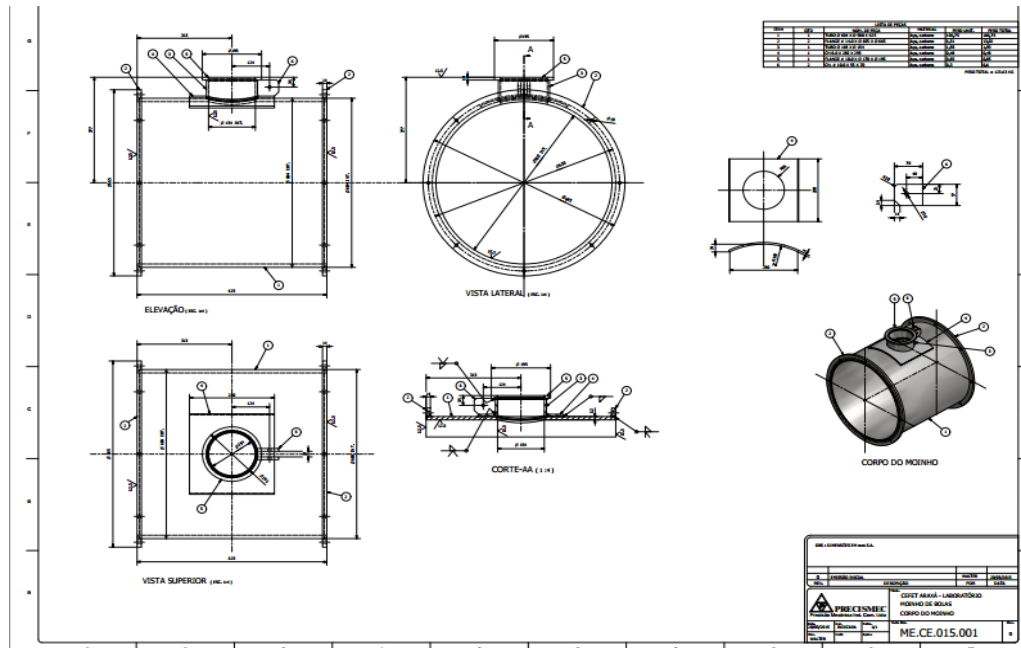


Figura 8 – Croqui da carcaça do novo moinho.

Após três meses de trabalhos a empresa realizou a montagem e a pintura do moinho e o devolveu ao laboratório de tratamento de minérios em condições de uso imediato. A figura 9 mostra o moinho após ser desmontado e ter recebido a pintura final.



Figura 9 – Processo de pintura final.

Algumas diferenças notórias foram identificadas principalmente em relação a suas dimensões internas e sua capacidade volumétrica. A Tabela 5 mostra as novas dimensões bem como alguns dados pertinentes do novo moinho.

Tabela 5 – Características do novo moinho.

Parâmetros	Valor
Comprimento interno	590 mm
Diâmetro interno	570 mm
Velocidade crítica	56 rpm
Capacidade Volumétrica	151 litros

O comprimento interno passou de 520 mm para 590 mm e o diâmetro de 540mm para 570mm. A diferença entre o volume do moinho antigo e do novo advém da retirada do revestimento que possibilitou um aumento significativo (de 27%) nas dimensões internas do equipamento.

O resultado final, apresentado na Figura 10, mostra o novo moinho já instalado no laboratório de tratamento de minérios. Nota-se que um dispositivo de proteção e isolamento foi colocado na área onde encontram-se o motor e a correia, de acordo com a Norma Regulamentadora 12 (NR – 12), que trata sobre a proteção de partes móveis em equipamentos.



Figura 10 – Novo moinho laboratorial.

5.2 Avaliação dos parâmetros do novo moinho

Uma avaliação com relação ao tempo foi realizada comparando uma moagem com 20min e outra com 40min de duração. Tendo por base a relação de redução notou-se que não houve grande influência do tempo na operação, assim sendo, foi adotado um tempo padrão de 20min para os testes do planejamento de experimentos, considerado ideal em se tratando de gasto energético. A Figura 11 apresenta o gráfico das distribuições granulométricas dos testes descritos e mostra que a relação de redução é bastante próxima nos dois testes, cerca de 6,14 para o experimento de 20 min e de 6,58 para o de 40 min. Como dito uma diferença pequena em relação ao aumento do tempo em 100%.

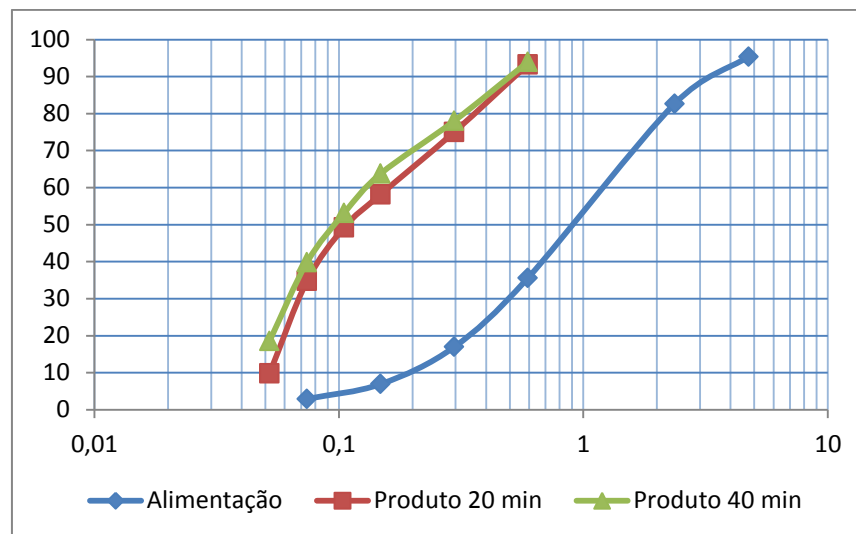


Figura 11 – Distribuição granulométrica para os tempos de 20 e 40 min.

Com os resultados obtidos nos experimentos planejados, apresentados na tabela 4, foram plotadas as curvas mostradas na Figura 12. Para melhor interpretação todos os experimentos foram plotados no mesmo gráfico possibilitando a comparação entre os mesmos. As distribuições granulométricas apresentaram um comportamento semelhante nos quatro ensaios realizados. O teste 4 apresentou um produto com a menor granulometria comparando-se com os outros, nesse experimento foi admitido uma velocidade de 70% da VC e 30% do volume do moinho ocupado.

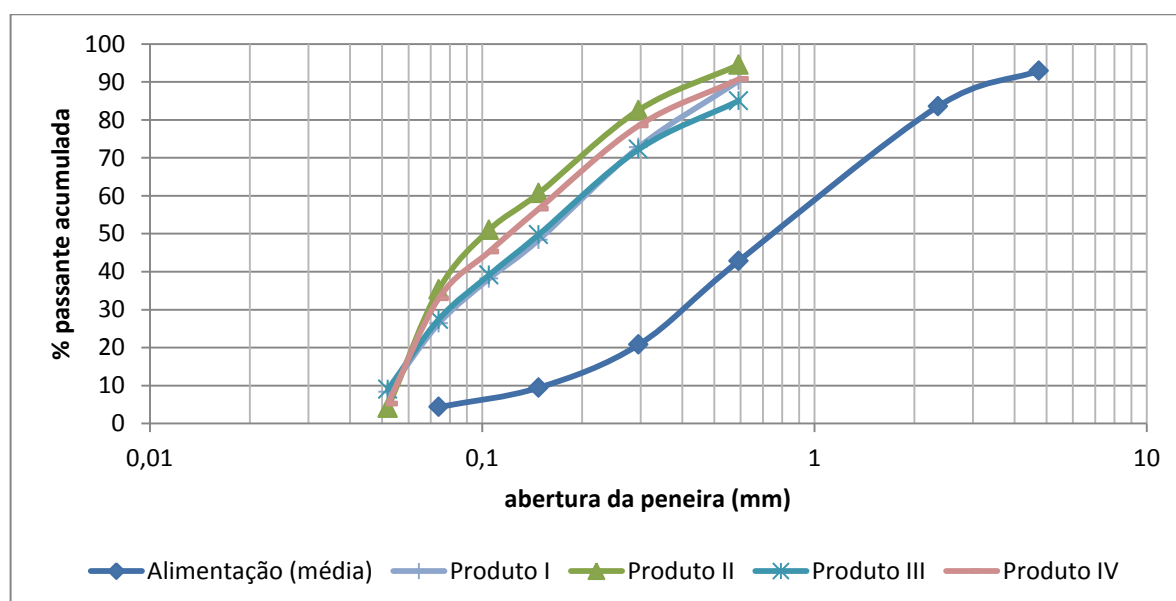


Figura 12 – Curvas granulométricas provenientes dos experimentos de moagem.

Na figura anterior a alimentação foi representada por uma curva confeccionada a partir da média das análises granulométricas da alimentação.

É importante salientar que as amostras retiradas dos tambores apresentaram sempre as mesmas características já que provinham de uma mesma região e que o processo de homogeneização tornou-as muito parecidas.

Utilizando a Equação 1, já apresentada para o cálculo da relação de redução, foram obtidos os resultados apresentados na Tabela 5 e figura 12. O aumento da velocidade de operação promoveu o aumento da relação de redução tanto com 30% de carga (teste I e II) quanto para 37% (testes III e IV). A diminuição da carga (de 37% para 30%) em conjunto com o aumento da velocidade de operação promoveu a maior relação de redução de todos os testes (teste IV). Entende-se que nessa configuração de operação há um aumento do fenômeno de catarateamento aumentando a queda das bolas umas sobre as outras promovendo, assim, uma redução maior se comparado com os outros experimentos. Com um volume menor de carga no moinho favorece-se o fenômeno da abrasão tendo em vista que as bolas não ficam muito afastadas umas das outras. Uma velocidade crítica alta contribui para que os corpos moedores atinjam uma altura maior antes de se desprenderem da carcaça fazendo que sua energia potencial seja alta e quebrando a partícula assim que tenha o contato (bola + minério).

Tabela 5 – Relação de redução obtida em todos os experimentos.

EXPERIMENTOS	VELOCIDADE (% de VC)	FATOR DE ENCHIMENTO (%)	RELAÇÃO DE REDUÇÃO
I	50	37	6,14
II	70	37	6,49
III	50	30	5,37
IV	70	30	7,61

. Nota-se que apesar da relação de redução do experimento IV ter sido identificada como a maior, a diferença entre um experimento e outro é pequena.

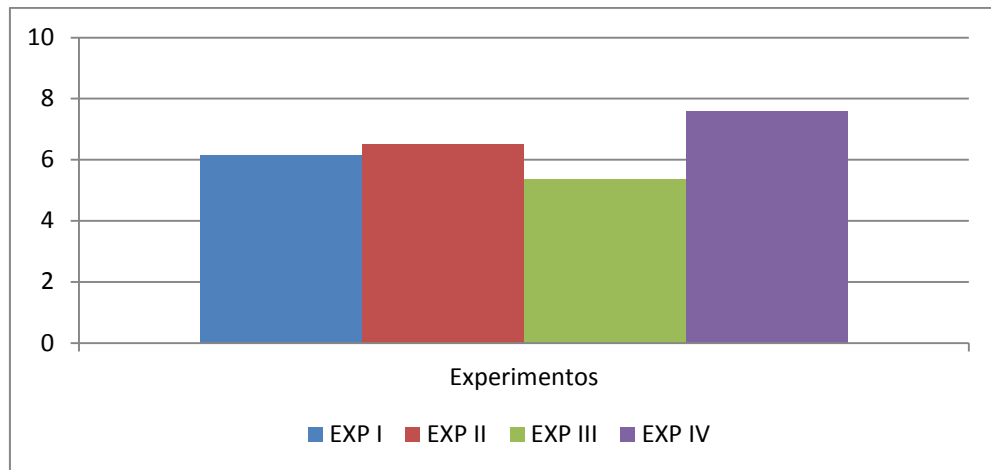


Figura 13 – Relação de redução dos experimentos.

Notou-se que, durante as análises granulométricas, o mineral analisado apresentou uma segregação do tipo mineralógica de natureza muito peculiar. Sendo assim, foi observado que o retido nas peneiras superiores a 48# (0,296 mm) era composto principalmente por flogopita e por fragmentos de sílica. A flogopita por apresentar uma clivagem do tipo basal apresenta uma grande dificuldade de se fragmentar em sistemas de moagem implicando em uma redução de eficiência na moagem dos minerais que se conjugam com a mesma. Na indústria este problema é resolvido quando a quantidade de flogopita presente na alimentação do moinho prejudica não só a operação de moagem em si como também as operações de concentração, nesses casos há uma classificação antes da alimentação do moinho que retira boa parte da flogopita presente. A sílica por sua elevada dureza acaba por se concentrar também nas peneiras superiores. A Figura 13 apresenta o produto de um dos experimentos realizados e tem o objetivo de ilustrar a concentração de certos minerais em certas faixas granulométricas.



Figura 14 – Produto III apresentando a segregação mineralógica.

6 CONCLUSÃO

De acordo com os resultados obtidos nos experimentos conclui-se que a maior relação de redução, 7,61, foi obtida quando o moinho opera em com uma porcentagem de velocidade crítica de 70% e com uma carga de material baixa (em torno de 30%).

A relação de redução considerável foi obtida no teste IV se comparado aos outros, não ocorreu uma geração de finos considerável, tornando a operação eficiente quando tratamos minério fosfático.

É importante salientar que novos experimentos precisam ser realizados testando operações a úmido e com corpos moedores de diferentes naturezas. A instalação de um revestimento pode trazer diversos benefícios para o equipamento aumentando sua vida útil consideravelmente e possivelmente melhorando a atuação do mesmo. Um sistema novo de descarga também pode facilitar a operação.

Todas essas melhorias só foram possíveis de observação com o equipamento em operação.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BERALDO, José Luiz. 1987. **Moagem de Minérios em Moinhos Tubulares**. São Paulo: Edgard Blucher Ltda, 1987.

CHAVES, A. P. **Teoria e Prática de Tratamento de Minérios, Vol. III. – Britagem, Peneiramento e Moagem**. São Paulo. Oficina do texto, 2012.

GARCIA, A. D. **Reforma e Adequação de um Moinho de 4000HP para nova aplicação**. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, SP, 2000.

JUNIOR, E.A.A.; SANTOS, R.M.; GABRIEL, A.L.; VALENTE, A.S.; FERREIRA, M.C.; DIAS, J.A.; NAESCIMENTO, J.K.; JESUS, J.A.S.; JONHSON, F. **Melhoria contínua do projeto, operação e manutenção dos revestimentos de moinho da Jacobina Mineração e Comércio**. Revista Minérios e Minerales, Belo Horizonte, 2012.

MAIA, G. S. **Avaliação de qualidade de corpos moedores para o minério fosfático de Tapira – MG**. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1994.

METSO Minerals, **Manual de Britagem** – 6.ªed. Publicação técnica. 2005.

ROWLAND, C. A.; KJOS, D. M. **Rod and ball mills. Mineral processing plant design**. New York: SME, 1969. Cap 12. P. 239-278.

SCHNEIDER, C.L., BRASIL, T.F.M., MAZZINGHY, D.B., ALVES, V.K. 2013. **Sobre a Medição do BWI**. XXV Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa & VIII Meeting of the Southern Hemisphere on Mineral Technology, Goiânia – GO, 20 a 24 de Outubro 2013.

SILVA, A.C., SILVA, E.M.S., SILVA, T.M.. **Estudo do Desgaste de Revestimento Interno de um Moinho de Bolas Operando com Rocha Fosfática**. XXV Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa & VIII Meeting of the Southern Hemisphere on Mineral Technology, Goiânia – GO, 20 a 24 de Outubro 2013.

VALADÃO, G.E.S.; ARAUJO, A.C. **Introdução ao Tratamento de Minérios**, 1ª ed. Editora UFMG, Belo horizonte, 2007.

WILLS, Barry A. e NAPIER-MUNN, Tim. 2006. **Mineral Processing Technology – An Introduction to the Practical Aspects of the Ore Treatment and Mineral Recovery**. Burlington: Elsevier, 2006.

-