



UNIVERSIDADE DO SUL DE SANTA CATARINA

EDUARDA DE FREITAS CARDOSO

**ESTUDO DE DISTRIBUIÇÕES GRANULOMÉTRICAS PARA O
DIMENSIONAMENTO DE UM MOINHO DE BOLAS POR VIA ÚMIDA PARA UMA
INDÚSTRIA DE TINTAS**

Tubarão

2020

EDUARDA DE FREITAS CARDOSO

**ESTUDO DE DISTRIBUIÇÕES GRANULOMÉTRICAS PARA O
DIMENSIONAMENTO DE UM MOINHO DE BOLAS POR VIA ÚMIDA PARA UMA
INDÚSTRIA DE TINTAS**

Relatório técnico/científico apresentado ao
Curso de Engenharia Química da Universidade
do Sul de Santa Catarina como requisito
parcial à obtenção do título de Bacharel.

Orientador: Prof. Ms. Alessandro de Oliveira Limas

Coorientador: Prof. Dr. Marcos Marcelino Mazzucco

Tubarão

2020

EDUARDA DE FREITAS CARDOSO

**ESTUDO DE DISTRIBUIÇÕES GRANULOMÉTRICAS PARA O
DIMENSIONAMENTO DE UM MOINHO DE BOLAS POR VIA ÚMIDA PARA UMA
INDÚSTRIA DE TINTAS**

Este relatório técnico/científico foi julgado adequado à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Química e aprovado em sua forma final pelo Curso de Graduação em Engenharia Química da Universidade do Sul de Santa Catarina.

Tubarão, 02 de dezembro de 2020.

Professor e orientador Alessandro de Oliveira Limas, Ms.
Universidade do Sul de Santa Catarina

Prof. Domingos Pignatel Marcon, Ms.
Universidade do Sul de Santa Catarina

Prof. Richard Faraco Amorim, Ms.
Universidade do Sul de Santa Catarina

Prof. João Michels Cardoso, Ms.
Universidade do Sul de Santa Catarina

AGRADECIMENTOS

A minha mãe que me apoiou em todo o caminho até esse momento.

A meus avós Sonia e Paulo por toda ajuda e cuidados durante esse período.

Aos professores Ms. Alessandro de Oliveira Limas e Dr. Marcos Marcelino Mazzucco, orientadores e responsáveis pela disciplina de estágio obrigatório.

Ao senhor Luiz Gonzaga Carvalho pela oportunidade de estágio e todos os ensinamentos que obtive nesse tempo.

Ao Engenheiro Eduardo Pereira de Souza pela ajuda no decorrer desse projeto e os ensinamentos diários durante o estágio.

Aos funcionarios da empresa concedente do estágio, pelo suporte, tempo e ensinamentos obtidos através da prática.

Aos amigos obtidos através do curso de engenharia química da Unisul.

A todos os professores que fizeram parte da minha graduação em engenharia química.

E a todos que de alguma maneira, contribuíram nesta jornada.

“Sonhos determinam o que você quer. Ação determina o que você conquista.” (Aldo Novak).

RESUMO

A moagem é um processo que permite a redução do tamanho das partículas de cargas sólidas, podendo ser realizadas de duas formas: via seca e via úmida. Neste trabalho, o produto final é líquido e, assim, o processo mais vantajoso é a moagem por via úmida. Para este tipo de moagem, prepara-se uma mistura conhecida como *slurry*, que é composta pela carga a ser reduzida, aditivos e água. A granulometria de moagem utilizada para a tinta tem demonstrado que, quanto mais próxima da malha 1000 *Mesh*, mais cobertura e resistência a tinta adquire. Porém, a granulometria interfere no valor da carga no mercado, tornando-a menos acessível aos compradores. Devido a esse problema identificado durante o estágio supervisionado, a instalação de um moinho seria a solução mais indicada. Para isso, foi orientado a empresa a dimensionar um moinho que atenda às necessidades suas necessidades de investimentos para a melhoria do processo de produção. O presente trabalho teve como objetivo estudar as distribuições granulométricas para o dimensionamento de um moinho de bolas por via úmida para uma indústria de tintas. Para o dimensionamento é recomendado a utilização do método de Bond, em que são calculados os principais fatores que permitem desenvolver a melhor formatação ao moinho. Para isso, primeiramente são necessários realizar testes que verifiquem a confiabilidade na melhoria da tinta através da moagem e, para isso, foram desenvolvidas algumas formulações de *slurry* e de tintas até a obtenção das melhores características para o produto final. Para a formulação do *slurry* obteve-se os seguintes parâmetros: viscosidade (82 kU), pH (10,57) e densidade (1,616 g/cm³ a 23,3°C). Para a avaliação de cobertura, o que representou o melhor resultado foi a formulação 3, + 0,4. Os resultados dos cálculos obtidos para o dimensionamento do moinho de bolas foram: diâmetro de esferas (7,3 mm), diâmetro do moinho (2,818 m), velocidade recomendada (22,629 rpm) e energia necessária (5,137 kWh). Desta forma, foi possível obter produtos com as mesmas características que o padrão comercial e dimensionar um moinho de bolas por via úmida para atender as necessidades da empresa assistida.

Palavras-chave: Granulometria. Moagem. Dimensionamento.

ABSTRACT

Grinding is a process that allows the reduction of the particle size of solid fillers, which can be carried out in two ways: dry and wet. In this work, the final product is liquid and, thus, the most advantageous process is wet grinding. For this type of grinding, a mixture known as slurry is prepared, which is composed of the load to be reduced, additives and water. The grinding granulometry used for the paint has shown that the closer to the 1000 Mesh, the more coverage and resistance the paint gets. However, granulometry interferes with the value of the load on the market, making it less accessible to buyers. Due to this problem identified during the supervised internship, the installation of a mill would be the most suitable solution. To this end, the company was instructed to design a mill that meets its investment needs to improve the production process. The present work aimed to study the particle size distributions for the design of a wet ball mill for a paint industry. For dimensioning it is recommended to use the Bond method, in which the main factors are calculated that allow the best formatting to be developed at the mill. For this, it is first necessary to carry out tests that check the reliability in improving the paint through grinding and, for that, some formulations of slurry and paint were developed until obtaining the best characteristics for the final product. For the formulation of the slurry, the following parameters were obtained: viscosity (82 kU), pH (10.57) and density (1.616 g / cm³ at 23.3 ° C). For the coverage assessment, the formulation 3, + 0.4 was the best result. The results of the calculations obtained for the dimensioning of the ball mill were: ball diameter (7.3 mm), mill diameter (2.818 m), recommended speed (22.629 rpm) and required energy (5.137 kWh). It is possible to obtain products with the same characteristics as the commercial standard and to dimension a ball mill by wet way to meet the needs of the assisted company.

Keywords: Granulometry. Milling. Sizing.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1- Descrição de um moinho de bolas	16
Figura 2: Fluxograma de teste laboratorial.....	25
Figura 3: Primeira e segunda fase da formulação.....	41
Figura 4: Mistura dos componentes da tinta.....	41
Figura 5: Preenchimento das esferas no jarro.....	42
Figura 6: <i>Slurry</i> após a moagem.....	42
Figura 7: Separação do material e dos componentes do moinho	43
Figura 8: Comparação da cobertura Padrão X #1000 com moagem.....	43
Figura 9: Comparação da cobertura Teste 2 X Teste 3	44
Figura 10: Comparação da cobertura Teste 3 X Teste 4	44
Figura 11: Acionamento Coroa e Pinhão	50
Figura 12: Acionamento <i>Gearless</i>	50
Figura 13: Tipos de alimentadores	50
Figura 14: Tipos de descarga.....	50

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Composição do <i>slurry</i>	30
Tabela 2: Composição da tinta	31
Tabela 3: Resultado da Cobertura no Colorímetro	33
Tabela 4: Comparação entre os testes	33
Tabela 5: Resultados do dimensionamento do moinho	35
Tabela 6: Proporção L/D	50
Tabela 7: Velocidades recomendadas por Rowland (Beraldo, 1987)	50
Tabela 8: W_i de impacto médio de alguns materiais (Rowland)(kWh/ton curta).....	50
Tabela 9: Fator de Ineficiência em circuito aberto (Rowland).....	52
Tabela 10: Fatores de correção para a finura do material.....	52

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
1.1	JUSTIFICATIVA E PROBLEMA	13
1.2	OBJETIVOS	13
1.2.1	Objetivo geral	13
1.2.2	Objetivo específico	14
2	REFERENCIAL TEÓRICO	15
2.1	<i>SLURRY</i>	15
2.2	TINTAS ACRÍLICAS FOSCA	15
2.3	MOINHO DE BOLAS	16
2.3.1	Carcaça	16
2.3.2	Acionamento	16
2.3.3	Alimentação	17
2.3.4	Descarga	17
2.3.5	Revestimento	18
2.4	DIMENSIONAMENTO DE UM MOINHO DE BOLAS	18
2.4.1	Diâmetro das esferas	18
2.4.2	Volume de material	19
2.4.3	Volume do cilindro	19
2.4.4	Volume das esferas	19
2.4.5	Diâmetro do cilindro	19
2.4.6	Velocidade de operação	20
2.4.7	Distância do topo do moinho ao topo da carga	21
2.4.8	Índice de trabalho	21
2.4.9	Energia necessária para à moagem	21
2.4.10	Fatores de Correção	22
2.4.10.1	Primeiro fator de correção	22
2.4.10.2	Segundo fator de correção	22
2.4.10.3	Terceiro fator de correção	23
2.4.10.4	Quarto fator de correção	23
2.4.10.5	Quinto fator de correção	23
2.4.10.6	Sétimo fator de correção	24
3	MÉTODOS	25

3.1	PROCEDIMENTO LABORATORIAL	25
3.1.1	Descrição das etapas realizadas em laboratório.....	25
3.1.1.1	Desenvolvimento do <i>Slurry</i>	25
3.1.1.2	Realização da Moagem.....	26
3.1.1.3	Desenvolvimento da Tinta Acrílica.....	26
3.1.1.4	Propriedades da Tinta Acrílica	27
3.1.1.5	Avaliação da Cobertura	28
3.2	DIMENSIONAMENTO DO MOINHO DE BOLAS	28
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	30
4.1	<i>SLURRY</i>	30
4.2	TINTAS ACRÍLICAS FOSCA	31
4.3	AVALIAÇÃO DA COBERTURA.....	32
4.4	DIMENSIONAMENTO DO MOINHO DE BOLAS	34
5	CONCLUSÃO.....	36
	REFERÊNCIAS	37
	APÊNDICES	40
	APÊNDICE A – Imagens dos testes realizados em laboratório	41
	APÊNDICE B – Memorial de cálculo.....	45
	ANEXOS	49
	ANEXO A – Figuras sobre a descrição do equipamento.....	50
	ANEXO B – Tabelas para o dimensionamento	50

1 INTRODUÇÃO

A carga mineral quando utilizada em tintas precisar apresentar uma granulometria específica, e para isso ela passa por um processo conhecido como cominuição. “A cominuição representa o primeiro estágio do processamento mineral [...]. O objetivo da cominuição é a separação física dos minerais por fragmentação”(SOUZA, 2010, p.10). Por sua vez Nunes (2012, p. 14) afirma que se trata de um [...] processo industrial de tratamento de minérios que tem como principais objetivos: obter um produto com granulometria determinada e aumentar a superfície específica das partículas, facilitando assim as reações químicas subsequentes.

“Em função do impacto em aspectos econômicos e ambientais, o desempenho de processos de fragmentação é objeto de estudos sistemáticos há cerca de 150 anos” (DELBONI JUNIOR, 2013, p. 103). Com a criação das primeiras patentes de equipamentos de britagem, viu-se a necessidade o estabelecimento de leis, que fossem capazes de estimar o cálculo de energia necessária na etapa do processo. Essas leis ficaram conhecidas como “Leis de Cominuição”.

“As leis da cominuição são leis empíricas que relacionam o trabalho elementar necessário para fragmentar a unidade de massa do sólido com uma variação de tamanho ou diâmetro médio das partículas” (BUDKE, *et al.* 2011, p. 468). Ao todo são três leis de cominuição, a primeira publicada em 1867 proposta por Rittinger, a segunda publicada em 1885 proposta por Kick e a terceira postulada em 1952 por Bond.

Como a primeira e a segunda lei da cominuição não eram capazes de satisfazer todos os casos encontrados na prática industrial, Bond postulou uma lei empírica que posteriormente ficaria conhecida como lei de Bond ou terceira lei de cominuição. Essa lei empírica propunha que “a energia consumida para reduzir o tamanho de um material é inversamente proporcional à raiz quadrada do tamanho” (BUDKE, *et al.* 2011, p. 468).

“A moagem é geralmente o último estágio do processo de cominuição, onde as partículas são reduzidas pela combinação de impacto, compressão, abrasão e atrito” (NUNES, 2012, p. 17). “A moagem é uma operação unitária que consiste na redução na granulometria de partículas sólidas através da aplicação de uma força de impacto que dividirá essas partículas reduzindo assim seu tamanho” (T.M. LONDE, J.R.D. FINZER, 2017, p. 1). Este processo pode ocorrer de duas formas são elas: por via úmida e por via seca.

“A moagem por via úmida é a mais usada em tratamento de minérios, sendo o material misturado à entrada do moinho com água formando uma pasta ou polpa” (MOURA, 2017, p. 5). Já a por via seca “é utilizada para casos em que o minério não pode ser molhado, devido à

reação que possa ocorrer com a água, ou ainda quando a próxima etapa do processo é a seco” (MARTINS, 2015).

A moagem por via úmida cresceu rapidamente nos últimos anos devido aos diversos benefícios que apresenta. “Esse processo é principalmente caracterizado pela sua capacidade de dispersões de partículas mais finas, alto desempenho de cisalhamento e menor tempo de produção” (CMC, 2020). Outros diversos fatores tornam esse processo mais eficaz do que por via seca, pois ele demanda de uma grande quantidade de energia e possui uma limitação na capacidade de redução só tamanho das partículas.

Para este projeto será aplicada a moagem por via úmida em um moinho de bolas, onde segundo Paula *et al* (2013, p. 736) esse equipamento utiliza rotações para promover sucessivas colisão de esferas, para assim realizar a redução do tamanho de partículas de um determinado material. Por se tratar de um teste por via úmida é necessário preparar para esse procedimento um composto chamado “*slurry*”.

Para Murray (2007, p. 163, tradução nossa), o *slurry* é a junção da carga mineral, água e dispersante químico que para isso, conta com processos de moagem e dispersão especiais, que permitem a micronização seletiva das partículas e o controle do tamanho de partícula. O objetivo para essa redução drástica em sua granulometria é atribuir uma maior resistência a tinta e gerar liga no material que evitará o craqueamento da tinta após a secagem, sendo possível pelos diversos tamanhos de partículas produzidos nesse processo.

1.1 JUSTIFICATIVA E PROBLEMA

Um dos principais componentes utilizados nas formulações de tintas são as cargas minerais. Essas cargas atribuem características como resistência e opacidade a tinta. Por outro lado, para serem capazes de cumprir essa função, as cargas necessitam estar em uma granulometria específica, se encontrando geralmente entorno de 0,044 mm ou menor.

Um aspecto observado durante a aplicação dessas cargas na fabricação de tintas, é que quanto mais perto da #1000 mais resistência, maior cobertura e maior aderência à superfície ela possui. Em contrapartida quanto mais fina for a carga mineral utilizada, maior se torna seu custo comercialmente, o que conseqüentemente afeta preço do produto final.

Apesar de atribuir mais qualidade à tinta o seu valor mais caro pode se tornar um fator de evasão dos clientes. Essa evasão se dá, pois, mesmo buscando tintas capazes de cobrir bem as superfícies e durarem mais tempo sem haver reparos, seu valor ainda reflete um peso muito grande sobre a escolha deste material.

A utilização de um moinho de bolas por via úmida pode permitir a compra da carga com granulometria mais grosseira e realize moagem da carga dentro da empresa. Com esse processo sendo realizado na empresa o custo com matéria prima será reduzido. Uma vantagem desse processo é que se pode decidir qual a melhor granulometria para cada produto que passará pelo equipamento. Atualmente, a empresa não possui este tipo de equipamento, interferindo significativamente na escolha da matéria prima e também no preço dos produtos. Esse moinho também poderá ser utilizado em outras áreas dentro da empresa.

Portanto, buscou-se responder o seguinte problema de pesquisa: **é possível produzir tintas com cargas minerais com distintas distribuições granulométricas e que resultem em produtos com as mesmas características que o padrão comercial e ainda dimensionar um moinho de bolas por via úmida, que atenda as novas especificações?**

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo geral

Realizar o estudo das distribuições granulométricas para o dimensionamento de um moinho de bolas por via úmida para uma indústria de tintas

1.2.2 Objetivo específico

- a) Executar testes em laboratório para avaliar a influência que a moagem possui na formulação do produto.
- b) Determinar o volume de esferas e de material dentro do moinho.
- c) Encontrar o diâmetro do moinho através do volume total.
- d) Estimar a velocidade de operação recomendada e a potência para realização do processo.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 *SLURRY*

Como já mencionado na introdução desse trabalho a moagem será por via úmida o que possibilita a utilização de um composto conhecido como “*slurry*”. Esse composto trata-se de uma mistura entre cargas minerais, aditivos químicos e água, que posteriormente são dispostos no moinho para a realização da redução granulométrica da partícula da carga mineral.

Durante a fabricação do *slurry* deve-se analisar fatores como a viscosidade, o pH e a densidade do produto, já que todas essas propriedades afetam a estabilidade que a tinta obterá. Por sua vez, é comum a obtenção de uma viscosidade semelhantes à de uma tinta para o *slurry*, o que possibilita o melhor manuseio de material e também uma facilidade na realização da mistura com os outros componentes da tinta.

2.2 TINTAS ACRÍLICAS FOSCA

Tintas são produtos muito utilizados em construções civis e reformas em casa, e devem sempre apresentar uma qualidade capaz de agradar ao cliente. Por sua vez, “Tinta é uma composição líquida, geralmente viscosa, constituída de um ou mais pigmentos dispersos em um aglomerante líquido que, ao sofrer um processo de cura quando estendida em película fina, forma um filme opaco e aderente ao substrato.” (FAZENDA, 2005, p. 8).

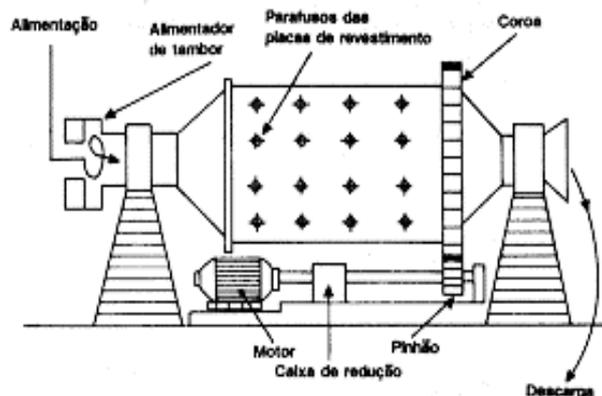
Segundo Ferrari (200-) a tinta acrílica foi inicialmente desenvolvida na década de 1950 como pintura imobiliária. O termo -acrylic- refere-se ao fato de que o pigmento para a tinta é suspenso em uma emulsão de polímero acrílico.

A tinta acrílica trata-se de uma tinta solúvel em água, de secagem rápida. Sua fórmula contém resinas acrílicas, aditivos químicos, biocidas, pigmentos e cargas minerais. Esses componentes atribuem a tinta um grau de impermeabilidade alto, resistência a lavabilidade e opacidade.

A tinta acrílica é indicada para acabamentos de superfícies internas e externas, podendo ser aplicada em camadas finas e mais espessas e ainda pode ser aplicado em diversos tipos de materiais, como por exemplo, o gesso e a alvenaria. Esse tipo de tinta é lavável o que torna fácil a remoção de sujeiras que aparecem com o tempo.

2.3 MOINHO DE BOLAS

Figura 1- Descrição de um moinho de bolas



Fonte: Luz, Sampaio e Almeida (2010, p. 181).

2.3.1 Carcaça

A carcaça é feita geralmente de chapas de aço-carbono, calandrada e soldada. A calandragem refere-se a um processo em que é conferida a forma necessária para a chapa que formará parte do equipamento. Segundo Duda (1975, tradução nossa) a espessura da chapa pode variar de 1/100 a 1/75 do diâmetro do moinho, dependendo do comprimento dele.

“Ela é fechada nas duas extremidades por peças de aço fundido chamadas tampas, cabeças ou espelhos (heads)” (Oliveira Rogério, 2015, p. 16). “As tampas possuem dois pescoços ou munhões, que sustentam todo o moinho (carcaça, revestimento, tampas e toda a carga presente em seu interior) e giram dentro de mancais” (Chaves, et al., 2003, p. 564).

“Alguns moinhos podem apresentar janelas de inspeção, permitindo o acesso à parte interna dos mesmos para uma eventual manutenção, substituição dos revestimentos, inspeção e complementação da carga moedora” (Chaves, et al., 2003, p. 564).

2.3.2 Acionamento

Segundo Oliveira Renata (2012, p. 21) existem dois tipos principais de acionamento para os moinhos de bolas, são eles o acionamento por coroa e pinhão e o acionamento *gearless*.

“O acionamento por coroa e pinhão consiste na rotação do moinho através da engrenagem do pinhão com a coroa aparafusada em uma das extremidades do moinho” (Oliveira Renata, 2012, p. 21). Já o acionamento *gearless* consiste em um acionamento sem

engrenagens, onde segundo Sinferbase (2015) enormes motores elétricos são instalados em torno da estrutura do moinho.

O acionamento coroa e pinhão pode ser observado mais detalhadamente na figura 11 do Anexo A. Já o acionamento *gearless* é representado na figura 12 do Anexo A. Deve-se verificar bem qual a melhor opção de acionamento de acordo com a potência e o tamanho necessário para o moinho, pois essa escolha representa uma parcela bem importante no custo final do equipamento.

2.3.3 Alimentação

Três tipos de alimentadores podem ser usados em moinhos por via úmida. São eles: *spout feeder*, *drum feeder*, *drum-scoop feeder*.

Segundo Wills, et al. (2006, p. 154, tradução nossa) a alimentação *spout feeder* é a mais simples entre os tipos de alimentadores, consistindo em um chute cilíndrico ou elíptico, que se projeta diretamente para dentro do munhão.

No “*drum feeder* a alimentação entra no tambor através de um chute e uma espiral interna transporta o material para dentro do munhão, quando a altura de alimentação é limitada” (Wills, et al., 2006, p. 154, tradução nossa).

O alimentador *drum-scoop feeder* segundo Wills et al. (2006, p. 154, tradução nossa) é geralmente utilizado para circuitos por via úmida fechados com classificadores em formato espiral ou com inclinação. Esse tipo ainda pode ser substituído pelo tipo *Scoop feeders* quando a alimentação está na faixa de tamanho considerada fina.

Na figura 13 do Anexo A pode ser observado o formato de cada tipo de alimentadores mencionados anteriormente.

2.3.4 Descarga

“A descarga dos moinhos de bolas e de barras pode se dar em diferentes arranjos de forma a se atender às conveniências de aplicação” (Beraldo, 1987, p. 25). A descarga para moinhos de bolas pode ocorrer de duas formas, a *overflow* ou por diafragma.

A *overflow* segundo Beraldo (1987, p. 26) é aplicada de preferência em moagem fina, que não apresenta dificuldade de escoamento, sendo o sistema mais usado em remoagens, quando se utilizam bolas de pequeno diâmetro.

A descarga por diafragma é recomendada para alimentações grosseiras ou quando se deseja minimizar a geração de finos. “Os moinhos com descarga por diafragma apresentam algumas desvantagens operacionais, tais como o maior consumo de corpos moedores e a possibilidade de entupimento dos crivos” (Chaves et al., 2003, p. 585).

Na figura 14 do anexo A está representado o formato e a disposição de material de acordo com o tipo de descarga mencionado anteriormente.

2.3.5 Revestimento

“Os moinhos são sempre revestidos internamente por material que seja resistente ao desgaste podendo ser constituído de metal ou borracha” (Oliveira Rogério, 2015, p. 16).

“Dentre os revestimentos metálicos, encontram-se as placas de ferros fundidos especiais e de ligas de aço (manganês, cromo-molibdênio e níquel hard), que são fabricadas em módulos e sob encomenda para cada moinho” (Chaves, et al., 2003, p. 570).

“Os revestimentos de borracha possuem uma vida útil maior que os revestimentos metálicos, além de serem mais fáceis e rápidos de instalar e apresentarem uma redução significativa nos níveis de ruído, porém possuem um preço muito alto” (Will et al. 2006, p. 153, tradução nossa).

Segundo Will et al. (2006, p. 153, tradução nossa) os revestimentos de borracha possuem maior espessura que os revestimentos metálicos, o que reduz a capacidade do moinho por apresentarem menor volume interno, sendo este um fator muito importante quando voltados para moinhos pequenos.

2.4 DIMENSIONAMENTO DE UM MOINHO DE BOLAS

2.4.1 Diâmetro das esferas

De acordo com Gomide (1983, p. 81), o diâmetro das esferas que serão utilizadas no moinho pode ser calculado pela fórmula (1).

$$Db = 11 * \sqrt{D} \quad (1)$$

Onde:

Db - Diâmetro das esferas (cm)

D - Diâmetro das partículas mais grossas alimentadas (cm)

2.4.2 Volume de material

Segundo FAZENDA (2005, p. 582) em um moinho de bolas o “volume ocupado pelas esferas é de aproximadamente 30% e o material ocupa um volume de 20%”, mas na prática é comum moinhos com 50% de esferas.

Para a realização do cálculo do volume ocupado pelo material será utilizada a massa específica e a massa do material representado na fórmula (2):

$$d = \frac{m_{material}}{V_{material}} \quad (2)$$

2.4.3 Volume do cilindro

Os tipos de equipamentos mais utilizados na etapa de moagem são aqueles em formato cilíndrico (Luz et al, 2010, p. 186). Portanto será considerado que o moinho possui um formato cilíndrico para base de cálculos.

Então para calcular o volume aproximado do moinho será considerado que seu fator de enchimento do material de 15 %. O cálculo do volume pode ser observado na fórmula (3).

$$V_{cilindro} = \frac{100 * V_{material}}{15} \quad (3)$$

2.4.4 Volume das esferas

Para calcular o volume ocupado pelas esferas será utilizado o volume do cilindro calculado no tópico anterior e que o fator de enchimento das esferas será de 30 %, como pode ser observado na fórmula (4).

$$V_{esferas} = \frac{30 * V_{cilindro}}{100} \quad (4)$$

2.4.5 Diâmetro do cilindro

Com o volume do cilindro encontrado anteriormente pode-se encontrar o diâmetro pela fórmula (5).

$$V = \frac{\pi * D^2 * L}{4} \quad (5)$$

Onde:

V– Volume do cilindro (m³)

D– Diâmetro do moinho (m)

L – Comprimento do moinho (m)

Para continuar os cálculos deve-se atribuir uma relação entre o comprimento e o diâmetro do moinho que pode ser observada pela Tabela 6 do Anexo B.

A proporção escolhida será de 1,5:1, logo o comprimento é igual a $1,5 * D$ e a fórmula (5) pode ser reescrita assumindo o formato da fórmula (6).

$$V = \frac{\pi * 1,5 * D^3}{4} \quad (6)$$

2.4.6 Velocidade de operação

“A velocidade de operação do moinho é dada em porcentagem da velocidade crítica, sendo esta última a velocidade com a qual a carga é centrifugada, aderindo-se à parede da carcaça, e determinada através da fórmula (7)”. (BOND, 1958 *apud* OLIVEIRA Renata, 2012, p. 32).

$$N_c = \frac{42,3}{\sqrt{2 * r}} \quad (7)$$

Onde:

N_c - Velocidade crítica (rpm)

r - Raio do moinho (m)

Não é aconselhado que um moinho opere utilizando a velocidade crítica, pois ela pode prejudicar o equipamento e ser a causa de manutenções desnecessárias. Por esse motivo Rowland fez uma relação entre o diâmetro do moinho e a velocidade recomendada de operação a partir de uma porcentagem da velocidade crítica. Essas relações podem ser observadas na Tabela 7 no Anexo B.

Conforme o Tabela 7 a velocidade recomendada de operação para o uso de acordo com o diâmetro do moinho é de 79% da velocidade crítica que será calculada na fórmula (8).

$$V_{rec} = \frac{N_c * \%}{100} \quad (8)$$

Onde:

V_{rec} – Velocidade recomendada (rpm)

N_c - Velocidade crítica (rpm)

% - % Velocidade crítica (%)

2.4.7 Distância do topo do moinho ao topo da carga

Para calcular esse diâmetro pode-se utilizar a fórmula do fator de enchimento. “O fator de enchimento do moinho representa o percentual do volume do moinho ocupado pelas bolas (considerando os espaços vazios entre as bolas), sendo expresso pela fórmula (9)” (BOND, 1958 *apud* OLIVEIRA Renata, 2012, p. 33).

$$F = 113 - \frac{126 \cdot H}{D} \quad (9)$$

Onde:

F - Fator de enchimento, em %

H - Distância do topo do moinho ao topo da carga em repouso, em m

D - Diâmetro do moinho, em m

Como fator de enchimento do moinho será de 30%, este valor compreende as esferas para moagem e os vazios entre elas, portanto substituindo os valores na fórmula (9) obtém-se a distância do topo até o material.

2.4.8 Índice de trabalho

“O índice de trabalho (*work index*), W_i , é um parâmetro relativo à resistência do material, que pode ser determinado através de testes operacionais ou de laboratório” (OLIVEIRA Renata, 2012, p. 37).

Para a escolha desse índice será utilizada a Tabela 8 do Anexo B contida no livro de Moagem de Minérios em Moinhos Tubulares do autor Beraldo que apresenta os W_i de materiais típicos utilizada na moagem.

2.4.9 Energia necessária para à moagem

“O modelo de Bond afirma que o trabalho necessário à cominuição é proporcional à extensão da fratura produzida nas partículas, resultando na fórmula (10) para o cálculo da energia” (BOND, 1958 *apud* OLIVEIRA Renata, 2012, p. 36).

$$W = \frac{10 \cdot W_i}{\sqrt{P}} - \frac{10 \cdot W_i}{\sqrt{F}} = 10 \cdot W_i \cdot \left(\frac{1}{\sqrt{P}} - \frac{1}{\sqrt{F}} \right) \quad (10)$$

Onde, “W representa a energia necessária, em kWh, para reduzir 1 tonelada curta de minério de um tamanho da alimentação F, em μm , onde 80% passam, até um tamanho de produto P” (OLIVEIRA Renata, 2012, p. 37).

“Para circuitos que não utilizam as condições apresentadas por Bond devem ser incluídos Fatores de correção (EF) no cálculo da determinação da energia necessária à moagem”, de acordo com a fórmula (11) (OLIVEIRA Renata, 2012, p. 42).

$$W = 10 \cdot W_i \left(\frac{1}{\sqrt{P}} - \frac{1}{\sqrt{F}} \right) \cdot \prod_{i=1}^8 (EF_i) \quad (11)$$

2.4.10 Fatores de Correção

Neste tópico são apresentados os fatores de correção (EF_i) inicialmente introduzidos por Bond em seu estudo da Lei de Moagem, e posteriormente complementado com alguns fatores propostos por Rowland. Neste tópico não serão tratados o sexto e o oitavo fator de correção, pois ambos estão focados no cálculo do moinho de barras, que não é o foco deste projeto.

2.4.10.1 Primeiro fator de correção

O primeiro fator de correção para moagem é baseado no teste padrão de Bond, onde para moagem a seco utiliza-se o fator de 1,3 e para moagem por via úmida utiliza-se o fator 1. Essa diferença nos fatores segundo Beraldo (1987, p. 49) “exprime o fato de a moagem a seco apresentar menor eficiência que a moagem a úmido”.

2.4.10.2 Segundo fator de correção

O segundo fator de correção é referente a utilização do circuito aberto em moinhos de bolas. Segundo Beraldo (1987, p. 49), “como as curvas de distribuição granulométrica em circuito aberto ou em circuito fechado são distintas, a especificação dos produtos de circuito aberto deve ser feita em relação à porcentagem retida em uma determinada malha”. Para a escolha do fator de correção será considerado 80% de passantes na malha de referência, considerando os valores apresentados na Tabela 9 do Anexo B.

2.4.10.3 Terceiro fator de correção

O terceiro fator refere-se ao diâmetro onde a eficiência dos moinhos cresce de acordo com o aumento do diâmetro até o valor de 3,81 m. Acima desse diâmetro sua eficiência se mantém. Para calcular o fator de eficiência correspondente ao diâmetro utilizado utiliza-se as fórmulas (12) e (13).

$$EF_3 = \left(\frac{2,44}{D}\right)^{0,2} \text{ para } D \leq 3,81\text{m} \quad (12)$$

$$EF_3 = 0,914 \text{ para } D > 3,81 \text{ m} \quad (13)$$

2.4.10.4 Quarto fator de correção

O quarto fator de correção refere-se ao oversize ou seja, quando a alimentação contém partículas muito grandes para serem moídas de forma eficiente. Uma alimentação mais grosseira necessita de corpos moedores maiores, o que pode reduzir a eficiência de moagem. Para cálculo da energia requerida de moagem, considerar o valor obtido da fórmula (14).

$$EF_4 = \frac{R_r + (W_i - 7) * \left(\frac{F - F_o}{F_o}\right)}{R_r} \quad (14)$$

Onde, R_r = razão de redução, dada pela fórmula (15)

F_o = tamanho ótima da alimentação, dado pela fórmula (16)

$$R_r = \frac{F}{P} \quad (15)$$

Para moinhos de bolas, o tamanho ótimo da alimentação pode ser obtido pela equação a seguir:

$$F_o = 4000 * \sqrt{\frac{13}{W_i}} \quad (16)$$

2.4.10.5 Quinto fator de correção

O quinto fator de correção está relacionado a finura do material. “Este fator foi estabelecido por Bond para produtos com mais de 80% passantes em 74 microns” (Beraldo, 1987, p. 51). “Em casos em que o produto desejado na moagem é menor que 200 mesh, são necessárias bolas com tamanhos economicamente inviáveis. Portanto, utilizam-se bolas maiores, com tamanhos econômicos, o que reduz a eficiência de moagem” (OLIVEIRA

Renata, 2012, p. 45). Para o cálculo da energia requerida de moagem, considerar o valor obtido da fórmula (17) ou da Tabela 10 no Anexo B.

$$EF_5 = \frac{P+10,3}{1,145.P} \quad (17)$$

Onde:

P - Tamanho do produto 80% passante (μm)

2.4.10.6 Sétimo fator de correção

O sétimo fator de correção está relacionado a redução em moinho de bolas. “Não é muito frequente seu uso, pois o mesmo só se aplica à relação de redução menor que 6, o que é raro em moinho de bolas. É comum ocorrer em operação de remoagem” (Beraldo, 1987, p. 60). Para cálculo deste fator será utilizado a fórmula (18).

$$EF_7 = \frac{2*(R_r-1,35)+0,26}{2*(R_r-1,35)} \quad (18)$$

Onde, R_r = relação de redução, dada pela fórmula (15), mostrada no quarto fator de correção.

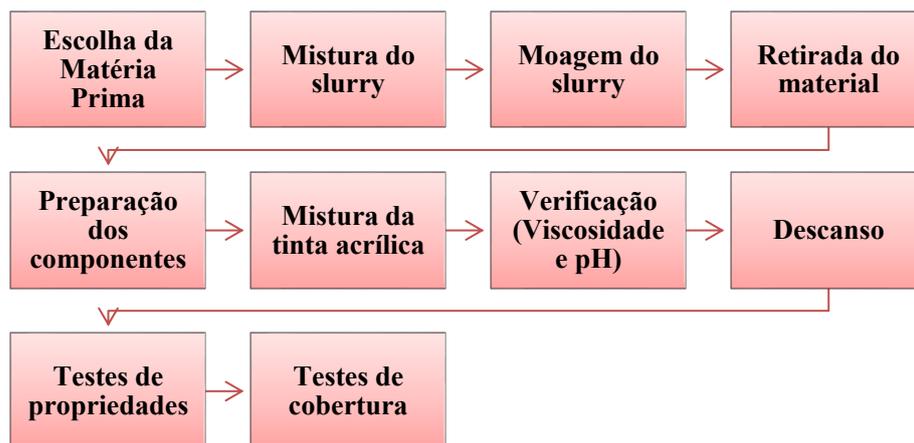
$$R_r = \frac{F}{P} \quad (15)$$

3 MÉTODOS

3.1 PROCEDIMENTO LABORATORIAL

A figura 2 mostra as etapas realizadas para os testes que fazem parte do estudo das distribuições granulométricas para o dimensionamento de um moinho de bolas por via úmida.

Figura 2: Fluxograma de teste laboratorial.



Fonte: Autora, 2020.

3.1.1 Descrição das etapas realizadas em laboratório

3.1.1.1 Desenvolvimento do *Slurry*

Para realização da formulação do *slurry* levou-se em consideração as porcentagens de cada composto disposto na formulação padrão da empresa. Esta formulação, por sua vez considera a quantidade necessária para cada composto realizar sua função, sem interferir em outras reações que ocorreram em paralelo.

Através de testes foi estudada qual a porcentagem de carga mineral a ser disposta na formulação de *slurry*, de modo a obter resultados sem a geração de sedimentações e que haja a dispersão total da carga com os aditivos utilizados na formulação.

Em um recipiente são dispostos os componentes presentes na primeira etapa da formulação, que em seguida foi posicionada em um dispersor para realizar a mistura dos componentes. Enquanto a primeira etapa é misturada, a carga mineral é pesada em um outro recipiente, para que possa ser colocada aos poucos junto a etapa anterior na dispersão, e assim realizar a mistura dos componentes. As etapas mencionadas anteriormente podem ser observadas na Figura 3 do Apêndice A.

Após a adição da carga mineral é aconselhado deixar em dispersão em alta velocidade por cerca de 1 hora para que ocorra a dispersão total das duas etapas, essa dispersão é representada pela Figura 4 do Apêndice A. Após o término da dispersão são observados a viscosidade e o pH da amostra para verificar a necessidade da realização de um acerto nessas propriedades. Caso o *slurry* apresente os valores estipulados pela empresa, ele é deixado em descanso por um dia para realização de todas as reações que ainda poderão acontecer após o término da dispersão.

3.1.1.2 Realização da Moagem

A etapa que dá continuidade ao processo é a moagem, onde o *slurry* é disposto no moinho de bolas para a realização da redução no tamanho das partículas da carga mineral. Sabe-se que para um moinho ser eficiente o volume de material dentro do mesmo não deve ocupar mais de 50% do volume total.

Por esse motivo foi realizado um experimento com água para saber qual o volume total ocupado no jarro do moinho de laboratório, para assim saber a quantidade de material a ser colocado no moinho. O jarro utilizado nesse procedimento pode ser observado na Figura 5 do Apêndice A.

Como a densidade da água é 1 g/cm^3 e a massa de água suportada no jarro foi de 555,56 g, calculasse o volume de água. Com esse volume calculasse o valor ocupado pelo material dentro do moinho de acordo com a sua densidade obtida pelo picnômetro.

Com o volume de *slurry* encontrado na fórmula (1), preenche-se o jarro com o material. Em seguida o jarro é disposto dentro do moinho e preso ao suporte, após o posicionamento estar pronto o moinho é fechado. Através do painel do equipamento é escolhido o tempo em que o processo acontecerá, e então ele é iniciado.

Após o tempo de moagem estar completo o jarro é retirado do moinho, observado na Figura 6 do Apêndice A, e o material moído é retirado com o auxílio de uma peneira, representado na Figura 7 do Apêndice A. O material retirado do moinho é colocado em um recipiente para ser aplicado na formulação da tinta acrílica posteriormente.

3.1.1.3 Desenvolvimento da Tinta Acrílica

O desenvolvimento da tinta acrílica passa por um procedimento bem semelhante ao de preparação do *slurry*, porém possui mais etapas. Através de testes foi estudada qual a

porcentagem ideal de cada componente a ser disposto na formulação, de modo a obter resultados sem a geração de sedimentações e que haja a dispersão total da carga com os aditivos utilizados. Como o *slurry* será adicionado a essa formulação, é necessário levar em consideração a quantidade de sólidos dispostos nele para descobrir a quantidade necessária na mistura.

Após a escolha das quantidades de cada componente, é realizada a separação deles de acordo com cada etapa da formulação. Para dar início a primeira e a segunda deve ser preparadas separadamente, já que a primeira é composta por líquidos e a segunda pelas demais cargas minerais necessárias.

Após a pesagem da primeira etapa é realizada a mistura dos elementos envolvidos com o auxílio de um dispersor, e enquanto esse processo é realizado pesasse as cargas minerais correspondente a etapa 2, para mistura após a homogeneização da primeira etapa. Após a adição das cargas minerais é aconselhado deixar em dispersão em alta velocidade por cerca de 1 hora para que ocorra a dispersão total das duas etapas.

Depois da 1 hora de dispersão são adicionados a resina e alguns aditivos na mistura, sendo essa parte correspondente a etapa 3. Na etapa 4 é então verificado o pH para saber se pode ou não dar continuidade ao acerto de viscosidade. Caso o pH da amostra esteja abaixo de 9 é aconselhado aumentá-lo antes de prosseguir, pois alguns aditivos da última etapa do processo podem não desempenhar a sua função corretamente se o pH estiver muito baixo.

Com pH acima de 9 pode-se dar início a última etapa, onde são adicionados os biocidas e realizado o acerto de viscosidade. Um detalhe que não pode ser esquecido nessa etapa é que devemos sempre diluir o espessante em água antes de colocá-lo na amostra, para que a reação ocorre mais devagar, permitindo assim o controle da viscosidade da amostra. Quando o produto atinge os valores estipulados pela empresa, ele é deixado em descanso por um dia para realização de todas as reações que podem acontecer após o término de todas as etapas.

3.1.1.4 Propriedades da Tinta Acrílica

Depois do período de descanso a amostra é aberta e agitada com o auxílio de uma espátula para verificação das características visual do produto. Em seguida é iniciada a verificação dos outros parâmetros de qualidade, observado se houve alterações nos parâmetros encontrados no final do desenvolvimento.

A viscosidade buscada nesses testes está encontrada entre 92 e 100 kU, sendo que um aspecto importante a tinta permanecer fluída, permitindo assim sua aplicação sem muitas dificuldades. O pH da amostra, por sua vez, deve estar entre 8,50 e 9,50, sendo que o mais indicado para uma tinta é que ela esteja próxima de 9 para manter a liga entre as cargas e os aditivos da formulação.

Outra propriedade verificada é a densidade, objetivando verificar a quantidade de cargas dispostas no produto final. Essa propriedade está relacionada com a cobertura da tinta, já que quanto mais dispersas as cargas, melhor a cobertura obtida. Outra propriedade importante é a temperatura, pois dependendo dela todas as outras propriedades são alteradas.

3.1.1.5 Avaliação da Cobertura

O principal objetivo desse trabalho está relacionado com cobertura do material, sendo que quanto mais a tinta cobrir a superfície, melhor ela se torna. Para avaliar a cobertura da tinta será usado um colorímetro. “O colorímetro é um equipamento que é dedicado a analisar a cor verdadeira, a cor aparente, o brilho e opacidade na aplicação de diversos produtos” (BRASEQ, 2020).

Esse equipamento possui um visor onde são fornecidos alguns fatores relacionados a coloração da tinta. Nesse visor são mostrados 4 fatores, cada um correspondente a uma característica, são eles: $\pm dL$, $\pm da$, $\pm db$ e $\pm de$.

O “dL” refere ao brilho, sendo -dL significando que a mostra está mais escura que o padrão e +dL significando que a amostra está mais clara que o padrão. O “da” e o “db” se refere a coloração, onde +da a amostra está mais vermelha, -da a amostra está mais verde, +db a amostra está mais amarela e -db a amostra está mais azul que o padrão. O último fator é o “de” que indica se a amostra está mais limpa ou mais suja que o padrão.

Como a coloração da tinta produzida é branca o resultado a ser observado é o dL, e sua aplicação analisada será uma leneta com um extensor de 200 μm , representando duas demãos de tintas sobre uma superfície.

3.2 DIMENSIONAMENTO DO MOINHO DE BOLAS

Para realização do dimensionamento serão utilizadas as fórmulas apresentadas no tópico 2.4 deste projeto, seguindo a ordem disposta nele.

Primeiramente será utilizada a fórmula atribuída por Gomide, que permite o cálculo do diâmetro das esferas que serão dispostas dentro da carcaça do moinho. Em seguida se torna necessário identificar o volume ocupado pelo material que será disposto no equipamento, e para fazer isso utiliza-se a fórmula da densidade, onde através da massa e da densidade do *slurry* encontra-se o volume.

Tendo conhecimento do volume ocupado pelo material e o fator de enchimento que ele representa no equipamento, pode-se encontrar o volume total da carcaça. Através desse volume calculasse o volume ocupado pelas esferas dentro do equipamento, levando em consideração que o volume de material mais o volume de esferas não deve passar de 50% para não prejudicar a eficiência da moagem.

Com o volume do cilindro calculado anteriormente, encontra-se o diâmetro e o raio do equipamento que serão necessários quando for aplicado o método de Bond para o dimensionamento. O primeiro fator apresentado por Bond é a velocidade crítica de operação, porém devido ao desgaste do equipamento não é recomendado atuar na mesma, por esse motivo é calculada a velocidade recomendada que se trata de uma porcentagem da velocidade crítica de acordo com o diâmetro do equipamento.

O próximo valor a ser encontrado é a distância entre o material e esferas até o topo do moinho para assim conhecer o volume de vazios que será necessário. O último cálculo a ser realizado é a energia requerida pelo equipamento, porém para que os resultados se aproximem da realidade são aplicados seis fatores de correção que levam em consideração o tipo de circuito, o tamanho da partícula, a redução no tamanho do material e outros fatores importantes que podem interferir na moagem.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 SLURRY

Foram desenvolvidas formulações com porcentagens de calcita, aditivos e água, buscando a melhor composição para o *slurry*. Foram testadas formulações contendo de 72 a 58% de calcita, porém os testes 1 e 2 que continham 72% geraram sedimentação, e apresentavam viscosidades muito elevadas o que prejudicavam a formulação da tinta depois.

Por esse motivo a porcentagem escolhida para os demais testes ficou em uma faixa de 58 a 62%. Conhecendo essa porcentagem procurou-se encontrar uma formulação, onde seus compostos estivessem em porcentagem ideais para que não ocorressem saturações e que quando aplicado na tinta fosse capaz de atribuir características e não prejudicar os resultados. Os componentes e suas porcentagens são demonstrados na Tabela 1.

Tabela 1: Composição do *slurry*

Componentes	Porcentagem Utilizada
Água	35,00 – 39,00
Bentonita	0,40 – 0,80
Antioxidante	0,08 – 0,30
Sequestrante de íons	0,06 – 0,10
Aditivos Químicos	1,50 – 1,90
Biocida	0,09 – 0,40
Calcita	58,00 – 62,00

Fonte: Autora, 2020.

Através de testes chegou-se à conclusão de que as faixas de valores dispostas na tabela 1 eram ideais para que o *slurry* permanecesse fluido. Quando aplicado na prática a formulação do *slurry*, obteve-se como resultados os seguintes parâmetros: uma viscosidade de aproximadamente 82 kU, pH de 10,57 e densidade 1,616 g/cm³ a uma temperatura de 23,3 °C.

Esses resultados foram semelhantes ao encontrado por Daros (2016) que tratou sobre a estabilidade das cargas minerais. Porém tanto a formulação desenvolvida nesse projeto quanto ao do outro autor, levaram em consideração a formulação padrão de cada empresa, o que mostrou que apesar de componentes diferentes os resultados obtidos nas propriedades do *slurry* foram semelhantes.

4.2 TINTAS ACRÍLICAS FOSCA

Foram testadas diversas fórmulas variando a quantidade de alguns compostos, tendo por objetivo a obtenção dos melhores resultados de cobertura e performance da tinta. À medida que os testes foram realizados alguns dos aditivos químicos necessitaram alterações em suas porcentagens devido a alguns fatores como sedimentações, alterações de pH, ou ainda viscosidades alta demais para aplicação.

A formulação utilizada pode ser observada na tabela 2, onde são demonstradas as faixas de porcentagens de cada um dos componentes utilizados. A tabela demonstra as porcentagens para uma formulação equivalente a 100%, sendo ressaltado que os testes foram produzidos com um peso final 800 g para que fosse possível a realização dos testes.

Tabela 2: Composição da tinta

Composição	Porcentagem Utilizada
Água	39,00 – 43,00
Aditivos	1,00 – 4,00
Cargas Minerais	24,00 – 28,00
Slurry	8,00 – 12,00
Resina Acrílica	16,00 – 20,00
Biocidas	0,30 – 0,70

Fonte: Autora, 2020.

Foram realizados ao todo dois testes com 72% de sólidos e cinco testes de 58 a 62% de sólidos em sua formulação. Essa quantidade de testes deve-se ao tempo gasto com a moagem da carga, preparação das amostras, realização dos testes de propriedades e o tempo de secagem das aplicações para teste de cobertura.

O primeiro teste desenvolvido foi a formulação de um padrão, onde foi aplicada a carga utilizada na formulação atual da empresa, ou seja, a calcita micronizada (Padrão). Esse teste quando comparado com os demais realizados, servirá de parâmetro para observação dos efeitos dos tempos de moagem na cobertura do produto final.

O segundo teste realizado foi com a calcita malha #325 sem realização da moagem (Teste 2), para comprovação de que sua cobertura iria ficar inferior ao padrão da micronizada sem moagem. Além de verificar se com o aumento no tempo de moagem iria-se obter uma cobertura melhor ou se a moagem não seria efetiva.

No terceiro teste, a amostra foi moída por cerca de 30 minutos (Teste 3) e após todos os procedimentos já mencionados nos métodos presentes no tópico 3.1.1, a amostra foi aplicada em uma leneta junto com a malha #325 para melhor comparação. Após a secagem dela, na temperatura ambiente, foi então comparada a cobertura entre os dois testes.

No quarto teste o tempo de moagem foi elevado a 1 hora (Teste 4), e após a realização dos procedimentos também houve a aplicação em uma leneta, e realizada a comparação com os testes anteriores. Para fins de comparação os testes de 1 hora e de 30 minutos foram aplicados lado a lado em uma mesma leneta, permitindo assim a verificação visual das alterações sofridas na cobertura da amostra.

Observou-se a partir dos resultados a necessidade de determinar o limite que poderia ser aplicada a moagem, sem haver interferências na cobertura. Por esse motivo o *slurry* contendo a calcita micronizada foi moído por 2 horas (Teste 5), tendo por objetivo verificar se após a malha #1000 a cobertura ficaria mais fraca. Porém mesmo com essa moagem por duas horas a cobertura ainda se mostrou melhor que o padrão, mostrando que limite de moagem ótima ainda não foi atingido, provando assim a necessidade de mais testes de moagem.

Com base nos testes realizados o melhor resultado obtido foi no teste 3 com trinta minutos de moagem. Tendo suas propriedades com os seguintes resultados: uma viscosidade de 98 kU, pH de 8,86, uma densidade de 1,291 g/cm³ e temperatura 25,2 °C.

4.3 AVALIAÇÃO DA COBERTURA

Todos os testes mencionados no tópico anterior passaram por um equipamento conhecido como colorímetro, que como já foi mencionado avalia as características da cobertura do produto desenvolvido.

Através desse equipamento pode-se ter uma melhor percepção dos efeitos sofridos pela cobertura, já que visualmente fatores como a luz do ambiente podem interferir nos resultados. Como a coloração usada no teste é branco o resultado principal a ser observado é o dL, que irá demonstrar se a amostra se tornou mais clara ou não quando comparada com o padrão. Sendo resultados positivos significando uma melhora na cobertura, e resultados negativos a piora dela.

Na tabela 3 pode ser observados os resultados de dL obtido dos testes realizados com a malha #325 com e sem a realização da moagem, em comparação com o padrão desenvolvido com a calcita micronizada.

Tabela 3: Resultado da Cobertura no Colorímetro

N° do Teste	dL
Padrão	-
Teste 2	- 0,3
Teste 3	+ 0,4
Teste 4	+ 0,3
Teste 5	+ 0,3

Fonte: Autora, 2020.

Um fator a ser mencionado é que os testes contendo 75 % de sólidos não foram aplicados, pois a quantidade de carga disposta na fórmula gerou saturação e viscosidades muito elevadas, o que os desqualificou para o teste de aplicação.

O colorímetro foi utilizado em aplicações feitas em lenetas de 194 x 289 mm, com um extensor de 200 µm, simulando duas demãos de tinta na superfície de aplicação. Na tabela 3 estão dispostos apenas os resultados de comparação com o padrão da calcita micronizada sem moagem. Apesar dos resultados da tabela 3 já mostrarem que houve uma melhora, foi realizada uma comparação individual entre todos os testes para observação dos resultados de maneira mais detalhada.

Na tabela 4 estão dispostos todos os resultados obtidos através da comparação individual de cada produto, informando o teste padrão utilizado e o teste no qual foi realizando a comparação de cobertura.

Tabela 4: Comparação entre os testes

Padrão	Teste Comparado	dL
Calcita #1000 sem moagem	Calcita #325 sem moagem	- 0,3
Calcita #1000 sem moagem	Calcita #325 (30 minutos)	+ 0,4

(Continua)

Calcita #1000 sem moagem	Calcita #325 (1 hora)	+ 0,3
Calcita #1000 sem moagem	Calcita #1000 com moagem	+ 0,3
Calcita #325 sem moagem	Calcita #325 (30 minutos)	+ 0,5
Calcita #325 sem moagem	Calcita #325 (1 hora)	+ 0,4
Calcita #325 sem moagem	Calcita #1000 com moagem	+ 0,4
Calcita #325 (30 minutos)	Calcita #325 (1 hora)	- 0,1
Calcita #325 (30 minutos)	Calcita #1000 com moagem	- 0,2
Calcita #325 (1 hora)	Calcita #1000 com moagem	+ 0,0

Fonte: Autora, 2020.

Com base nos valores apresentados na tabela 4, verificou-se que o tempo de moagem da calcita malha #325 que obteve melhor cobertura, está entre 30 minutos e 1 hora. Esse fato é observado através da variação negativa no dL, informando que a amostra se tornou mais escura que o padrão. Porém como o tempo exato não foi determinado, se torna necessário a realização de mais testes para a determinação do tempo responsável pela melhor cobertura.

Através dos resultados apresentados o teste que obteve melhor resultado foi o Teste 3 com 30 minutos de moagem, onde o dL encontrado foi de + 0,4, mostrando que este teste foi capaz de cobrir mais que o padrão utilizado. No Apêndice A estão dispostas imagens das aplicações usadas para a determinação da cobertura da tinta, representadas na Figura 8, Figura 9 e Figura 10.

4.4 DIMENSIONAMENTO DO MOINHO DE BOLAS

Para a realização do dimensionamento foram utilizadas as fórmulas mostradas no tópico 3.2 deste trabalho, onde foi considerado que o tamanho de partícula na entrada do moinho é cerca de 44 μm e a partícula de saída seja entorno de 20 μm , podendo ser uma faixa com valores acima e abaixo do valor esperado.

O peso utilizado para base de cálculo será de 3000 kg por batelada, e a densidade do material a ser moído, no caso o *slurry* será calculado a partir da média dos valores obtidos nos testes laboratoriais. Como a carga mineral utilizada para esse projeto é a calcita o índice de trabalho (W_i) que será aplicado para fins de cálculo é 8,2 kWh/ton curta.

Na Tabela 5 serão dispostos os resultados obtidos através dos cálculos do dimensionamento, disponível no memorial de cálculo realizado presente no apêndice A deste projeto.

Tabela 5: Resultados do dimensionamento do moinho

DADOS CALCULADOS	RESULTADOS OBTIDOS
Diâmetro médio das esferas	7,300 mm
Volume do material no moinho	1,833 m ³
Volume do cilindro	12,221 m ³
Volume das esferas	3,665 m ³
Diâmetro do moinho	2,818 m
Raio do moinho	1,090 m
Velocidade crítica	28,645 rpm
Velocidade recomendada	22,629 rpm
Altura do material ao topo do moinho	1,436 m
1º Fator de eficiência (EF ₁)	1,000
2º Fator de eficiência (EF ₂)	1,020
3º Fator de eficiência (EF ₃)	1,023
4º Fator de eficiência (EF ₄)	0,460
5º Fator de eficiência (EF ₅)	1,323
7º Fator de eficiência (EF ₇)	1,153
Energia necessária para funcionamento	5,137kWh

Fonte: Autora, 2020.

5 CONCLUSÃO

O estudo das distribuições granulométricas para o dimensionamento de um moinho de bolas por via úmida mostrou uma leve alteração na cobertura do produto após uma moagem de 30 minutos, porém para obtenção de resultados mais efetivos deve-se realizar mais testes em laboratório. Através de novos testes será possível determinar o tempo que a melhor cobertura será atingida.

Os resultados mais significativos dos testes realizados para avaliar a influência que a moagem possui na formulação do produto foram: diâmetro das esferas, o diâmetro do equipamento, a velocidade recomendada de operação e a energia necessária para seu funcionamento.

O volume de esferas e de material dentro do moinho foram de $3,665 \text{ m}^3$ e $1,833 \text{ m}^3$ respectivamente.

O diâmetro do moinho através do volume total foi de $12,221 \text{ m}^3$.

A velocidade de operação recomendada e a potência para realização do processo estimadas foram $22,629 \text{ rpm}$ e $5,137 \text{ kWh}$.

Enfim, os resultados obtidos indicaram a necessidade de analisar a viabilidade técnica do moinho dimensionado, juntamente com os fornecedores do equipamento. Dados técnicos devem ser considerados, como tempo de moagem e o tamanho da partícula no período determinado para que a cobertura não seja prejudicada.

REFERÊNCIAS

- Beraldo, José Luiz. 1987. Moagem de Minérios em Moinhos Tubulares. São Paulo : Edgard Blücher Ltda., 1987. Disponível em: <https://doku.pub/download/moagem-de-minerios-em-moinhos-tubulares-beraldo-1987-oq1z9wy5kp02> . Acesso em: 20 mai. 2020.
- BERGERMAN, Professor Mauricio Guimarães. Cominuição: moinhos de bolas e barras. Poços de Caldas: Curso de Especialização em Tratamento de Minérios, 2012. 53 slides, color. Disponível em: https://files.cercomp.ufg.br/weby/up/596/o/04a._Moagem_de_bolas_e_barras.pdf. Acesso em: 20 ago. 2020.
- BRASEQ. Colorímetro para Laboratório: fundamentos da medição da cor. 2020. Elaborada por BrasEq. Disponível em: <https://www.braseq.com.br/colorimetro-laboratorio>. Acesso em: 20 out. 2020.
- BUDKE, Régis; LIMA, Marinésio Pinheiro. de; NUNE, Diego Souza; MOURA, Lucinewton Silva De. Efeito Do Tratamento Térmico No Índice De Trabalho (Wi) De Amostras De Quartz. p. 466-472 Disponível em: <https://is.gd/iHVQpD>. Acesso em: 11 out. 2020.
- CHAVES, Arthur P., PERES, Antonio Eduardo C. Teoria e prática do tratamento de minérios. Vol. 3. 2003. Disponível em: <https://www.docsity.com/pt/teoria-e-pratica-do-tratamento-de-minerios-britagem-moagem-e-peneiramento-chaves-a-p/4890692/> . Acesso em: 01 jun. 2020.
- CMC. Moagem úmida: A CMC do Brasil é especializada em moagem úmida, um processo que possibilita a redução do tamanho de partículas, 2020. Disponível em: <http://https://cmcmilling.com.br/moagem-umida.html>. Acesso em: 20 mai. 2020.
- COULSON J. M., RICHARDSON J. F., BACKHURST J. R., HARKER J. H. Coulson & Richardson's Chemical engineering: Particle technology and Separation Processes. Volume.2, 5 ed. Londres, 2002. Disponível em: <https://www.passeidireto.com/arquivo/57443112/coulson-and-richardsons-chemical-engineering-vol-2-5-ed-particle-technology-and-> .Acesso em: 20 ago. 2020
- DAROS, Rafael Guglielmi. Estabilização de cargas minerais para produção de slurries utilizados em tintas acrílicas arquitetônicas base água. UNESC. 2016. Disponível em: <http://repositorio.unesc.net/bitstream/1/5023/1/Rafael%20Guglielmi%20Daros.pdf>. Acesso em: 05 out. 2020.
- DECSIGNER. Entenda como os aditivos minerais dão maior resistência às tintas. 2019. Disponível em: <https://is.gd/I8matA>. Acesso em: 24 ago. 2020
- DELBONI JUNIOR, Homero. Capítulo 2: cominuição. São Paulo. 2013, p. 103-131. Disponível em: <http://mineralis.cetem.gov.br/bitstream/cetem/1286/1/Tend%C3%AAsAnciasParte2.2.pdf>. Acesso em: 11 out. 2020.
- DUDA, W.H. - Cement Data Book; Bauverlag; 1976. Disponível em: <https://pt.scribd.com/doc/179531109/Duda-pdf> . Acesso em: 05 out. 2020.

FAZENDA, Jorge M R (Coord.). Tintas e vernizes: ciência e tecnologia. 3. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 2005. 1044 p. ISBN 8521203748.

FERRARI, Caetano. Manual do Artista: CARACTERÍSTICAS DO ACRÍLICO. Disponível em: <http://manualdoartista.com.br/caracteristicas-do-acrilico/>. Acesso em: 11 out. 2020.

FIMACO. O que são e para que servem os tanques de armazenamento. Disponível em: <https://www.fimaco.com.br/blog/para-que-servem-os-tanques-de-armazenamento/>. Acesso em: 01 jun. 2020.

GOMIDE, Reynaldo. Operações Unitárias: Operações com Sistemas Sólidos Granulares. Vol 1. São Paulo. 1983. Disponível em: https://www.academia.edu/36386827/Reynaldo_Gomide_Opera%C3%A7%C3%B5es_Unit%C3%A1rias_Vol_1_Opera%C3%A7%C3%B5es_Com_Sistemas_S%C3%B3lidos_Granulares_pdf . Acesso em: 01 jun. 2020.

INFRAROI: Metso lança sistema que aciona moinhos com potência quase dobrada. São Paulo, 30 nov. 2015. Disponível em: <http://infraroi.com.br/metso-lanca-sistema-que-aciona-moinhos-com-potencia-quase-dobrada/>. Acesso em: 12 out. 2020.

LUZ, Adão Benvindo (Ed.); SAMPAIO, João Alves (Ed.); ALMEIDA, Salvador Luiz Matos (Ed.). Tratamento de Minérios 2010. 5.ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2010. 932p. Disponível em: <http://mineralis.cetem.gov.br/handle/cetem/476> . Acesso em: 01 jun. 2020.

MARTINS, Lemyr. Moagem a seco. E agora? Como faço para melhorar o processo?. 2015. Disponível em: <https://pt.linkedin.com/pulse/moagem-seco-e-agora-como-fa%C3%A7o-para-melhorar-o-processo-lemyr-martins> . Acesso em: 24 ago. 2020

MOURA, Francine. Moagem. Bahia: IFNMG, 2017. Disponível em: <https://www.passeidireto.com/arquivo/32617024/moagem> . Acesso em: 24 ago. 2020

MURRAY, H. Haydn. Applied Clay Mineralogy: Occurrences, processing and application of Kaolins, bentonites, palygorskite- sepiolite, and common clays. 7.ed. Bloomington: Developments in Clay Science, 2007. 189 p. 86 f. Disponível em: https://kyawlinnzaw.weebly.com/uploads/4/5/1/3/4513060/applied_clay_mineralogy.pdf . Acesso em: 24 ago. 2020

NOS, Gustavo. Moinho de bolas de baixo custo. Disponível em: <https://www.univates.br/bdu/bitstream/10737/260/1/GustavoNos.pdf>. Acesso em: 29 mar. 2020.

NUNES, Andréia de Lourdes. Modelagem e simulação do circuito de moagem da Votorantim metais zinco morro agudo. 2012. 117 f., São Paulo, 2012. Cap. 1. Disponível em: https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3134/tde-14062013-142637/publico/Dissertacao_Andreia.pdf#page=24&zoom=100,109,113. Acesso em: 11 out. 2020.

OLIVEIRA, Renata de Freitas. Uma Revisão dos Princípios de Funcionamento e Métodos de Dimensionamento de Moinhos de Bolas. Departamento de Engenharia de Minas. UFMG.

2012. Disponível em: https://repositorio.ufmg.br/bitstream/1843/BUOS-9CAG47/1/uma_revis_o_dos_princ_pios_de_funcionamento_e_m_todos_de_dimensionamento_de_moinhos_de_bolas.pdf. Acesso em: 02 mai. 2020.

OLIVEIRA, Rogério Leonardo. Projeto, Implantação e Avaliação de Moinho de Bolas em Escala Laboratorial. CEFET - MG. 2015. Disponível em: http://www.eng-minas.araxa.cefetmg.br/wp-content/uploads/sites/170/2018/05/Rogério_Leonardo_Oliveira.pdf#page=16&zoom=100,109,525 . Acesso em: 05 out. 2020.

PAULA, Lucas F. de et al. Diretrizes para a construção de um moinho de bolas para a moagem de sólidos em laboratórios. Química Nova, 2013. 4 p. Disponível em: <https://www.scielo.br/pdf/qn/v37n4/25.pdf>. Acesso em: 20 mai. 2020.

PIZZOLO, Juliana Pavei; NONI JUNIOR, Agenor de. Propriedades da carga caulim calcinado para substituição do pigmento dióxido de titânio aplicado em tintas. 2013. 11 f. Universidade do Extremo Sul Catarinense, Santa Catarina, 2013. Disponível em: http://abrafati2019.com.br/2013/Dados/PDF/Paper_104.pdf. Acesso em: 20 ago. 2020.

SILVA, Juliana Aliques de Oliveira. Modelagem do moinho de bolas de rocha fosfática da empresa anglo american fosfatos brasil utilizando a ferramenta moly-cop tools. 2014. 89 f. Monografia (Especialização) - Curso de Tratamento de Minérios, Universidade Federal de Goiás – Ufg, Catalão, 2014. Disponível em: https://files.cercomp.ufg.br/weby/up/596/o/Juliana_Aliques_de_Oliveira_Silva.pdf. Acesso em: 20 ago. 2020.

SINFERBASE: Novo sistema de acionamento de moinhos aumenta a eficiência na mineração. Brasília, 26 nov. 2015. Disponível em: <http://sinferbase.com.br/noticias/novo-sistema-de-acionamento-de-moinhos-aumenta-a-eficiencia-na-mineracao/>. Acesso em: 12 out. 2020.

SOUZA, Natasha Almeida Fernandes de. Análise crítica de rotas de processamento de minérios de ferro itabiríticos. 2010. 107 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Metalúrgica, Engenharia, Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2010. Disponível em: <http://www.monografias.poli.ufrj.br/monografias/monopoli10003574.pdf>. Acesso em: 21 out. 2020.

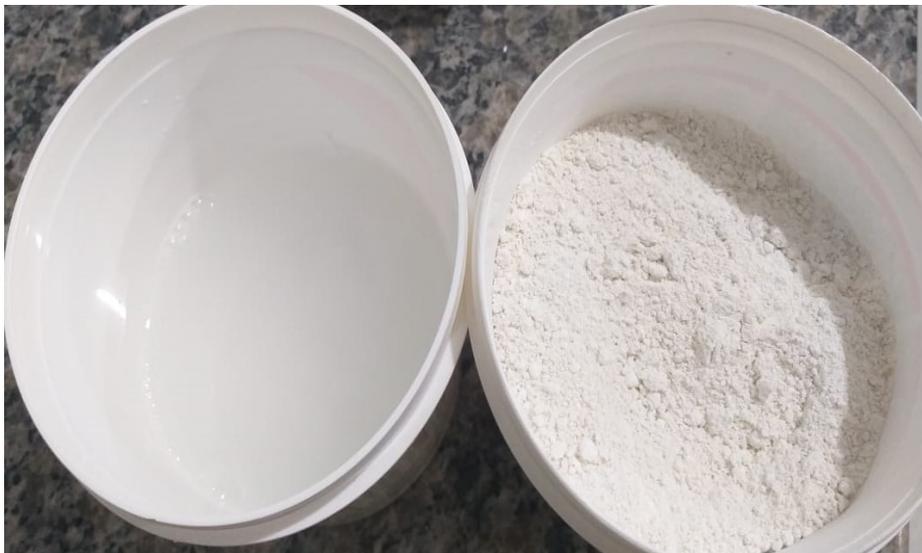
T.M. LONDE, J.R.D. FINZER. Micronização em moinho com jato de ar em espiral. Paraná: Universidade de Uberaba, 2017. Disponível em: <https://repositorio.uniube.br/bitstream/123456789/509/1/MICRONIZACAO%20EM%20MOINHO%20COM%20JATO.pdf>. Acesso em: 24 ago. 2020

Wills, Barry A. e NAPIER-MUNN, Tim. 2006. Mineral Processing Technology - An Introduction to the Practical Aspects of Ore Treatment and Mineral Recovery. Burlington: Elsevier, 2006. Disponível em: https://www.academia.edu/40297760/Mineral_Processing_Technology_An_Introduction_to_the_Practical_Aspects_of_Ore_Treatment_and_Mineral_Recovery_by_Barry_A_Wills_Tim_Napier_Munn . Acesso em: 05 out. 2020.

APÊNDICES

APÊNDICE A – Imagens dos testes realizados em laboratório

Figura 3: Primeira e segunda fase da formulação



Fonte: Autora, 2020.

Figura 4: Mistura dos componentes da tinta



Fonte: Autora, 2020.

Figura 5: Preenchimento das esferas no jarro



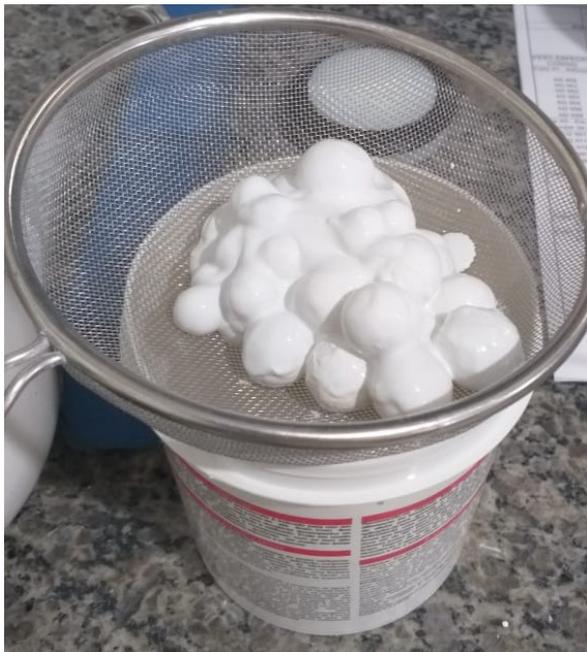
Fonte: Autora, 2020.

Figura 6: *Slurry* após a moagem



Fonte: Autora, 2020.

Figura 7: Separação do material e dos componentes do moinho



Fonte: Autora, 2020.

Figura 8: Comparação da cobertura Padrão X #1000 com moagem



Fonte: Autora, 2020.

Figura 9: Comparação da cobertura Teste 2 X Teste 3



Fonte: Autora, 2020.

Figura 10: Comparação da cobertura Teste 3 X Teste 4



Fonte: Autora, 2020.

APÊNDICE B – Memorial de cálculo

DIÂMETRO DAS ESFERAS

$$Db = 11 * \sqrt{D} \quad (1)$$

$$Db = 11 * \sqrt{0,044}$$

$$Db = 0,730cm$$

$$Db \cong 7,30mm$$

VOLUME DE MATERIAL

$$d = \frac{m_{material}}{V_{material}} \quad (2)$$

$$1637,02 = \frac{3000}{V_{material}}$$

$$V_{material} = 1,833m^3$$

VOLUME DO CILINDRO

$$V_{cilindro} = \frac{100 * V_{material}}{15} \quad (3)$$

$$V_{cilindro} = \frac{100 * 1,833}{15}$$

$$V_{cilindro} = 12,22m^3$$

VOLUME DAS ESFERAS

$$V_{esferas} = \frac{30 * V_{cilindro}}{100} \quad (4)$$

$$V_{esferas} = \frac{30 * 12,22}{100}$$

$$V_{esferas} = 3,665m^3$$

DIÂMETRO DO CILINDRO

$$V = \frac{\pi * 1,5 * D^3}{4} \quad (6)$$

$$12,22 = \frac{\pi * D^3 * 1,5}{4}$$

$$D = 2,181m$$

$$r = \frac{2,181}{2}$$

$$r = 1,090m$$

VELOCIDADE DE OPERAÇÃO

$$N_c = \frac{42,3}{\sqrt{2 * r}} \quad (7)$$

$$N_c = \frac{42,3}{\sqrt{2 * 1,09}}$$

$$N_c = 28,645rpm$$

$$V_{rec} = \frac{N_c * \%}{100} \quad (8)$$

$$V_{rec} = \frac{28,645 * 79}{100}$$

$$V_{rec} = 22,629rpm$$

DISTÂNCIA DO TOPO DO MOINHO AO TOPO DA CARGA

$$F = 113 - \frac{126 * H}{D} \quad (9)$$

$$30 = 113 - \frac{126 * H}{2,181}$$

$$H = 1,436m$$

ÍNDICE DE TRABALHO

$$W_i = 8,2 kWh/toncurta$$

FATORES DE CORREÇÃO

$$EF_1 = 1$$

$$EF_2 = 1,20$$

$$EF_3 - D = 2,181 \text{ m}$$

$$EF_3 = \left(\frac{2,44}{D}\right)^{0,2} \text{ para } D \leq 3,81 \text{ m} \quad (12)$$

$$EF_3 = \left(\frac{2,44}{1,608}\right)^{0,2}$$

$$EF_3 = 1,023$$

$$EF_4 -$$

$$R_r = \frac{F}{P} \quad (15)$$

$$R_r = \frac{44}{20}$$

$$R_r = 2,2$$

$$F_o = 4000 * \sqrt{\frac{13}{W_i}} \quad (16)$$

$$F_o = 4000 * \sqrt{\frac{13}{8,2}}$$

$$F_o = 5036,45$$

$$EF_4 = \frac{R_r + (W_i - 7) * \left(\frac{F - F_o}{F_o}\right)}{R_r} \quad (14)$$

$$EF_4 = \frac{2,2 + (8,2 - 7) * \left(\frac{44 - 5036,45}{5036,45}\right)}{2,2}$$

$$EF_4 = 0,459$$

$$EF_5 -$$

$$EF_5 = \frac{P + 10,3}{1,145 * P} \quad (17)$$

$$EF_5 = \frac{20 + 10,3}{1,145 * 20}$$

$$EF_5 = 1,323$$

$$EF_7 -$$

$$R_r = 2,2$$

$$EF_7 = \frac{2*(R_r-1,35)+0,26}{2*(R_r-1,35)} \quad (18)$$

$$EF_7 = \frac{2*(2,2-1,35)+0,26}{2*(2,2-1,35)}$$

$$EF_7 = 1,153$$

ENERGIA NECESSÁRIA PARA À MOAGEM

$$W = 10 \cdot W_i \left(\frac{1}{\sqrt{P}} - \frac{1}{\sqrt{F}} \right) \cdot \prod_{i=1}^8 (EF_i) \quad (11)$$

$$W = 10 * W_i \left(\frac{1}{\sqrt{P}} - \frac{1}{\sqrt{F}} \right) * (EF_1 * EF_2 * EF_3 * EF_4 * EF_5 * EF_7)$$

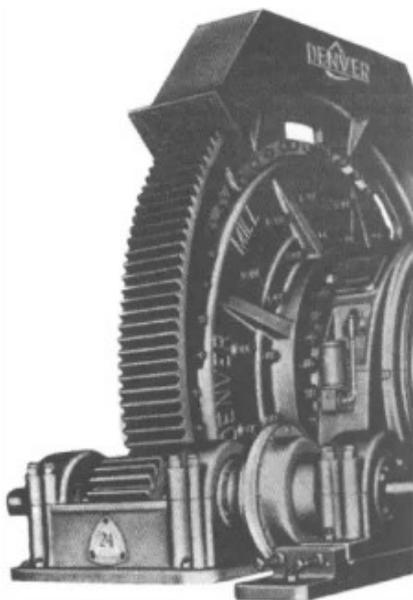
$$W = 10 * 8,2 \left(\frac{1}{\sqrt{20}} - \frac{1}{\sqrt{44}} \right) * (1 * 1,2 * 1,023 * 0,459 * 1,323 * 1,153)$$

$$W = 5,137kWh$$

ANEXOS

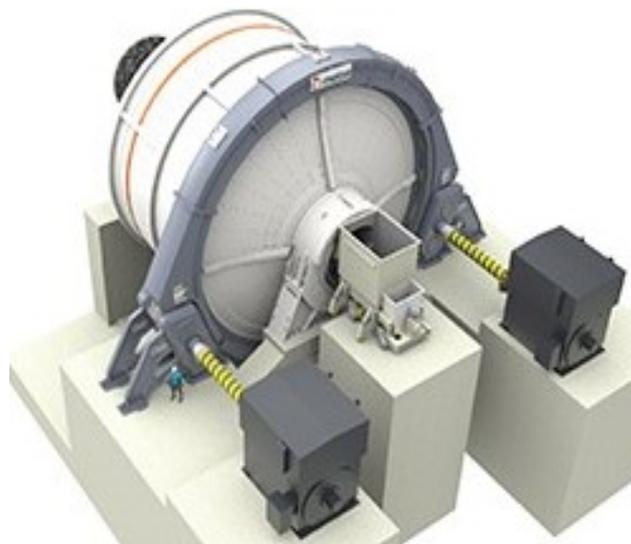
ANEXO A – Figuras sobre a descrição do equipamento

Figura 11: Acionamento Coroa e Pinhão



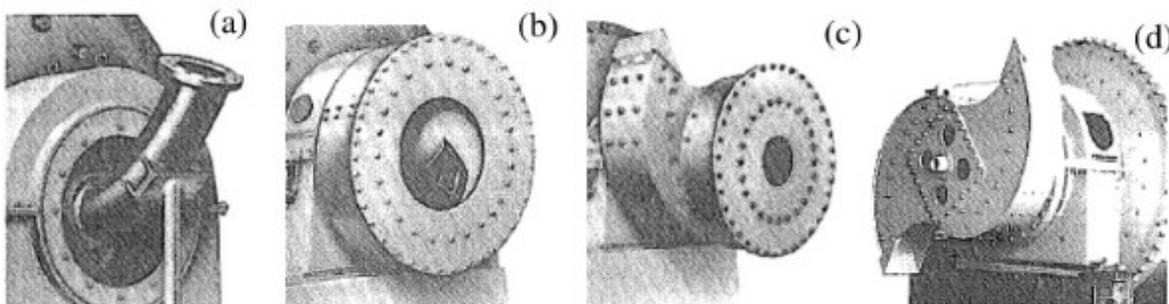
Fonte: Wills, et al., 2006

Figura 12: Acionamento *Gearless*



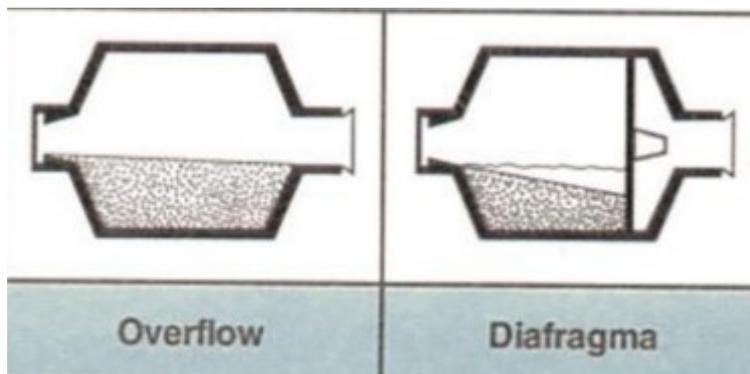
Fonte: INFRAROI, 2015

Figura 13: Tipos de alimentadores



Onde: (a) *spout feeder*, (b) *drum feeder*, (c) *drum-scoop feeder* e (d) *scoop feeders*.
Fonte: Oliveira (2012)

Figura 14: Tipos de descarga



Fonte: Oliveira, 2015

ANEXO B – Tabelas para o dimensionamento

Tabela 6: Proporção L/D

Diâmetro de Alimentação (F)	5000 a 1000 mm	5000 a 1000 m	Fina/remoagem
L/D	1:1 - 1,25:1	1,25:1 – 1,75:1	1,5:1 – 2,5:1
Diâmetro das bolas	6,35 – 8,89 cm	5,08 – 6,35 cm	1,9 – 0,635 cm

Fonte: Chaves e Peres (2003, p. 620).

Tabela 7: Velocidades recomendadas por Rowland (Beraldo, 1987)

Diâmetro		Velocidade Recomendada (% velocidade crítica)			
m	Pés	Barras	Bolas	Multicâmara (barras/bolas)	Multicâmara (barras/bolas)
0,91 – 1,83	3 - 6	76 – 73	80 – 78	78 – 75	75 – 72
1,83 – 2,74	6 - 9	73 – 70	78 – 75	75 – 72	72 – 70
2,74 – 3,66	9 - 12	70 – 67	75 – 72	72 – 70	70 – 68
3,66 – 4,57	12 – 15	67 – 64	72 – 69	70 – 68	–
4,57 – 5,49	15 - 18	–	69 - 66	–	–

Fonte: Beraldo (1987, p. 40).

Tabela 8: Wi de impacto médio de alguns materiais (Rowland)(kWh/ton curta)

Material	Nº de testes	Média	Limite
Basalto	15	20,2	9,9 – 34,8
Bauxita	8	5,3	2,5 – 12,2
Calcita	4	8,2	5,8 -12,2
Clínquer	3	4,2	1,4 – 8,8
Matéria- prima para cimento	35	11,7	3,6 – 27,4
Argila	4	4,8	3,7 – 6,1
Resíduo cobre-níquel	3	6,3	5,7 – 7,2
Minério cobre-níquel	3	14,1	10,7 – 17,4
Minério cobre	227	12,4	1,8 – 40,2
Minério cobre-prata	4	16,0	13,0 – 18,8
Coral	3	8,6	7,9 – 9,5
Diorito	11	20,1	13,3 – 27,3
Dolomita	24	12,8	5,4 – 31,4
Ferro-cromo	13	9,5	1,9 – 24,5

(Continua)

Material	Nº de testes	Média	Limite
Ferro-manganês	6	4,8	3,2 – 9,0
Ferro-sílica	6	7,1	3,3 – 9,0
Greda	3	1,3	0,1 – 3,3
Gabro	7	18,6	16,7 – 21,2
Gnaisse	7	15,9	8,0 – 23,7
Minério de ouro	15	17,5	3,7 – 34,2
Granito	63	15,7	6,7 – 38,0
Cascalho	11	16,7	6,9 – 26,8
Gipsita	6	6,9	4,3 – 11,7
Ilmenita	3	12,7	10,7 – 16,4
Minério de ferro (não identificado)	77	10,0	2,3 – 33,6
Hematita	64	9,6	2,0 – 29,4
Magnetita	44	10,1	2,4 – 19,2
Taconita	30	14,9	9,3 – 27,3
Minério de chumbo	4	15,5	11,0 – 21,8
Minério de chumbo-zinco	11	9,3	5,5 – 14,3
Calcário	178	11,1	3,3 – 27,6
Minério de manganês	3	5,3	0,4 – 8,9
Minério de molibdênio	24	12,5	5,8 – 18,6
Minério de níquel	8	10,1	2,1 – 19,0
Xisto oleoso	7	15,8	11,5 – 20,2
Rocha fosfática	7	3,3	0,5 – 11,7
Quartzo	11	12,8	6,8 – 22,1
Quartzito	17	12,9	5,2 – 19,1
Arenito	7	13,1	6,5 – 28,6
Xisto	6	12,5	4,1 – 23,5
Argilito	7	10,6	5,8 – 19,0
Rocha sílica	6	9,4	4,2 – 15,9
Escória	10	12,8	1,3 – 27,9
Pedermeira	8	16,9	10,4 – 27,5
Minério de estanho	3	18,0	16,6 – 19,5

(Continua)

Material	Nº de testes	Média	Limite
Rocha basáltica	95	19,0	4,9 – 55,5
Minério de zinco-chumbo	4	10,5	4,5 – 16,3
Total	1115		

Fonte: Beraldo (1987, p. 54 e 55)

Tabela 9: Fator de Ineficiência em circuito aberto (Rowland)

Controle do Produto % passantes na malha de referência (mícrons)	Fator de ineficiência
50	1,035
60	1,05
70	1,10
80	1,20
90	1,40
92	1,46
95	1,57
98	1,70

Fonte: Beraldo (1987, p. 49).

Tabela 10: Fatores de correção para a finura do material

Produto 80% Passante, em μm	Fator de Correção EF_5
70	1,01
65	1,02
60	1,03
55	1,04
53 (270 mesh)	1,04
50	1,05
45 (325 mesh)	1,07
40	1,10
38 (400 mesh)	1,11
35	1,13
30	1,17
26 (500 mesh)	1,22
25	1,23
20	1,32
15	1,47
10	1,82

Fonte: Metso, 2005 *apud* OLIVEIRA (2012, p. 46).