



EMILY DOS ANJOS ROCHA FREIRE

**DESENVOLVIMENTO DE UMA METODOLOGIA PARA
MEDIÇÃO DE CARGA MOEDORA EM MOINHOS
TUBULARES EM UMA REFINARIA DE ALUMINA**

São Luís
2019

EMILY DOS ANJOS ROCHA FREIRE

**DESENVOLVIMENTO DE UMA METODOLOGIA PARA
MEDIÇÃO DE CARGA MOEDORA EM MOINHOS
TUBULARES EM UMA REFINARIA DE ALUMINA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Química do Centro de Ciências Exatas e Tecnologia da Universidade Federal do Maranhão, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Graduação em Engenharia Química.

Orientador: Prof. Dr. Wendell Ferreira de La Salles

São Luís
2019

Ficha gerada por meio do SIGAA/Biblioteca com dados fornecidos pelo(a) autor(a).
Núcleo Integrado de Bibliotecas/UFMA

Freire, Emily dos Anjos Rocha.

DESENVOLVIMENTO DE UMA METODOLOGIA PARA MEDIÇÃO DE
CARGA MOEDORA EM MOINHOS TUBULARES EM UMA REFINARIA DE
ALUMINA / Emily dos Anjos Rocha Freire. - 2019.

58 f.

Orientador(a): Wendell Ferreira de La Salles.

Curso de Engenharia Química, Universidade Federal do
Maranhão, São Luís, MA, 2019.

1. Corpo moedor. 2. Medição. 3. Moagem. 4.
Potência. I. Salles, Wendell Ferreira de La. II. Título.

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. WENDELL FERREIRA DE LA SALLES
Orientador – DETE/CCET/UFMA

Prof. Dr. JAIVER EFREN JAIMES FIGUEROA
DEEQ/CCET/UFMA

Prof. Dr. HARVEY ALEXANDER VILLA VELEZ
DEEQ/CCET/UFMA

16 de dezembro de 2019

DADOS CURRICULARES

Emily dos Anjos Rocha Freire

NASCIMENTO 21/10/1995 – SÃO LUÍS / MA

FILIAÇÃO André Anderson Cruz Freire
Helenice Silva dos Anjos Freire

2014/2019 Curso de Graduação
Engenharia Química - Universidade Federal do Maranhão

Dedico este trabalho aos meus pais e avós que me deram apoio e direcionamento nessa jornada acadêmica.

AGRADECIMENTOS

Acima de tudo e em primeiro lugar agradeço a Deus, razão de tudo e de todos nós.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Wendell de La Salles, pelo incentivo, orientação e auxílio.

Aos professores, Jaiver Figueroa e Harvey Alexander, que aceitaram de prontidão ao meu convite para participar da avaliação deste trabalho.

A minha mãe, Helenice, por zelar pelo nosso lar e por dar o melhor de si em todas as circunstâncias.

Ao meu pai, André, que provê o sustento de nossa família e por dar suporte para a minha jornada acadêmica.

Aos meus avós pelas orações, amor e por me direcionar com sabedoria e carinho.

Aos meus amigos, Flaudiner, Júlio, Máira e tantos outros pelo compartilhamento de momentos de felicidade e de aprendizado durante a desafiadora jornada acadêmica.

Ao meu amor, Tiago, por sempre estar do meu lado nos momentos em que mais preciso, compartilhando seu amor, carinho e compreensão.

Aos meus amigos de empresa, Carla Vasconcelos, Denyse Gaspar, João Sekeff, Raimundo Moraes, Shadao Kato, Zilmara Zamyła e Yaucha Vieira que estiveram do meu lado durante todo o desenvolvimento do trabalho me ajudando com informações e análises.

Aos engenheiros Luiz Rocha, Danielle Lopes, José Carlos Vieira, François Santana, Luiz Brito e Chris Phillips pela troca de experiências, por me concederem a experiência profissional e ferramentas necessárias para o desenvolvimento do projeto.

“Quase 100% da inovação é inspirada não por análises de mercado, mas por pessoas insatisfeitas com o estado atual das coisas.”

Tom Peters

FREIRE, EMILY DOS ANJOS ROCHA. **Desenvolvimento de uma metodologia para medição de carga moedora em moinhos tubulares em uma refinaria de alumina**. 2019. 58 f. Trabalho de Conclusão de Curso de Engenharia Química do Centro de Ciências Exatas e Tecnologia da Universidade Federal do Maranhão, São Luís, 2019.

RESUMO

A moagem é uma operação unitária cujo objetivo é aumentar a área superficial do material até uma granulometria especificada. A cominuição do material é possível devido à presença de cargas moedoras no interior do moinho, as quais podem ser em formato esférico, cilíndricos, entre outros. No decorrer do tempo de operação do moinho, as cargas se desgastam e necessitam ser repostas para garantir a eficiência da moagem. Para garantir a reposição dos corpos moedores é necessário medir o volume dos mesmos no interior do moinho. No entanto, alguns métodos para medição exigem a parada do moinho e a entrada no mesmo, expondo o colaborador à um espaço confinado. Para esse fim, foi desenvolvido um método indireto que mede a quantidade de carga moedora no moinho de acordo com a potência de operação do mesmo. Dessa forma é possível calcular a recarga de corpos moedores ao estabelecer um alvo de fração de enchimento e a partir de uma curva que relaciona carga moedora e potência atual para cada tipo de moinho. Os resultados obtidos após a aplicação da metodologia revelam uma melhora no desempenho da moagem, devido ao atingimento do alvo de porcentagem retida acumulada na malha +24 Mesh (menor que 10% para os moinhos de barras e menor que 3,5% para os moinhos compartimentados). Além disso, devido a implantação da metodologia houve o reestabelecimento da potência de operação, sendo, 1,87 MW para os moinhos de barras e 1,43 MW para os moinhos compartimentados.

Palavras-chave: Moagem. Corpo Moedor. Medição. Potência.

FREIRE, EMILY DOS ANJOS ROCHA. **Development of a methodology for measuring grinder load in tubular mills in an aluminum refinery.** 2019. 58 f. End-of-course Paper of Chemical Engineering of the Exact Sciences and Technology Center of the Federal University of Maranhão, São Luís, 2019.

ABSTRACT

Milling is an unit operation, which purpose is to increase the surface area of the material until it reaches a specified particle size. The material brake is possible due to the presence of loads within the mill with spherical, cylindrical and others formats. As mill run time progresses, the loads wear out and need to be reloaded to ensure grinding efficiency. To guarantee replacement of the grinding bodies, it is necessary to measure their volume inside the mill. However, some methods require a mill stop and its entrance, exposing the operational team to a confined space. Due to this, an indirect method was developed, that measures the amount of grinding load in the mill according with the mill's operating power. In this way, it is possible to calculate the grinding body recharge by establishing a fill fraction target and from a curve, which relates grinding load and current power for each type of mill. The results obtained after the application of the methodology revealed an improvement in grinding performance due to reaching the retained percentage target accumulated in the +24 mesh (less than 10% for rod mills and less than 3.5% for mills compartmentalized). In addition, due to the implementation of the methodology, the operating power was restored, with 1.87 MW for rod mills and 1.43 MW for compartmentalized mills.

Keywords: Milling. Grinder Body. Measurement. Power.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1– Diagrama de blocos do processo de produção da alumina	4
Figura 2– Fluxograma simplificado da clarificação	5
Figura 3- Circuitos fechados de cominuição direto e inverso	7
Figura 4- Exemplo de compressão das partículas ocasionada pela ação das barras.....	8
Figura 5– Movimento de rotação das bolas no interior do moinho.....	9
Figura 6 – Potência da carga de bolas	13
Figura 7– Relação entre a potência, carga e taxa de alimentação do moinho	15
Figura 8– Ataque por pite em bola de ferro fundido branco de alto cromo	16
Figura 9 – Curva da potência (MW) versus Carga do moinho de barras (ton)	23
Figura 10 - Curva da potência (MW) <i>versus</i> Carga do moinho de barras (ton) modificada para atender ao ajuste linear.	23
Figura 11- Curva da potência (MW) <i>versus</i> Carga do moinho na câmara de barras (ton).....	25
Figura 12- Curva da potência (MW) <i>versus</i> Carga do moinho na câmara de barras (ton) modificada para atender o ajuste linear.	26
Figura 13- Curva da potência (MW) <i>versus</i> Carga do moinho na câmara de bolas (ton).....	27
Figura 14- Curva da potência (MW) <i>versus</i> Carga do moinho na câmara de bolas (ton) modificada para atender o ajuste linear.	28
Figura 15 - Potência do a) Moinho 1 e b) Moinho 2 ao longo do tempo	30
Figura 16- Potência do a) Moinho 3 e b) Moinho 4 em relação ao tempo.....	31
Figura 17 - Resultados de massa acumulada na malha +24 Mesh durante o período de 01-2017 à 02-2019 na saída dos moinhos a) 1 e b) 2	32
Figura 18– Média do fluxo de bauxita para os moinhos a) 1 e b) 2 para o período de 03-2018 a 02-2019.....	33
Figura 19– Densidade da pasta no Moinhos 1 e 2.....	34
Figura 20- Resultados de porcentagem retida acumulada na malha +24 Mesh durante o período de 01-2017 à 02-2019 na saída dos moinhos a)3 e b) 4	35
Figura 21- Concentração de sólidos dos Moinhos 3 e 4.....	36
Figura 22- Média do fluxo de bauxita para os moinhos a) 3 e b) 4 para o período de 03-2018 a 02-2019.....	36
Figura 23– Desvio padrão dos resultados de Porcentagem retida acumulada na malha +24 Mesh dos moinhos a) 1, b) 2, c) 3 e d) 4.	37

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Fração de velocidade crítica para moinhos de barras e bolas de diferentes diâmetros.	14
Tabela 2 – Dados técnicos dos moinhos.....	18
Tabela 3 - Relação entre potência, fração de enchimento e carga de corpos moedores para moinhos tubulares de barras.	22
Tabela 4 - Relação entre potência, fração de enchimento e carga de corpos moedores (barras) para moinhos tubulares compartimentados.	25
Tabela 5- Relação entre potência, fração de enchimento e carga de corpos moedores (bolas) para moinhos tubulares compartimentados	27
Tabela 6 - Desgaste de corpo moedor entre recargas de barras no Moinhos 1 e 2.....	38

LISTA DE SÍMBOLOS

α	Fração retida
$1 - \alpha$	Fração não retida
α_{ac_r}	Fração acumulada retida
$1 - \alpha_{ac_r}$	Fração acumulada de finos
E	Energia aplicada a uma massa unitária de minério
K	Constante dependente do material moído aplicada nas leis de cominuição
n	Constante dependente do material moído aplicada nas leis de cominuição
D_p	Diâmetro das partículas (m)
D_1	Diâmetro da partícula na alimentação (m)
D_2	Diâmetro da partícula no produto (m)
WI	<i>Work Index</i> -Índice de trabalho (kWh/st)
P_{80}	Diâmetro em que passam 80% da massa do produto (μm)
F_{80}	Diâmetro em que passam 80% da massa da alimentação (μm)
Q	Altura da base de repouso do corpo moedor até o topo do moinho (m)
D	Diâmetro do moinho (m)
J_i	Fração de enchimento da carga
C	Carga de corpos moedores (ton)
L	Comprimento da câmara do moinho (m)
ρ_{ap}	Densidade aparente da carga (ton/m^3)
d	Diâmetro máximo das bolas (ft)
V_c	Velocidade crítica do moinho (rpm)
fV_c	Fração de velocidade crítica (adimensional)
P/C	Potência/Massa de corpo moedor (MW/ton)
d_b	Diâmetro das novas bolas (in)
V_i	Volume interno do moinho (m^3)
Φ	Porosidade do leito de corpo moedor (adimensional)
Δ_R	Quantidade de corpo moedor a ser recarregada (ton)
X_i	Porcentagem retida acumulada na malha +24 Mesh (adimensional)
C_x	Carga de corpos moedores após a última recarga (ton)
C_{x-n}	Carga de corpos moedores antes da recarga na presente data ("x") (ton)
n_d	Dias entre as recargas (dia)

SUMÁRIO

FOLHA DE APROVAÇÃO.....	iii
DADOS CURRICULARES.....	iv
DEDICATÓRIA.....	v
AGRADECIMENTOS.....	vi
EPÍGRAFE.....	vii
RESUMO.....	viii
ABSTRACT.....	ix
LISTA DE FIGURAS.....	x
LISTA DE TABELAS.....	xi
LISTA DE SÍMBOLOS.....	xii
SUMÁRIO.....	xiii
1 INTRODUÇÃO	1
2 OBJETIVOS	3
2.1 Objetivo geral	3
2.1 Objetivos específicos	3
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
3.1 Breve descrição do Processo Bayer.....	4
3.2 Circuitos de moagem.....	6
3.3 Mecanismo de fratura	8
3.4 Caracterização granulométrica de materiais heterogêneos.....	9
3.5 Teorias da cominuição.....	10
3.5.1 1ª Lei da Cominuição	10
3.5.2 2ª Lei da Cominuição	11
3.5.3 3ª Lei da cominuição	11
3.6 Parâmetros de operação	12
3.6.1 Carga de bolas e barras.....	12
3.6.2 Velocidade crítica	13
3.6.2 Potência	14
3.7 Desgaste de corpo moedor.....	15
3.8 Métodos de medição de carga moedora	17
4 METODOLOGIA.....	18
4.1 Local da pesquisa.....	18

4.2 Instrumentos/equipamentos/software utilizados	18
4.2.1 <i>Softwares</i>	18
4.3 Análises, métodos e procedimentos experimentais	18
4.3.1 Cálculo de recarga de corpos moedores	18
4.3.2 Potência após as recargas	19
4.3.3 Porcentagem Retida Acumulada na Malha +24 Mesh	20
4.3.4 Avaliação do desgaste de corpo moedor	20
4.4 Análise estatística	21
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	22
5.1 Cálculo da recarga de corpos moedores em moinhos tubulares	22
5.1.1 Moinhos tubulares de barras (moinhos 1 e 2).....	22
5.1.2 Moinhos tubulares compartimentados de barras e bolas (moinhos 3 e 4).....	24
5.2 Potência após as recargas	30
5.2.1 Moinhos de barras 1 e 2.....	30
5.2.2 Moinhos compartimentados de barras e bolas 3 e 4.....	31
5.3 Porcentagem retida acumulada na malha +24 Mesh	32
5.3.1 Moinhos 1 e 2	32
5.3.2 Moinhos 3 e 4	35
5.4 Avaliação do desgaste de corpo moedor	37
6 CONCLUSÃO.....	39
7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	40
REFERÊNCIAS	41

1 INTRODUÇÃO

A moagem é uma operação unitária muito utilizada no tratamento de minérios com o objetivo de reduzir a granulometria, para assim, facilitar a extração do composto de interesse em uma etapa posterior. A cominuição do material só é possível devido a adição de cargas moedoras no interior do moinho, as quais promovem a “quebra” do minério por abrasão, atrito e impacto.

As cargas moedoras geralmente são bolas ou barras (CHAVES, 2012) e devido ao desgaste, precisam ser repostas regularmente a fim de manter a eficiência da moagem, bem como, a granulometria no alvo.

Existem alguns métodos convencionais que determinam a quantidade de corpo moedor presente no moinho a ser recarregado utilizando-se de medições internas (ARAÚJO, 2011). No entanto, esses métodos exigem a presença de uma ou mais pessoas no interior do moinho, além da parada para a realização dessa atividade por mais tempo.

De forma geral, a carga não é medida com precisão e de maneira rápida e segura dentro do moinho utilizando instrumentos convencionais. Além disso, obter uma superfície ideal para a medição (plana e bem distribuída) é dificultoso.

Existem algumas indústrias que adotam *scanners* baseados em tecnologia laser aplicados para modelagem de superfícies terrestres, como a topografia de galerias subterrâneas, contudo, esta alternativa ainda apresenta um custo elevado.

Na Refinaria de alumina, onde o presente estudo foi desenvolvido, a atividade de adentrar o moinho imediatamente após a sua parada torna-se de certa forma perigosa devido a presença de licor cáustico nos mesmos pelo uso da moagem úmida. Além disso, a parada do equipamento por mais tempo implica em perda de produção dificultando a recuperação máxima da alumina.

Por isso, é importante adotar um método que elimine o fator perda de produção e insegurança para a operação durante a atividade de reposição de corpos moedores, e que possa assim, prever a quantidade de reposição sem a necessidade de adentrar ao moinho.

Nesse contexto, a formulação de medidas indiretas de carga moedora, sendo algumas dessas propostas por Rowland (1969), serve como uma poderosa ferramenta para prever a recarga do moinho e garantir a excelente performance da moagem.

Nos tópicos seguintes, é descrita em detalhes uma aplicação dessa metodologia, em um caso particular de moinhos de barras e moinhos compartimentados barras/bolas em uma refinaria de alumina.

O trabalho foi dividido em sete tópicos. Neste primeiro, apresentou-se uma introdução geral sobre a cominuição de materiais, bem como, o cenário atual de medição de carga moedora e algumas dificuldades encontradas nessa atividade, justificando a necessidade de se buscar outros métodos para a medição.

A seção dois descreve os objetivos do trabalho, delimitando a sua essência.

A seção três apresenta os aspectos teóricos e revisão da bibliografia relacionados aos processos de quebra do material, parâmetros de operação do moinho e alguns métodos atuais de medição de carga moedora.

Na seção quatro apresenta-se a metodologia empregada para o desenvolvimento do trabalho, descrevendo o processo de obtenção de dados para todos os moinhos analisados.

Na seção cinco apresenta-se e discute-se os resultados obtidos nesse estudo.

Na seção seis são apresentadas as conclusões

Na seção sete as sugestões para trabalhos futuros são apresentadas.

2 OBJETIVOS

Pretende-se demonstrar com o desenvolvimento desse trabalho a viabilidade da aplicação de uma metodologia para prever a quantidade de recarga de corpos moedores em moinhos tubulares sem a necessidade de se adentrar ao equipamento, prezando assim, pela segurança da operação.

2.1 Objetivo Geral

Desenvolver uma metodologia para determinar, de forma indireta, a quantidade de corpos moedores a serem recarregados nos moinhos tubulares em uma refinaria de alumina.

2.1 Objetivos específicos

- Reduzir a variabilidade da porcentagem de massa retida acumulada do produto de bauxita na malha +24 Mesh;
- Alcançar o alvo de potência de operação após a recarga de 1,87MW nos moinhos de barras e de 1,43MW nos moinhos compartimentados;
- Predizer o desgaste de corpo moedor;
- Obter uma relação entre carga de corpo moedor e potência para cada moinho;
- Comparar a performance da moagem com outros parâmetros de processo como, densidade e fluxo de bauxita.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Breve descrição do processo Bayer

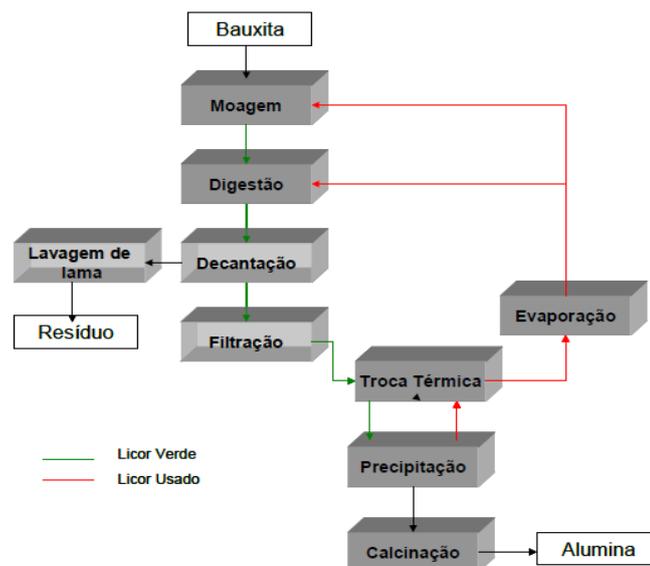
Devido a não ocorrência do alumínio metálico no meio ambiente, faz-se uso do processamento químico do minério de bauxita, o qual contém óxido de alumínio (Al_2O_3) para assim obter o alumínio metálico.

Em 1888, Karl Josef Bayer desenvolveu e patenteou um processo de refino da bauxita que ficou conhecido como “Processo Bayer” (HIND; BHARGAVA; GROCOTT, 1999).

A obtenção da alumina (Processo Bayer) pode ser esquematizada conforme a Figura 1. Primeiramente, a bauxita vinda do pátio é descarregada em silos de armazenagem, para então, através de correias transportadoras, ser descarregada nos moinhos de barras/bolas juntamente com uma quantidade de licor cáustico (licor usado) para garantir a moagem úmida (VELOSO, 2007).

Nessa primeira etapa ocorre a cominuição da bauxita, ou seja, o processo de quebra da partícula sólida por meio do atrito e impacto com os corpos moedores presentes nos moinhos. Esse processo acontece por via úmida à uma concentração de sólidos especificada para garantir a máxima performance da moagem.

Figura 1– Diagrama de blocos do processo de produção da alumina



Fonte: Veloso (2007).

Em seguida, a pasta segue para a etapa da Digestão (extração da alumina), onde as condições de processo (concentração, temperatura e pressão) variam de acordo com as propriedades do minério. Segundo Silva Filho, Alves e da Motta (2007) apud Wao (2019), as plantas comumente operam em temperaturas entre 200°C e 240°C e pressão em torno de 30 atm.

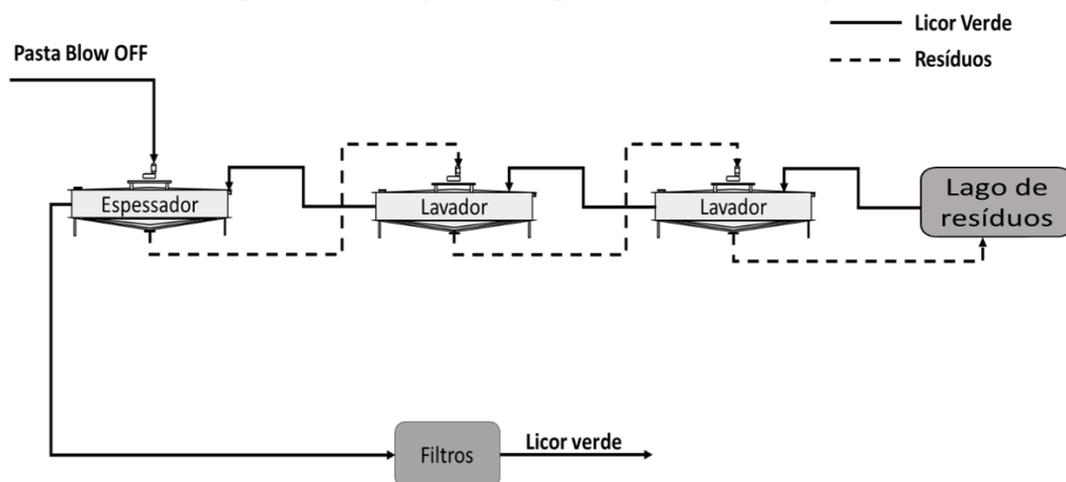
Ruys (2019) faz duas classificações dos tipos de operação da digestão de acordo com as características da bauxita, os quais podem ser classificados em:

1. Baixa temperatura (~150°C) para bauxitas do tipo gibbsita, $\text{Al}(\text{OH})_3$;
2. Alta temperatura (>240°C) para bauxitas com concentração maior que 6% de boemita ou diáspora, $\text{AlO}(\text{OH})$.

O tempo de residência é de aproximadamente 30 minutos, tempo suficiente para solubilizar toda a alumina disponível e obter o aluminato de sódio em alta temperatura e pressão, conforme Equação (1) (VELOSO, 2007).



Figura 2– Fluxograma simplificado da clarificação



Fonte: Próprio autor (2019).

Assim, têm-se uma solução com alta concentração de aluminato de sódio, porém, tem-se também resíduos de bauxita, os quais são denominados de lama (TORRES, 2001). Logo, o licor verde é resfriado até cerca de 100°C em tanques flashes para que no processo de decantação, compostos como óxido de ferro possam ser removidos (RUYS, 2019).

O objetivo da decantação/espessamento é adensar o resíduo aumentando ainda mais o conteúdo de sólidos para recuperar o máximo possível de aluminato de sódio “puro” que seguirá do *overflow* do espessador para a próxima etapa, a filtração (Ver Figura 2). Além disso, é

comum a utilização de polímeros (hidroxamatos e poliacrilamida) para garantir a floculação e acelerar o processo de decantação (SILVA FILHO; ALVES; DA MOTTA, 2007).

A lama é extraída do fundo dos espessadores e segue para uma cadeia de lavadores, cujo objetivo é recuperar o máximo possível de aluminato de sódio e soda cáustica da lama antes que a mesma possa prosseguir para o lago de resíduos (VELOSO, 2007).

Na filtração, o objetivo é remover as partículas sólidas e finas do resíduo de bauxita que não sedimentaram nos espessadores. Este resíduo é separado da solução em filtros de pressão do tipo Kelly onde a torta formada é ainda lavada e a solução da lavagem misturada com o filtrado desse processo (TORRES, 2001).

De acordo com Torres (2001), após a filtração, o licor verde segue para tanques “flash”, onde o aluminato de sódio é resfriado por expansão a vácuo. O calor liberado do flasheamento é aproveitado para pré-aquecer o licor usado que está indo no sentido da digestão e moagem.

A próxima etapa é a precipitação, que segundo Ruys (2019) ocorre em uma temperatura entre 60 à 80°C, na qual cristais de gibsite (hidróxido de alumínio) são formados com aproximadamente 1 micrômetro de tamanho. A reação é a mesma da Equação (1), no entanto, no sentido inverso.

A reação de precipitação se divide em duas fases (TORRES, 2001):

1. Aglomeração dos sólidos da semente;
2. Formação do precipitado entre as partículas destes aglomerados, resultando em aglomerados cristalizados de hidróxido de alumínio.

Após formados os cristais de alumina, essa torta segue para um forno vertical do tipo “flash” que opera com temperaturas da ordem de 1000°C na etapa da calcinação. Assim, uma alumina isenta de umidade e de alta pureza é produzida (VELOSO, 2007). Um tempo de residência de 1 hora é requerido para a transformação da gibsite em alpha alumina (RUYS, 2019).

3.2 Circuitos de moagem

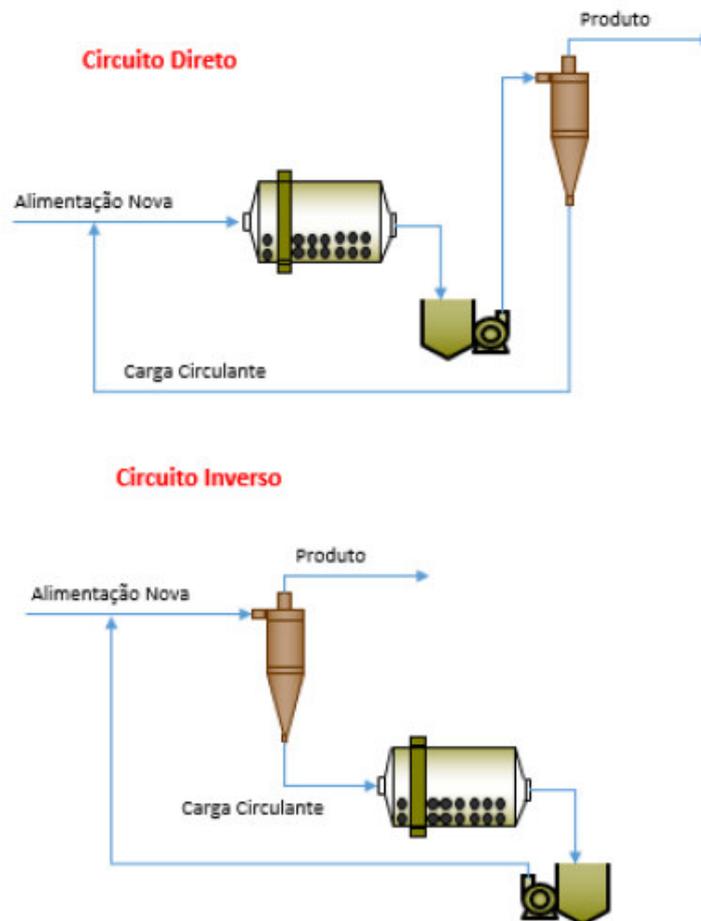
Segundo Carvalho (2015), a moagem pode ocorrer em circuito aberto ou fechado. Onde, no primeiro busca-se o produto final sem controle granulométrico exato, ou seja, sem classificação do material. A taxa do minério precisa ser baixa o suficiente para garantir que todas as partículas sofram o processo de quebra e impacto, e por consequência o tempo de residência dentro do moinho é maior.

Diferente do circuito fechado, no circuito aberto o produto da moagem segue para um equipamento de classificação (como por exemplo, os ciclones) e o material grosseiro retorna para ser processado novamente no moinho (SAIB NETO, 2011).

O circuito fechado pode ser classificado em dois grupos (SAIB NETO, 2011)

1. Direto: a alimentação do moinho é misturada junto a corrente de *underflow* do classificador;
2. Inverso: A alimentação nova é recebida no classificador, cujo *underflow* alimenta o moinho.

Figura 3- Circuitos fechados de cominuição direto e inverso



Fonte: Saib Neto (2011).

Segundo, Wills (2007), existe a possibilidade de um ganho de 35% na capacidade da moagem com a utilização do circuito fechado e como consequência reduz-se o tempo de residência das partículas e a sobremoagem, aumentando a utilização de energia.

3.3 Mecanismo de fratura

Para entender o fundamento da moagem deve-se ter conhecimento do princípio de quebra da partícula e a fundamentação científica dessa operação.

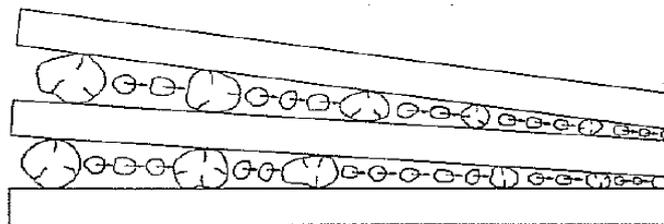
O processo de quebra da partícula se dá pelo rompimento das forças de coesão, ou seja, a quantidade de energia aplicada pelos corpos moedores deve ser suficiente para o rompimento dessas forças e ter como resultado partículas menores.

Existem três segmentos de mecanismo de fratura:

Quebra por compressão – Aplicada de forma lenta, ocorre quando a força da resistência da partícula é menor que a força aplicada pelo corpo moedor, assim, com o surgimento da fratura o esforço é aliviado. Esse tipo de quebra resulta em partículas de diâmetros maiores, sendo mais comum em britadores de mandíbulas, giratórios, cônicos e em moinhos quando a partícula é comprimida entre dois ou mais corpos, ou em partículas maiores, como por exemplo em moinhos de barras (BERALDO, 1987).

Nos moinhos de barras o minério é quebrado entre as barras e devido ao peso das mesmas ser maior do que o peso das partículas, as primeiras tendem a “comprimir” as partículas. As partículas mais próximas à alimentação do moinho são maiores e tem a função de abrir os espaços entre as barras e à medida que a partícula diminui de tamanho prossegue deslizando para próximo à saída do moinho, afunilando o perfil das barras como mostra na Figura 4 (CHAVES, 2012).

Figura 4- Exemplo de compressão das partículas ocasionada pela ação das barras

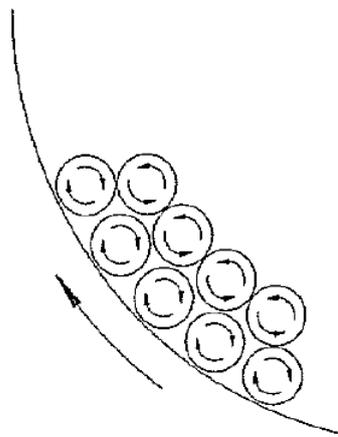


Fonte: Chaves (2012, p. 224).

Quebra por impacto – A quebra por impacto, Segundo Beraldo (1987), ocorre quando a força é aplicada de forma rápida e em intensidade muito superior a resistência da partícula. Isso acontece geralmente na queda das bolas e barras proporcionada pelo movimento rotacional do moinho resultando assim numa distribuição granulométrica mais fina.

Quebra por abrasão - É visto como um fenômeno de superfície, o qual resulta quando duas partículas se movimentam paralelamente ao seu plano de contato (NAPIER-MUNN *et al.*, 1999). Chaves (2012) ilustra esse tipo de operação de maneira mais detalhada na Figura 5, onde observa-se o comportamento de rotação das bolas que devido ao atrito com o minério causa toda a geração de aumento da área superficial. Comportamento similar pode ser atribuído aos moinhos de barras.

Figura 5– Movimento de rotação das bolas no interior do moinho



Fonte: Chaves (2012, p. 214).

3.4 Caracterização granulométrica de materiais heterogêneos

A análise granulométrica consiste em determinar as dimensões das partículas que compõem as amostras e analisar estatisticamente essa informação. Ou seja, determina-se as dimensões das partículas individuais e estuda-se a sua distribuição, quer pelo peso de cada classe dimensional considerada, quer pelo volume ou ainda pelo número de partículas em cada classe (DIAS, 2019).

Segundo Perry e Chilton (1980) a distribuição do tamanho de partículas é comumente representada na forma gráfica, pelo histograma de frequência de cada classe de diâmetro num certo intervalo ou pela frequência relativa desses diâmetros.

Para fazer essa análise estatística, o meio mais prático é passar o material sobre uma série de peneiras em sequência, com diâmetros de abertura menores, onde cada uma retém uma quantidade da amostra. As peneiras são agitadas ou vibradas mecanicamente por um certo período de tempo. Ao final da agitação são medidas as quantidades retidas em cada peneira e calculadas as frações mássicas (α) em relação a massa total da amostra (GOMIDE, 1983).

Gomide (1983) ainda faz uma descrição de como pode-se obter os resultados de frações das massas retidas e suas derivações. Sendo possível então obter uma análise da fração que passou pela peneira ($1 - \alpha$), a fração que ficou retida (α), a fração acumulada retida ($\alpha_{ac,r}$) e a fração acumulada de finos ($1 - \alpha_{ac,r}$). Sendo a $\alpha_{ac,r}$ calculada somando-se as frações retidas em cada peneira até a peneira em questão.

3.5 Teorias da cominuição

Os processos de cominuição foram amplamente estudados por muito anos e alguns teóricos, como o que serão citados posteriormente, desenvolveram algumas relações que explicam a energia consumida no processo da moagem.

Foi então observado experimentalmente que a relação entre a variação de diâmetro da partícula e a energia consumida no processo de moagem é inversamente proporcional a uma função potência de diâmetro (BERALDO, 1987), como representado na Equação 2.

$$dE = -K \frac{dD_p}{D_p^n} \quad (2)$$

Sendo:

E – Energia aplicada a uma massa unitária de minério

K e n – Constantes dependentes do material

D_p – Diâmetro das partículas

3.5.1 1ª LEI DA COMINUIÇÃO

Segundo o austríaco Von Rittinger (1867) a energia consumida durante a cominuição e o incremento de superfície específica gerada por redução de tamanho é diretamente proporcional à nova superfície gerada.

Se fizermos $n = 2$ na Equação (2) e integrarmos entre os valores de D_1 e D_2 resulta a Equação (3).

$$E = K \left(\frac{1}{D_2} - \frac{1}{D_1} \right) \quad (3)$$

Para a aplicação da 1ª Lei da cominuição deve-se considerar que a moagem é realizada por cisalhamento e que os fragmentos mantêm as mesmas formas das partículas originais. Além disso, a lei de Von Rittinger (1867) se aplica melhor em moagem fina e os resultados são melhores obtidos quando considera-se a média superficial dos diâmetros (GOMIDE, 1983).

3.5.2 2ª LEI DA COMINUIÇÃO

Essa teoria foi desenvolvida por Kick e considerou que a energia utilizada na fratura de um corpo que seja homogêneo, isotrópico e sem falhas era a necessária para deformar o sólido até seu limite de ruptura, desprendendo energia adicional para produzir ruptura do mesmo (KICK, 1885 apud ALVES, 2006).

Se igualarmos $n = 1$ na Equação (2) e integrarmos entre os valores de D_1 e D_2 , a relação pode ser representada como na Equação (4).

$$E = K \ln \left(\frac{D_1}{D_2} \right) \quad (4)$$

Essa lei estabelece que a energia consumida na cominuição depende apenas da relação de redução, sendo independente da granulometria original (BERALDO, 1987).

3.5.3 3ª LEI DA COMINUIÇÃO

Em 1952, após vários estudos experimentais Bond (BOND, 1952) chegou à conclusão que existia uma relação inversamente proporcional entre o consumo específico de energia do processo de redução e a raiz quadrada do tamanho da partícula.

Se igualarmos $n = 1,5$ na Equação (2) e integramos entre os valores de D_1 e D_2 a relação pode ser representada como na Equação (5), conhecida como Lei de Bond.

$$E = 10WI \left(\frac{1}{\sqrt{D_2}} - \frac{1}{\sqrt{D_1}} \right) \quad (5)$$

Após sua formulação e, devido ao fato de levar a resultados ajustados aos reais, a Lei de Bond passou a ser amplamente utilizada na seguinte expressão:

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

Sendo:

P_{80} – Diâmetro, em microns, em que passam 80% da massa do produto;

F_{80} – Diâmetro, em microns, em que passam 80% da massa da alimentação;

WI – Work Index (kWh/st)

O Work Index, é um parâmetro que exprime a resistência do material à cominuição. Numericamente é definido como o trabalho necessário (em kWh) para reduzir a unidade de peso (tonelada curta - short ton, st = 907 kg) do minério em estudo, desde o tamanho infinito ($d = \infty$) até o tamanho final ($d_{80} = 100 \mu\text{m}$).

3.6 Parâmetros de operação

3.6.1 CARGA DE BOLAS E BARRAS

A carga de bolas presente no moinho irá influenciar no consumo energético do mesmo, bem como, a potência de operação. Normalmente, a quantidade de bolas e barras é determinada de acordo com os parâmetros técnicos do moinho.

Deve-se medir a altura da base de repouso do corpo moedor até o topo do moinho (Q), bem como, o diâmetro do moinho (D) para estimar a fração de volume de carga (J_i) dentro do equipamento. Bond (1961) apresenta essa relação na Equação (7).

$$J_i = 1,13 - 1,26 \frac{Q}{D} \quad (7)$$

É importante salientar que a medição da carga por esse método exige a entrada no interior do moinho durante sua parada para a realização das medições internas.

Segundo Beraldo (1987), a massa em quilogramas de corpos moedores é calculada pela Equação (8).

$$C = 0,785D^2L\rho_{ap}J_i \quad (8)$$

Sendo:

C – Carga de corpos moedores (ton)

D - Diâmetro médio do moinho interno ao revestimento (metros)

L – Comprimento da câmara do moinho (metros)

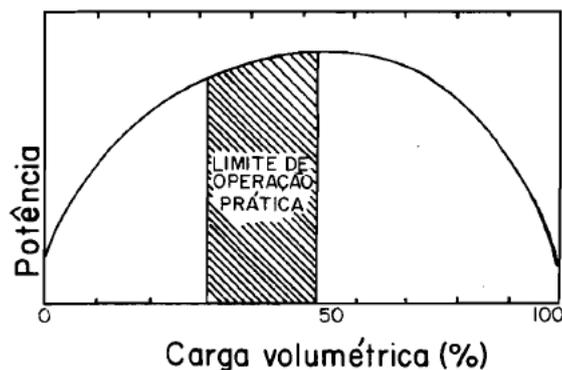
ρ_{ap} – Densidade aparente da carga em (ton/m³)

J_i – Fração do volume da carga

Percebe-se na Figura 6, que a fração do volume de carga/carga volumétrica (%) influencia no consumo energético do moinho e que o comportamento da potência aumenta com o acréscimo da carga volumétrica até um certo valor, após, a potência decresce com o aumento da carga.

Portanto, estima-se um limite de operação de carga volumétrica de bolas para moinhos de diafragma até 50%, os do tipo overflow não ultrapassam 45% e os de barras são limitados a 40% (BERALDO, 1987).

Figura 6 – Potência da carga de bolas



Fonte: Beraldo (1961, p. 41).

Para Rowland e Kjos (1969) as cargas usuais para as barras são de 35% a 40% podendo chegar até 45%.

3.6.2 VELOCIDADE CRÍTICA

A fim de entender o conceito de velocidade crítica deve-se caracterizar o movimento dos corpos moedores no interior do moinho. No decorrer da rotação do moinho em baixa velocidade, os corpos moedores são arrastados pela carcaça até uma certa altura de onde rolam sobre o revestimento e uns sobre os outros, esse movimento chama-se de cascadeamento (CHAVES, 2012).

Aumentando ainda mais a rotação, a carga é direcionada contra a carcaça do moinho e fica estacionária em relação a esta. Quando esse comportamento ocorre, significa que o

moinho está na sua velocidade crítica (NAPIER-MUNN *et al.*, 1999). Ou seja, a partir daquela velocidade a eficiência da moagem é prejudicada, pois a “força centrífuga” impedirá a ocorrência dos três mecanismos essenciais de fratura: compressão, impacto e abrasão.

A velocidade crítica (V_c) pode ser calculada segundo a Equação (9) (BOND, 1961):

$$V_c = \frac{76,6}{\sqrt{D-d}} \quad (9)$$

Sendo:

V_c – Velocidade crítica (rpm)

D – Diâmetro interno do moinho (ft)

d - Diâmetro máximo das bolas (ft)

Deve-se evitar a operação nessa velocidade, por isso, alguns autores propõem trabalhar à uma fração da mesma. Como exemplo, Rowland e Kjos (1969) recomendam as seguintes frações de velocidade crítica (fV_c) de operação, como apresentado na Tabela 1.

Tabela 1 – Fração de velocidade crítica para moinhos de barras e bolas de diferentes diâmetros.

Diâmetro interno	Fração de velocidade crítica (%)			
	Barras	Bolas	Multicâmara (bolas e barras)	Multicâmara (barras e bolas)
0,91 – 1,83	76-73	80-78	78-75	75-72
1,83 – 2,74	73-70	78-75	75-72	72-70
2,74 – 3,66	70-67	75-72	72-70	70-68
3,55 - 4,57	67-64	72-69	70-68	-
4,57 – 5,49	-	69-66	-	-

Fonte: Rowland e Kjos (1969).

3.6.2 POTÊNCIA

Para o moinho de barras, apresenta-se a Equação (10) adaptada de Rowland e Kjos (1969) que expressa a relação entre a potência consumida por massa de barras.

$$\frac{P}{C} = 1,752 * D^{\frac{1}{3}} * (6,3 - 5,4 * (J_i)) * fV_c * 10^{-3} \quad (10)$$

Sendo:

D - Diâmetro do moinho (m)

fV_c - Fração de velocidade crítica

P/C – Potência/massa de barras (MW/ton)

J_i – Fração de enchimento

E para o moinho de bolas apresenta-se a Equação (11) adaptada de Rowland e Kjos (1969).

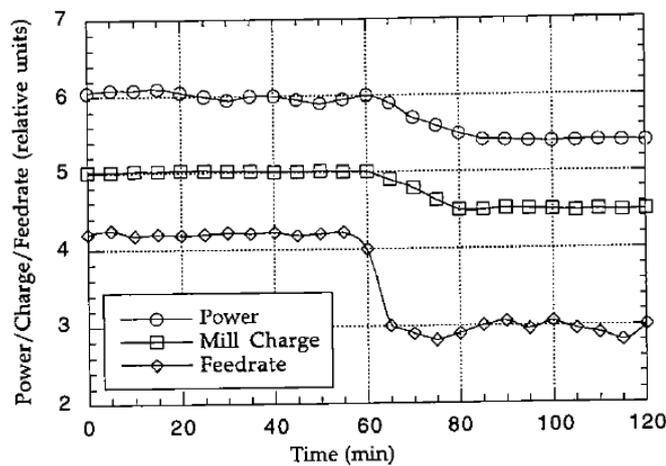
$$\frac{P}{C} = 4,879 * D^{0,3} * (3,2 - 3 * J_i) * fV_c * \left(1 - \left(\frac{0,1}{2^{9-10*J_i}}\right)\right) + 1,102 * \frac{(d_b - 12,5*D)}{50,8} * 10^{-3} \quad (11)$$

Sendo:

d_b - Diâmetro das novas bolas (in)

Napier-munn *et al.*, (1999) apresentam a relação entre a potência e algumas variáveis de operação (Figura 7). A potência do moinho sofre interferência pela mudança na taxa de alimentação, bem como, pelo decaimento da carga no moinho.

Figura 7– Relação entre a potência, carga e taxa de alimentação do moinho



Fonte: Napier-munn *et al.*, (1999).

3.7 Desgaste de corpo moedor

Considera-se que o consumo de corpos moedores é um dos principais itens de custo no processamento de minérios, tendo em vista isso, faz-se necessário a importância desse tema

no tratamento de minérios para obter o conhecimento de como os corpos moedores se deterioram.

A maior contribuição nesse tema foi dada por Bond (1961), que desenvolveu um ensaio laboratorial para medir o desgaste de um dado minério sobre um material de revestimento, onde o ensaio consiste em carregar o tambor com 400 gramas de minério na granulometria entre 1/2” e 3/4” e deixá-lo rodar por quatro períodos de 15 minutos à rotação predefinida. A placa é pesada antes e depois e o índice de abrasão é obtido como a massa perdida pela massa da peça (BOND, 1961).

Segundo Beraldo (1987), as barras devem se manterem retas durante toda a sua vida útil, por isso, a dureza das mesmas é de característica importante e são comumente de aço carbono (SAE 1090 ou 1095). As bolas são fabricadas de aço forjado, aço fundido ou de ferro fundido ligado e geralmente quanto maior a dureza, maior a vida útil das bolas.

As maneiras pelas quais o desgaste pode ocorrer são várias, dentre elas está o desgaste do metal contra metal. Ou seja, o contato entre duas bolas sem minério entre elas, por exemplo, faz surgirem áreas desgastadas (CHAVES, 2012).

Isso proporciona a maior probabilidade de ataques por pite e/ou lascamento, sendo o primeiro caracterizado por furos profundos decorrentes da corrosão do metal, como observado na Figura 8, e o segundo decorre de trincamento a partir de defeitos de fundição (rechupes).

Figura 8– Ataque por pite em bola de ferro fundido branco de alto cromo



Fonte: Cassola, Moraes e Albertin (2006).

Há também, o desgaste por riscamento quando partículas duras riscam a superfície das bolas levantando material paralelamente à direção do movimento. Além disso há também o desgaste por erosão onde o movimento das partículas finas sobre a superfície vai polindo-a e erodindo-a (CHAVES, 2012).

3.8 Métodos de medição de carga moedora

Existem na literatura alguns métodos que viabilizam a medição da carga moedora onde não exige a entrada do colaborador no equipamento, evitando assim, a exposição ao espaço confinado, atmosfera deficiente, gases tóxicos, dentre outros. Como por exemplo, Araújo e Delboni (2014) construíram um equipamento capaz de projetar coordenadas ortogonais, através de uma adequação circunferencial e polinomial, que simula em moinho parado a porcentagem do volume da carga moedora.

Esse método é de extrema significância no que tange a eliminação do risco ao espaço confinado, porém, a exigência de que o moinho esteja parado durante a medição, não viabiliza o cálculo instantâneo da quantidade de carga moedora para assim fazer a sua reposição de forma otimizada.

Pontt (2004) desenvolveu um método baseado nos sinais de processamento digitais através dos sinais elétricos do motor do moinho para o monitoramento on-line da carga moedora. O modelo ainda conta com uma boa correlação da carga medida diretamente e a carga estimada pelo modelo.

Existem alguns autores que relacionam outras variáveis com respeito a carga moedora, por assim dizer, tem-se uma acurácia na estimativa. Como por exemplo, Cleary e Owen (2018), que para estimar o volume de carga moedora, estabeleceram um conjunto de 9 equações interdependentes entre si que relacionam peso do revestimento, velocidade do moinho, potência e ângulo de movimento da carga.

Outros métodos mais avançados, como por exemplo, o encontrado no trabalho de Tang *et al.*, (2018), que mede o volume da carga moedora através dos sinais das vibrações acústicas e mecânicas também são promissores e aplicáveis. No entanto, a complexidade do método exige demanda técnica.

4 METODOLOGIA

4.1 Local da pesquisa

O presente estudo foi desenvolvido em uma refinaria de alumina na região nordeste na área de moagem de bauxita.

4.2 Instrumentos/equipamentos/softwarees utilizados

4.2.1 SOFTWARES

Para o tratamento de dados, foram utilizados os seguintes softwares:

- Excel 2016 Pacote Office 365 (Microsoft, Redmond, Washington, Estados Unidos);
- Minitab 19 (Minitab, LLC., State College, Pensilvânia, Estados Unidos)

4.3 Análises, métodos e procedimentos experimentais

4.3.1 CÁLCULO DE RECARGA DE CORPOS MOEDORES

As Equações (10) e (11) foram empregadas para fins de cálculo de potência nos moinhos em função da fração de enchimento, mantendo-se constantes as demais variáveis do processo com base nas especificações técnicas dos moinhos (conforme Tabela 2).

Tabela 2 – Dados técnicos dos moinhos

Parâmetros	Moinhos de barras	Moinhos compartimentados	
		Barras	Bolas
fV_c – Fração da velocidade crítica	68%	68%	68%
ρ_{ap} – Densidade do aço (t/m^3)	7,8	7,8	7,8
φ – Porosidade do leito	20%	20%	40%
d_b - Diâmetro das novas bolas (in)	-	-	2

Fonte: Metso (2014).

Excetuando-se a fração de enchimento, onde, buscou-se trabalhar em uma faixa de fração de enchimento proposta por Rowland e Kjos (1969), a qual é de 0% a 40%. E para cada fração de enchimento, calculou-se a carga de corpo moedor correspondente nos moinhos por meio da Equação (12), proposta por Gupta e Yan (2016), a qual é uma adaptação da Equação (8).

$$C = V_i * \rho_{ap} * J_i * (1 - \phi) \quad (12)$$

Onde:

C - Massa de carga moedora (ton)

V_i - Volume interno do moinho (m^3)

ρ_{ap} - Densidade aparente do corpo moedor (ton/m^3)

J_i - Fração de enchimento da carga (adimensional)

ϕ - Porosidade do leito de corpo moedor (adimensional)

Sendo assim, a potência foi obtida para cada quantidade de carga moedora dentro do moinho.

Relacionou-se graficamente a carga moedora no moinho e a potência, obtendo-se um modelo matemático que possibilita estimar a carga presente no moinho com base na sua potência “online”.

Estabelecendo-se uma potência operacional alvo para cada moinho é possível prever a quantidade de carga moedora a ser inserida no moinho para se reestabelecer a potência de operação.

A presente metodologia foi aplicada para quatro moinhos da refinaria, sendo, dois moinhos de barras (1 e 2) e dois moinhos compartimentados barras/bolas (3 e 4). Além disso, é importante salientar que os dados de diâmetro (D) e Volume interno (V_i) na Tabela 2 foram omitidos para preservação intelectual da empresa.

4.3.2 POTÊNCIA APÓS AS RECARGAS

Para a avaliação da potência após as recargas levantou-se um histórico de janeiro de 2017 a fevereiro de 2019 para observação do comportamento do parâmetro e analisou a tendência ao longo do período antes e após a implantação do modelo.

4.3.3 PORCENTAGEM RETIDA ACUMULADA NA MALHA +24 MESH

A empresa onde realizou-se o presente estudo verifica a qualidade da moagem a partir da observação porcentagem retida acumulada na malha +24 Mesh (X_i %). A mesma foi analisada a partir de um histórico traçado desde janeiro de 2017 a fevereiro de 2019 e analisada em gráficos de tipo BoxPlot para avaliação da amplitude do parâmetro, bem como, sua variabilidade e atendimento do alvo de X_i .

Em conjunto com a análise anterior, também foram analisados parâmetros como fluxo de alimentação e densidade da pasta, os quais, segundo Napier-munn *et al.*, (1999) são fatores que influenciam também a qualidade da moagem além das recargas de corpos moedores.

Além disso, obteve-se um histórico de médias de desvios padrões a fim de analisar a tendência da variabilidade de X_i .

É importante enfatizar que os resultados apresentados nesse trabalho foram multiplicados por um fator (número) a fim de manter-se a propriedade intelectual da empresa.

4.3.4 AVALIAÇÃO DO DESGASTE DE CORPO MOEDOR

Avaliou-se também o desgaste de corpo moedor nas recargas realizadas desde 2016 até março de 2018 de acordo com dados de potência antes e após as reposições de corpos moedores e assim foi possível calcular a carga antes e posterior a recarga de acordo com o modelo.

Dessa forma, o desgaste por dia foi calculado como a diferença entre a carga de corpo moedor após a última recarga e a carga antes da recarga da presente data dividido pelo número de dias entre as recargas, conforme Equação 13.

$$\frac{C_x - C_{x+n}}{n_d} = \text{Desgaste} \left(\frac{t}{\text{dia}} \right) \quad (13)$$

Sendo:

C_x – Carga de corpos moedores após a última recarga (ton);

C_{x-n} – Carga de corpos moedores antes da recarga na presente data (“x”) (ton);

n_d – Dias entre as recargas (dias).

4.4 Análise estatística

A curva relacionando a potência versus a carga para cada moinho foi traçada utilizando o Excel. O coeficiente de determinação (R^2) foi utilizado para avaliar a qualidade do ajuste do modelo matemático adotado.

Utilizou-se também alguns parâmetros da estatística descritiva, como média e desvio padrão e análises de BoxPlot.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Cálculo da recarga de corpos moedores em moinhos tubulares

5.1.1 MOINHOS TUBULARES DE BARRAS (MOINHOS 1 E 2)

A Equação proposta por Rowland e Kjos (1969) é a principal equação do presente método em desenvolvimento. Logo, para a obtenção de uma relação que possa prever a quantidade de corpos moedores a recarregar é necessário rearranjá-la de acordo com os parâmetros locais e condições atuais de operação.

Portanto, dada a existência da dependência da carga moedora com a fração de enchimento do moinho, buscou-se relacionar essa variável com a potência calculada pela Equação (10) e com a carga moedora, obtida pela Equação (12).

De posse das informações técnicas do moinho, variou-se a fração de enchimento até 40% em intervalos de 5%, de acordo com a Tabela 3.

Tabela 3 - Relação entre potência, fração de enchimento e carga de corpos moedores para moinhos tubulares de barras

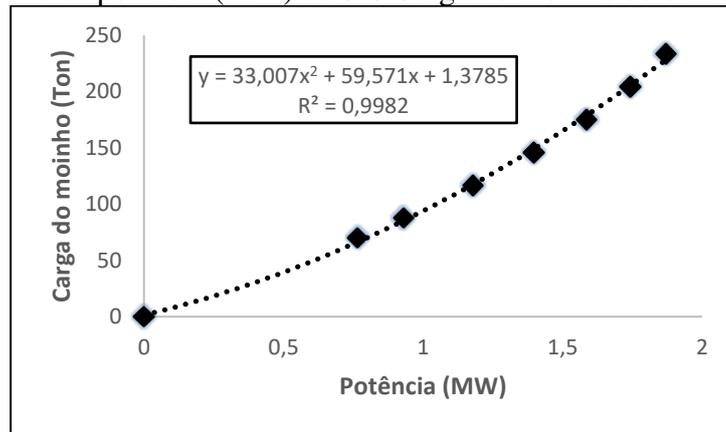
Fração de enchimento (%)	Potência (MW)	Carga dentro do moinho (ton)
0	0,00	0,0
10	0,65	58,3
15	0,93	87,5
20	1,18	116,7
25	1,40	145,8
30	1,59	175,0
35	1,74	204,2
40	1,87	233,3

Fonte: Próprio autor (2019).

De posse destes dados, foi traçado um gráfico relacionando a potência com a carga dentro do moinho. Os dados foram ajustados por meio de um modelo quadrático, conforme a Figura 9.

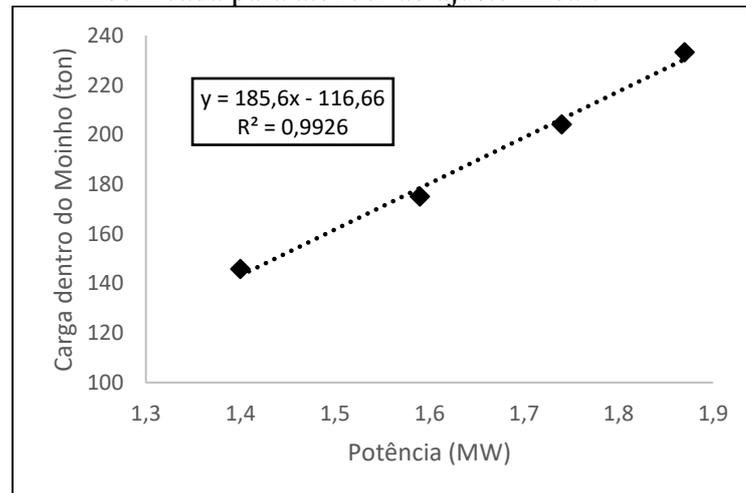
Porém, com o intuito de facilitar o tratamento dos dados, optou-se por concentrar nossa análise no intervalo de potência normalmente trabalhado na empresa (1,4 a 1,87 MW), o que possibilitou a utilização de um modelo linear, conforme apresentado na Figura 10.

Figura 9 – Curva da potência (MW) versus Carga do moinho de barras (Ton)



Fonte: Próprio autor (2019).

Figura 10 - Curva da potência (MW) versus Carga do moinho de barras (Ton) modificada para atender ao ajuste linear.



Fonte: Próprio autor (2019).

Portanto, a Equação 14, será utilizada como base para a obtenção da carga moedora dentro do Moinho de barras (1 e 2) em função da potência.

$$Cba_{1-2} = 185,6 * Pba_{1-2} - 116,66 \quad (14)$$

Onde:

Cba_{1-2} → Carga de barras dentro do moinho (Ton)

Pba_{1-2} → Potência do moinho de barras (MW)

Dessa forma, é possível a partir do conhecimento da potência “online” do moinho, conhecer a quantidade de corpo moedor presente no mesmo.

Além disso, é sabido que devido ao desgaste dos corpos moedores ao longo do tempo, naturalmente a fração de enchimento e a potência do moinho decaem, influenciando na baixa performance da moagem. Por isso, deve-se sempre manter a fração de enchimento, e conseqüentemente a potência, próximo ao alvo estabelecido para a garantia de uma boa performance da moagem.

Assim, considerando que a empresa fabricante do moinho, Metso (2014) recomenda uma fração de enchimento alvo de 40%, a qual corresponde a uma potência de 1,87 MW, de acordo com a Tabela 3, correspondendo a uma carga moedora de 233,3 toneladas.

É possível então, de acordo com o conhecimento da carga “online”, estimar a quantidade de corpo moedor a ser recarregada para se reestabelecer a potência alvo do moinho com base apenas na diferença entre a “carga alvo” e a “carga atual” no moinho.

A “carga alvo” e a “carga atual” do moinho são obtidas pelas Equações (15) e (16), respectivamente, derivadas da Equação (14).

$$C_{alvo} = 185,6 * P_{alvo} - 116,66 \quad (15)$$

Como, $P_{alvo} = 1,87 \text{ MW}$, logo,

$$C_{alvo} = 233,3 \text{ toneladas}$$

$$C_{atual} = 185,6 * P_{atual} - 116,66 \quad (16)$$

A quantidade de corpo moedor a ser recarregado no moinho é obtida pela Equação (17).

$$\Delta_R = 233,3 - C_{atual} \quad (17)$$

5.1.2 MOINHOS TUBULARES COMPARTIMENTADOS DE BARRAS E BOLAS (MOINHOS 3 E 4)

Para o cálculo de recarga dos moinhos tubulares compartimentados em barras e bolas seguiu-se a mesma linha de raciocínio do moinho de barras. No entanto, devido a diferença estrutural desses moinhos necessitou-se fazer uma consideração (a qual será mencionada posteriormente) de modo a garantir a recarga em cada compartimento (barras e bolas).

De forma equivalente a feita para o moinho de barras, relacionou-se fração de enchimento do moinho com a potência, calculada pela Equação (10), e com a carga moedora, obtida pela Equação (12).

De posse das informações técnicas do moinho, foi variada a fração de enchimento até 40% e obteve-se a carga moedora e a potência correspondente para o compartimento de barras, conforme dados apresentados na Tabela 4.

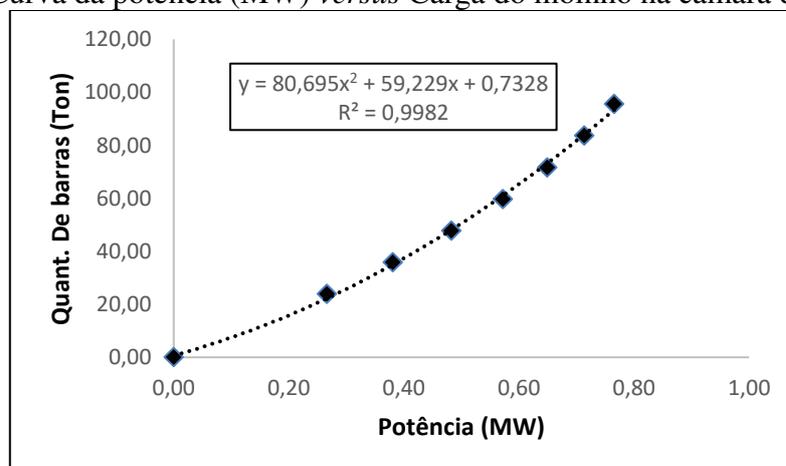
Tabela 4 - Relação entre potência, fração de enchimento e carga de corpos moedores (barras) para moinhos tubulares compartimentados.

Fração de enchimento (%)	Potência (MW)	Carga de corpo moedor (ton)
0	0,00	0,00
10	0,27	23,89
15	0,38	35,83
20	0,48	47,77
25	0,57	59,72
30	0,65	71,66
35	0,71	83,61
40	0,77	95,55

Fonte: Próprio autor (2019).

De posse destes dados, traçamos um gráfico relacionando a potência com a carga dentro do moinho. Os dados foram ajustados por meio de um modelo quadrático, conforme a Figura 11.

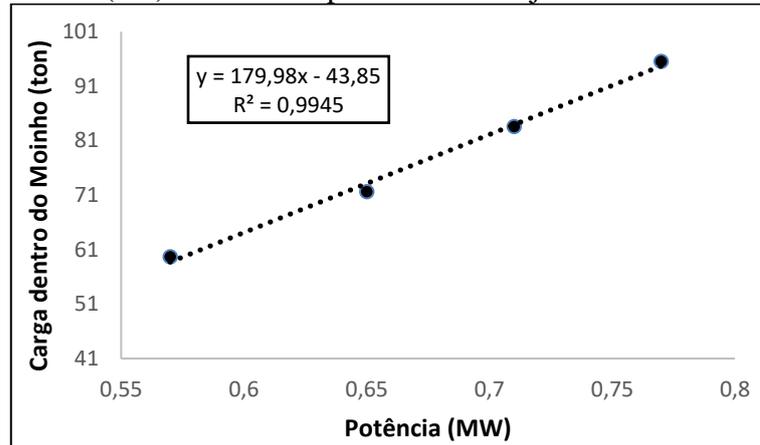
Figura 11- Curva da potência (MW) versus Carga do moinho na câmara de barras (ton)



Fonte: Próprio autor (2019).

Porém, da mesma forma que se procedeu anteriormente, optou-se por concentrar a análise no intervalo de potência correspondente à faixa de trabalho de operação usualmente adotada na empresa (0,57 a 0,77 MW), o que possibilitou a utilização de um modelo linear, conforme apresentado na Figura 12.

Figura 12- Curva da potência (MW) *versus* Carga do moinho na câmara de barras (ton) modificada para atender o ajuste linear.



Fonte: Próprio autor (2019).

Portanto, a Equação (18), será utilizada como base para a obtenção da carga de corpo moedor dentro do compartimento de barras dos moinhos 3 e 4 em função da potência.

$$Cba_{3-4} = 179,98 * Pba_{3-4} - 43,85 \quad (18)$$

Onde:

Cba_{3-4} → Carga dentro do moinho (Ton)

Pba_{3-4} → Potência do moinho (MW)

O mesmo procedimento adotado para relacionar a potência com a fração de enchimento e com a carga dentro do moinho por meio das Equações (10) e (12) (para moinho de barras e para a câmara de barras no moinho compartimentado) pode ser realizado para a câmara de bolas no moinho compartimentado.

No entanto, em se tratando de moinho de bolas a equação a ser empregada para o cálculo da potência é a Equação (11).

Nestas condições obtêm-se os dados apresentados na Tabela 5.

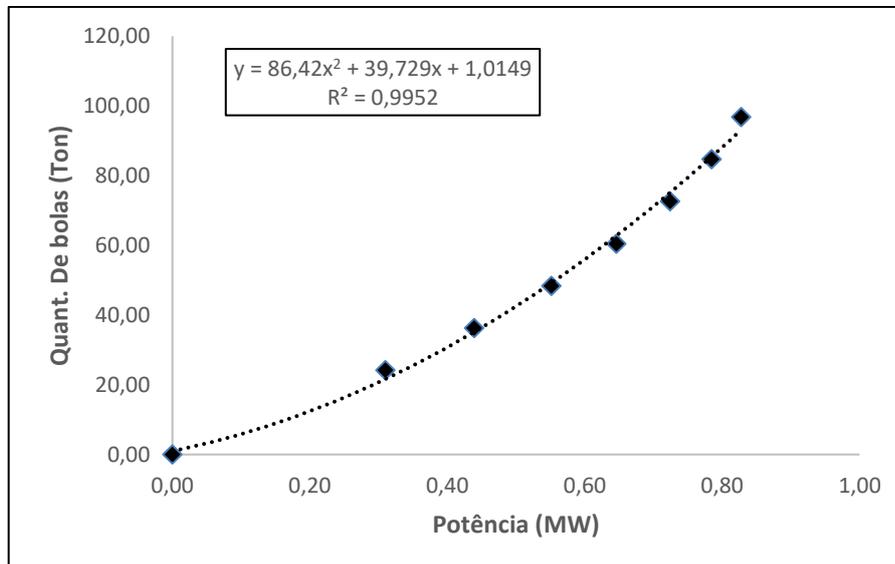
Tabela 5- Relação entre potência, fração de enchimento e carga de corpos moedores (bolas) para moinhos tubulares compartimentados

Fração de enchimento (%)	Potência (MW)	Carga dentro do moinho (ton)
0	0,00	0,00
10	0,36	29,04
15	0,44	36,30
20	0,55	48,40
25	0,65	60,50
30	0,72	72,60
35	0,78	84,70
40	0,83	96,80

Fonte: Próprio autor (2019).

De posse destes dados, plotou-se um gráfico relacionando a potência com a carga dentro do moinho. Os dados foram ajustados por meio de um modelo quadrático, conforme a Figura 13.

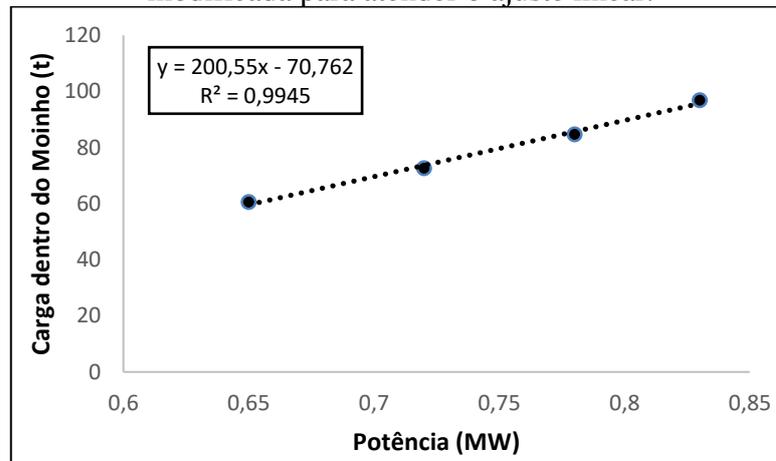
Figura 13- Curva da potência (MW) *versus* Carga do moinho na câmara de bolas (Ton)



Fonte: Próprio autor (2019).

Igualmente, a análise foi realizada no intervalo de potência correspondente à faixa de trabalho de operação usualmente adotada na empresa (0,65 a 0,87 MW), possibilitando a utilização de um modelo linear, conforme observado na Figura 14.

Figura 14- Curva da potência (MW) versus Carga do moinho na câmara de bolas (Ton) modificada para atender o ajuste linear.



Fonte: Próprio autor (2019).

Portanto, a Equação (19), será utilizada como base para a obtenção da carga moedora dentro do moinho em função da potência.

$$Cba_{3-4} = 200,55 * Pba_{3-4} - 70,76 \quad (19)$$

Onde:

Cbo_{3-4} → Carga dentro do moinho (Toneladas)

Pbo_{3-4} → Potência do moinho (MW)

É fácil notar nas Figura 12 e 14 que as potências são menores que a unidade, no entanto, as mesmas referem-se somente a “contribuição” da câmara de barras e bolas, respectivamente, para a potência total do moinho. Portanto, a potência total do moinho é decorrente da “potência” da câmara de barras somada a “potência” da câmara de bolas.

$$P_t = P_{ba} + P_{bo} \quad (20)$$

É necessário fazer-se uma consideração para que seja possível a obtenção dos valores da quantidade de carga necessária a recolocar em cada câmara.

Segundo a Metso (2014) a fração de enchimento alvo para a câmara de barras é de 30% e para a câmara de bolas é de 35%, o que é correspondente a uma quantidade de 71,66 ton e 84,7 ton (segundo as Tabelas 4 e 5), respectivamente. Tendo como potência total de 1,43 MW ($P_{ba_alvo} = 0,65 \text{ MW}$ e $P_{bo_alvo} = 0,78 \text{ MW}$).

Logo, pode-se fazer uma relação proporcional entre as cargas e potência em cada câmara, assim:

$$f_{ba} = \frac{71,66}{(84,7+71,6)} * 100 = 45,8\% \quad (21)$$

$$f_{bo} = \frac{84,7}{(84,7+71,6)} * 100 = 54,2\% \quad (22)$$

Assim, a contribuição da câmara de barras para a potência total é 45,8% e a de bolas é de 54,2%. Ou seja:

$$P_{t,atual} = P_{atual,ba} + P_{atual,bo} \quad (23)$$

$$\text{Onde, } P_{atual,ba} = 0,458 * P_{t,atual} \quad \text{e} \quad P_{atual,bo} = 0,542 * P_{t,atual}$$

Portanto, o cálculo da recarga de barras na câmara de barras é feito com base nas Equações (24) a (26):

$$\Delta_{R_{ba}} = C_{alvo_{ba}} - C_{atual_{ba}} \quad (24)$$

Onde:

$$C_{alvo_{ba}} = 179,98 * P_{ba_{alvo}} - 43,85 \quad (25)$$

$$C_{atual_{ba}} = 179,98 * P_{ba_{atual}} - 43,85 \quad (26)$$

Onde:

$$P_{ba_{alvo}} = 0,65 \text{ MW}$$

Procedendo do mesmo modo, o cálculo da recarga de bolas na câmara de bolas é feito com base nas Equações (27) a (29):

$$\Delta_{R_{bo}} = C_{alvo_{bo}} - C_{atual_{bo}} \quad (27)$$

Onde:

$$C_{alvo_bo} = 200,55 * P_{bo_alvo} - 70,762 \quad (28)$$

$$C_{atual_bo} = 200,55 * P_{atual_bo} - 70,762 \quad (29)$$

Sendo:

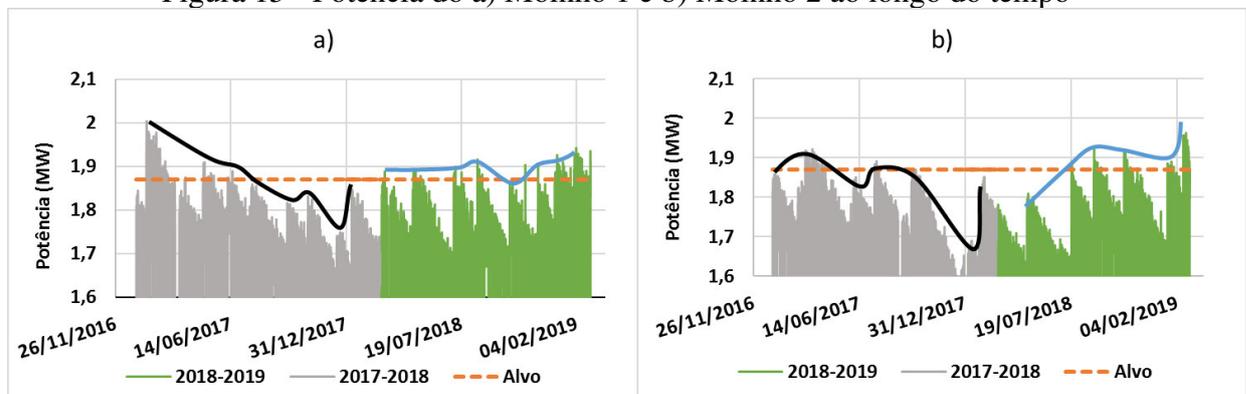
$$P_{bo_alvo} = 0,78 \text{ MW}$$

5.2 Potência após as recargas

5.2.1 MOINHOS DE BARRAS 1 E 2

Os gráficos de “dente” na Figura 15 representam o comportamento da potência dos Moinhos de barras 1 e 2 ao longo do período de janeiro de 2017 a fevereiro de 2019. Os dados são médias horárias de potência.

Figura 15 - Potência do a) Moinho 1 e b) Moinho 2 ao longo do tempo



Fonte: Próprio autor (2019).

No geral, nota-se o decaimento da potência durante um certo período e imediatamente o restabelecimento da mesma para um valor maior, o que significa que nesse momento houve uma recarga de corpo moedor no moinho. As linhas contínuas (preta e azul) conectam as potências alcançadas posteriormente às recargas.

Nota-se que para ambos os moinhos (Figura 15a e 15b) a potência após a recarga durante o período de 2017 estava em tendência de queda distanciando-se do alvo de potência de 1,87 MW e uma certa variabilidade da potência após as recargas.

Ou seja, a quantidade de corpo moedor recolocada estava sendo cada vez menor ou ainda, não havia constância de atendimento do alvo em todas as recargas. Já em 2018, houve um comportamento igual ou muito próximo ao alvo de potência e, portanto, ao alvo de carga moedora para ambos os moinhos.

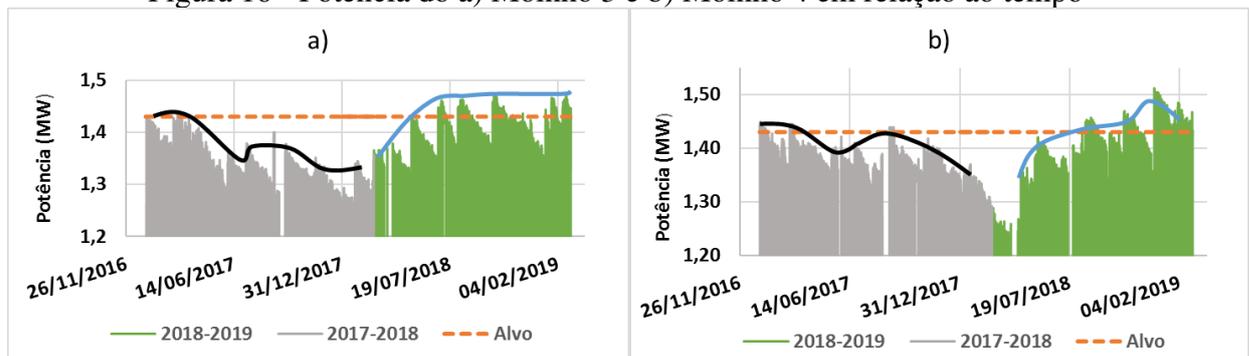
Na Figura 15b observa-se que a potência na recarga do mês de maio do ano de 2018 não alcançou o alvo esperado, devido a problemas de operação que exigiram o retorno da operação imediata desse moinho.

É certo que a potência em 2017, na maior parte do período, manteve-se em valores maiores que o alvo de potência, mas apresentou grande variação na potência atingida após a recarga. A ocorrência desse fato para esse período, se dá pela falta de um modelo de recarga que pudesse atender as particularidades da planta (impossibilidade de entrar no moinho) e especificar a quantidade exata a ser recarregada.

5.2.2 MOINHOS COMPARTIMENTADOS DE BARRAS E BOLAS 3 E 4

O comportamento da potência ao longo do tempo para os Moinhos 3 e 4 pode ser visualizado na Figura 16, na qual, os dados apresentados são médias horárias de janeiro de 2017 a fevereiro de 2019.

Figura 16- Potência do a) Moinho 3 e b) Moinho 4 em relação ao tempo



Fonte: Próprio autor (2019).

Para ambos os moinhos (Figura 16a e 16b), o comportamento de queda da potência após as recargas é evidente no período de 2017, distanciando-se do alvo de 1,43 MW. Na Figura 16b observa-se potências maiores que o alvo, porém sempre com variação a cada recarga, indicando que a quantidade exata a ser recarregada não estava sendo estimada corretamente.

É importante ressaltar que em 2017 houve uma grande dificuldade em se atingir a potência alvo após o retorno à operação, pois, além da falta de um modelo de estimativa de carga, há também o entrave do desequilíbrio de carga (barras e bolas) no momento da inserção do corpo moedor em cada compartimento dificultando o restabelecimento da potência.

Já em 2018, com a implantação do modelo, a tendência foi de um comportamento muito próximo ou maior que o alvo, mesmo com alguns entraves ocorridos em abril de 2018 (Moinho 3) e maio de 2018 (Moinho 4), muito devido a problemas com recursos e disponibilidade de maquinário para a realização completa da atividade de recarga.

5.3 Porcentagem retida acumulada na malha +24 Mesh

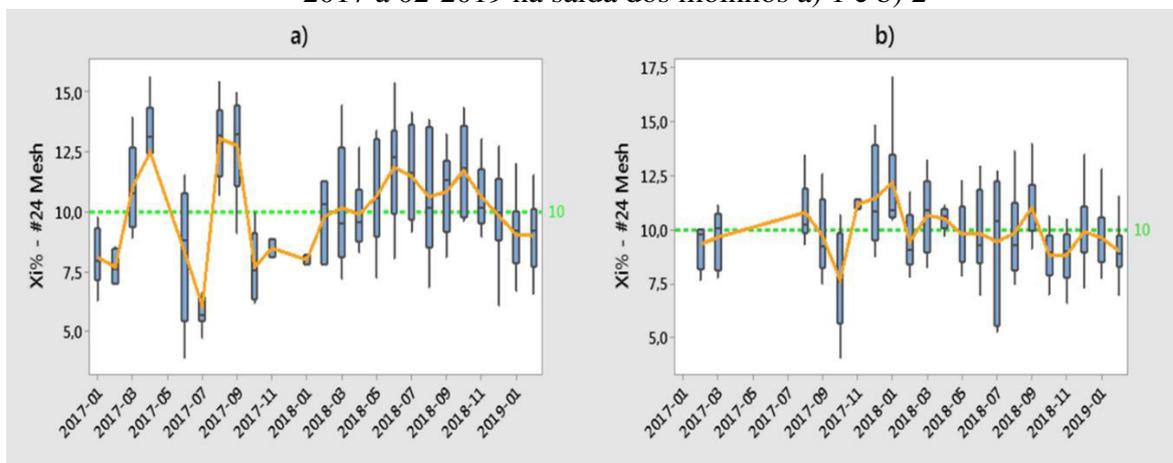
5.3.1 MOINHOS 1 E 2

Devido à variedade de diâmetros no produto dos moinhos busca-se analisar uma granulometria específica, a qual, a empresa adota como parâmetro de performance da moagem. Esse parâmetro é a porcentagem retida acumulada na malha +24 Mesh (X_i), onde os alvos são definidos de acordo com os descritivos de processo da companhia.

Para o Moinhos 1 e 2 deve-se alcançar uma porcentagem <10% de porcentagem retida acumulada na malha +24 Mesh e para os Moinhos 3 e 4 um alvo <3,5%.

Os resultados da massa acumulada na malha +24 Mesh são apresentados na Figura 17 para os períodos de janeiro de 2017 a fevereiro de 2019.

Figura 17 - Resultados de massa acumulada na malha +24 Mesh durante o período de 01-2017 à 02-2019 na saída dos moinhos a) 1 e b) 2



Fonte: Próprio autor (2019).

Diversos fatores podem influenciar o resultado da granulometria na saída dos moinhos, como, a qualidade da bauxita, o fluxo, e a densidade da pasta. Por isso, é importante complementar a discussão dos resultados para o X_i com essas análises, as quais serão comentadas a seguir, excetuando-se a qualidade da bauxita dada a impossibilidade de se obter dados.

Observa-se com base nos resultados apresentados na Figura 17 que para o ano de 2017, a porcentagem retida acumulada sofreu muitas variações, mais especificamente no que se refere aos resultados obtidos nos Moinho 1 (Figura 17a).

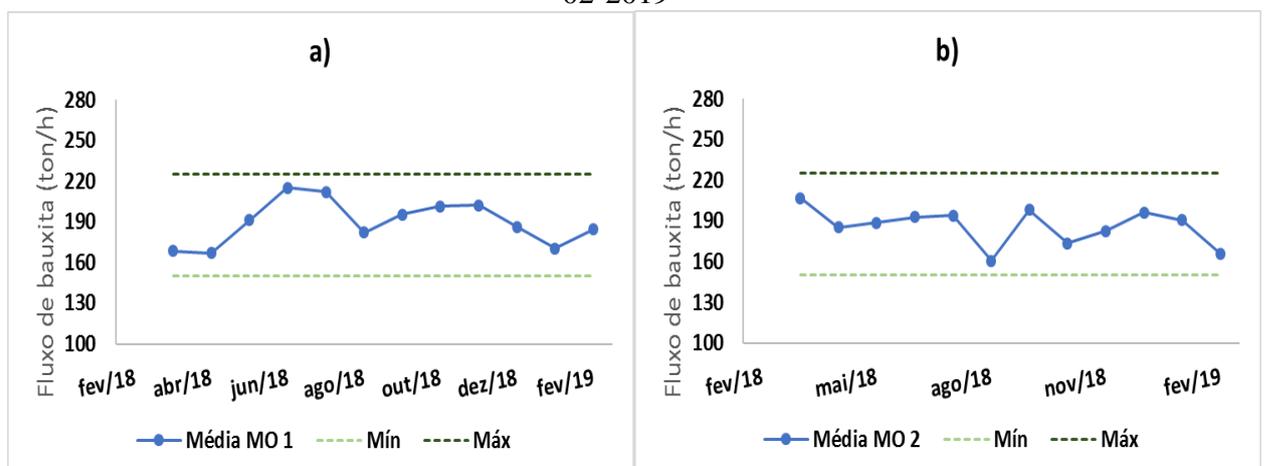
Isso reflete que a variabilidade da potência pós recarga do Moinho 1 (conforme observado na Figura 15a), e conseqüentemente a variabilidade da carga adicionada contribuiu para esses resultados. Não se pode dizer que a relação de causa e efeito é de 100%, pois, o resultado de X_i sofre a influência de outros fatores, mencionados anteriormente.

No entanto, observa-se que em 2018 houve uma significativa melhora com respeito a variabilidade da porcentagem retida acumulada na malha +24 Mesh para o Moinho 1 e 2 (Figura 17a e 17b), indicando que o modelo de recarga estava sendo aplicado eficientemente.

Além disso o X_i apresentou-se em tendência de queda a partir dos meses de agosto-setembro de 2018 para ambos os moinhos, devido a alguns fatores, como fluxo e densidade, os quais serão comentados a seguir.

A média dos fluxos de bauxita dos dois moinhos podem ser visualizados na Figura 18 para o período de março/2018 a fevereiro/2019.

Figura 18– Média do fluxo de bauxita para os moinhos a) 1 e b) 2 para o período de 03-2018 a 02-2019

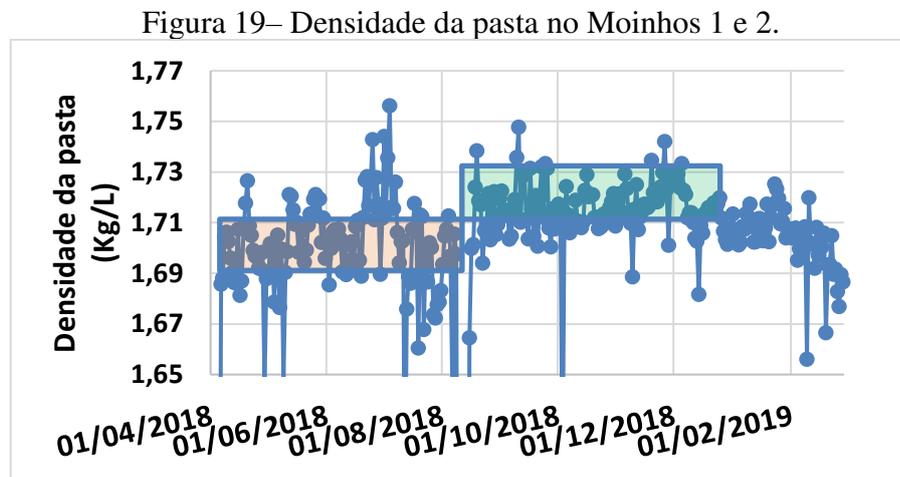


Fonte: Próprio autor (2019).

Os gráficos mostram que embora os fluxos tenham se mantido dentro da faixa de operação (150 tph à 225 tph), houveram variações de fluxos consideráveis no período. Sendo que, essas variações podem trazer algum impacto na performance da moagem, visto que aumento de fluxo implica em mais consumo de corpo moedor.

No entanto, devido ao não conhecimento da grandeza do impacto que a variação do fluxo proporciona à performance da moagem, não foi possível a observação de causa e efeito da variação de fluxo/ X_i nos resultados apresentados nas Figuras 17 e 18.

Além disso, a densidade da pasta é apresentada na Figura 19 em Kg/L para o mesmo período de observação.



Fonte: Próprio autor (2019).

Nota-se que, a densidade da pasta (Figura 19) nos moinhos mudou de patamar durante o período analisado, saindo de uma faixa de 1,69-1,71 Kg/L para 1,71 – 1,73 Kg/L em agosto de 2018, no mesmo período em que se observou a mudança de patamar de X_i , observado na Figura 17.

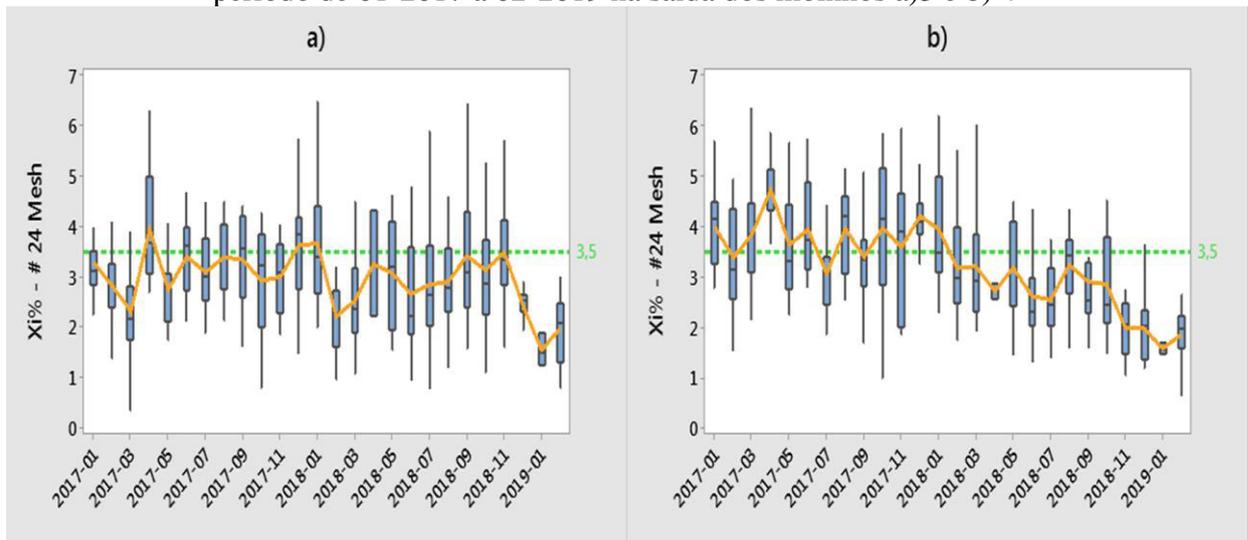
Segundo Napier-munn *et al.*, (1999), a densidade tem grande influência na qualidade da moagem de maneira que adicionando mais água ao moinho, ou seja, diminuindo a densidade da pasta, reduz assim o número de partículas menores disponíveis para interagir com o corpo moedor. Sendo assim, o número de impactos efetivos irá diminuir causando uma redução na cominuição.

Isso reflete que, o aumento de patamar da densidade melhorou significativamente a porcentagem retida acumulada na malha +24 Mesh, observada na Figura 17, indicando a contribuição desse parâmetro para avaliar a performance da moagem.

5.3.2 MOINHOS 3 E 4

Os resultados de porcentagem retida acumulada na malha +24 Mesh nos moinhos 3 e 4 são apresentados na Figura 20, onde foram analisados sob a forma de BoxPlot para o período de janeiro de 2017 a fevereiro de 2019. O alvo de X_i para os dados moinhos é $<3,5\%$.

Figura 20- Resultados de porcentagem retida acumulada na malha +24 Mesh durante o período de 01-2017 à 02-2019 na saída dos moinhos a)3 e b) 4



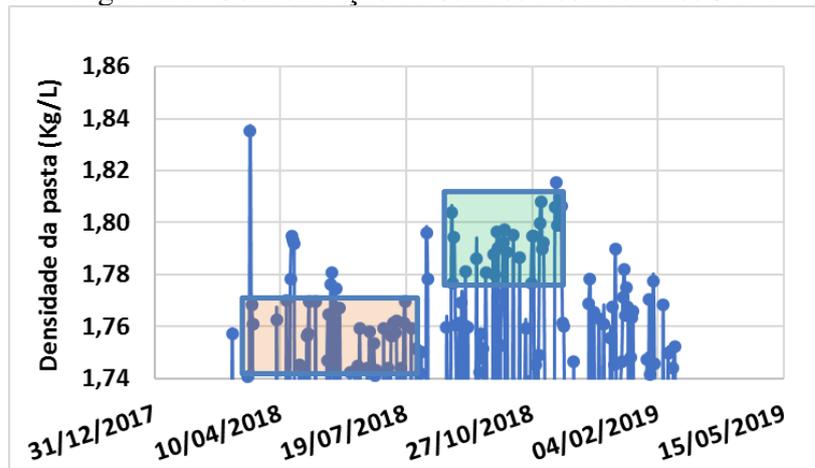
Fonte: Próprio autor (2019).

Observa-se na Figura 20 que, embora em 2017 o desempenho do Moinho 3 (Figura 20a) fosse satisfatório com valores próximos ao alvo, houve uma mudança de patamar entre dezembro de 2017 e janeiro de 2018, ou seja, uma redução de X_i de $3,5\%$ para $2,5\%$ e apresentando valores nos meses seguintes, em sua maioria mais baixos que no mesmo período em 2017.

Nota-se ainda que a partir de outubro de 2018 a redução de patamar foi mais notória e houve uma melhora na amplitude dos resultados, os quais podem ter sido impactados por alguns fatores como densidade de pasta ou fluxo de bauxita, os quais serão comentados a seguir, ou simplesmente devido ao processo de recarga de barras e bolas nos moinhos de acordo com o modelo proposto.

Os resultados de X_i no Moinho 4 (Figura 20b) ao longo do ano de 2017 não estavam alcançando o alvo estabelecido, sendo assim, os valores obtidos se apresentam maiores que $3,5\%$. Já no ano de 2018 obteve-se resultados de melhora de performance já no início de 2018, indicada pela curva laranja em tendência de queda. A melhora na amplitude dos “BoxPlot” também foi observada.

Figura 21- Concentração de sólidos dos Moinhos 3 e 4

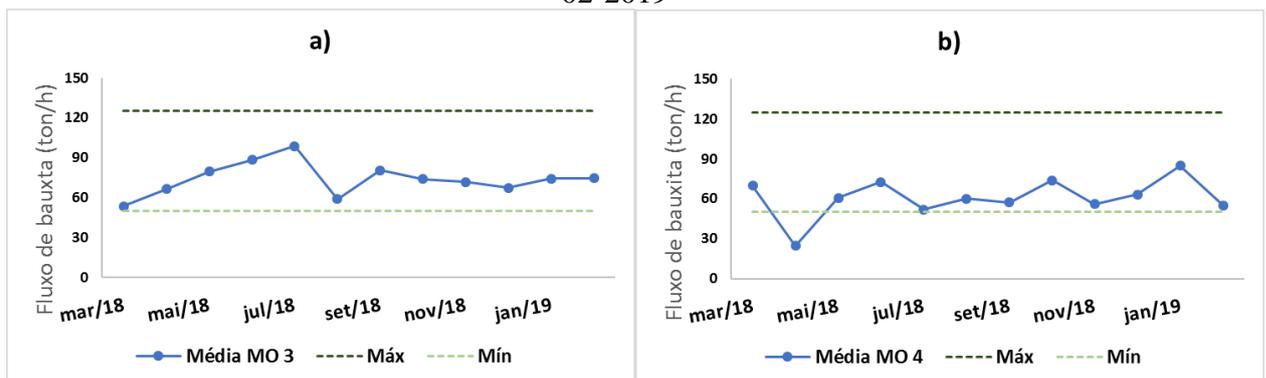


Fonte: Próprio autor (2019).

Ao analisar a densidade da pasta nos moinhos (Figura 21) observamos que a partir do mês de outubro de 2018 houve um aumento da mesma e, conseqüentemente, uma melhora no desempenho dos moinhos (Figura 20a e 20b) enfatizado pela diminuição da amplitude de X_i para o mesmo período.

Os fluxos de bauxita dos dois moinhos podem ser visualizados na Figura 22 para o período de março/2018 a fevereiro/2019.

Figura 22- Média do fluxo de bauxita para os moinhos a) 3 e b) 4 para o período de 03-2018 a 02-2019



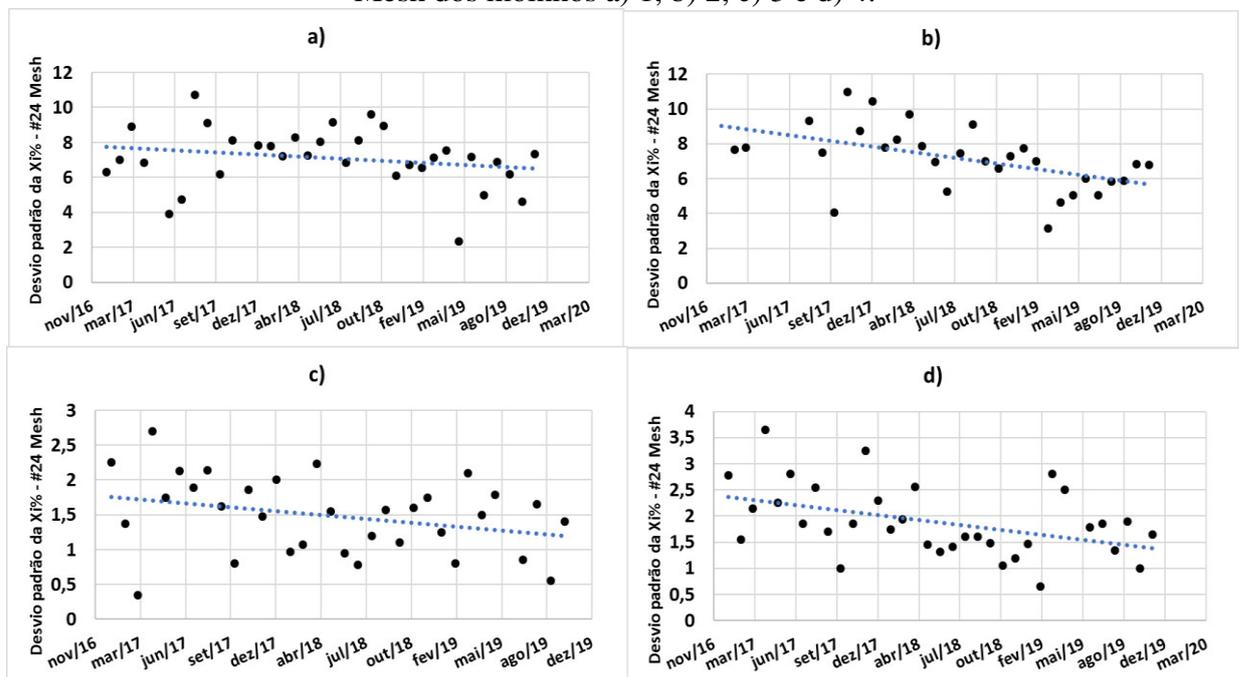
Fonte: Próprio autor (2019).

Da mesma forma como ocorreu com os Moinhos 1 e 2, na maioria dos meses o fluxo de bauxita para ambos os moinhos se manteve dentro da faixa de operação de 50 ton/h a 125 ton/h, embora houvesse variações significativas nos fluxos de bauxita (Figura 22a e 22b). Além disso, não se observa uma correlação de grande impacto dessas variações com respeito à performance da moagem.

Devido ao não conhecimento da grandeza do impacto que a variação do fluxo proporciona à performance da moagem, não foi possível a observação de causa e efeito da variação de fluxo/ X_i nos resultados apresentados nas Figuras 20 e 22.

Fez-se também um estudo dos desvios padrões médios mensais da porcentagem retida acumulada na malha +24 Mesh desde janeiro de 2017 até fevereiro 2019 observado na Figura 23.

Figura 23– Desvio padrão dos resultados de Porcentagem retida acumulada na malha +24 Mesh dos moinhos a) 1, b) 2, c) 3 e d) 4.



Fonte: Próprio autor (2019).

Nota-se que os desvios padrões de todos os moinhos apresentam uma tendência de queda. E mesmo apresentando uma grande variabilidade, os resultados indicam que a performance da moagem vem melhorando ao longo dos últimos anos.

5.4 Avaliação do desgaste de corpo moedor

Fez-se ainda uma avaliação do desgaste do corpo moedor presente nos moinhos no período de 2016 a março de 2018 para averiguar o padrão de recargas antes da implementação do modelo de recarga.

A Tabela 6 apresenta datas de recarga, potência antes e após as recargas, bem como, a quantidade de carga moedora calculada com base no modelo proposto no presente trabalho e o desgaste de corpo moedor entre as recargas dos Moinhos 1 e 2.

Tabela 6 - Desgaste de corpo moedor entre recargas de barras no Moinhos 1 e 2

Data da Recarga	Período entre recargas (Dia)	Potência antes da recarga (MW)	Potência depois da recarga (MW)	Carga antes da recarga (ton)	Carga depois da recarga (ton)	Desgaste de barras (ton)	Desgaste de barras (ton/dia)
13/03/2016	0	1,65	1,74	186,35	197,42	0,000	0,000
28/04/2016	46	1,63	1,81	183,89	206,03	13,53	0,294
20/06/2016	53	1,73	1,85	196,19	210,95	9,84	0,186
08/08/2016	49	1,76	1,90	199,88	217,10	11,07	0,226
15/09/2016	38	1,83	1,89	208,49	215,87	8,61	0,227
28/10/2016	43	1,81	1,93	206,03	220,78	9,84	0,229
07/12/2016	40	1,66	1,84	187,58	209,72	33,20	0,823
18/01/2017	42	1,74	1,92	197,42	219,55	12,30	0,295
26/04/2017	98	1,71	1,83	193,73	208,49	25,83	0,264
08/06/2017	43	1,73	1,83	196,19	208,49	12,30	0,286
24/10/2017	138	1,66	1,74	187,58	197,42	20,91	0,151
12/12/2017	49	1,62	1,68	182,66	190,04	14,76	0,301
02/03/2018	80	1,64	1,79	185,12	203,57	4,92	0,061

Fonte: Próprio autor (2019).

O desgaste por dia é calculado como a diferença entre a carga de corpo moedor após a última recarga e a carga antes da recarga da presente data dividido pelo número de dias entre as duas recargas.

Nota-se (Tabela 6) que não há uma periodicidade de recargas, constatado pela grande variação de períodos entre as recargas. Além disso, o desgaste é bem variado apresentado como valor mínimo de 61 kg por dia entre as recargas de 12/12/2017 e 02/03/2018 e valor máximo de 823 kg por dia entre as recargas de 28/10/2016 e 07/12/2016.

Essa grande diferença pode ser explicada por alguns fatores, como, alterações na qualidade do Blend de bauxita, *Work Index*, avaliação da granulometria da bauxita da alimentação dos moinhos, os quais, podem ser analisados em outros trabalhos.

A previsão de recarga em dias poderia ser estimada ainda caso não houvesse grande variação do desgaste médio diário ao longo dos anos nos dados apresentados. Logo, faz-se necessário a identificação de todas as variáveis de processo que afetam essa alta variabilidade no desgaste de corpos moedores.

6 CONCLUSÃO

O estudo possibilitou o desenvolvimento de uma metodologia de recarga de corpo moedor em moinhos tubulares de barras e compartimentados de barras/bolas garantindo a melhora na performance da moagem e conseqüentemente o restabelecimento da potência alvo de operação do moinho.

Buscou-se relacionar a massa retida acumulada na malha +24 Mesh com alguns parâmetros, como densidade e fluxo de bauxita. No entanto, resultados concretos sobre o impacto destes parâmetros no desempenho do processo de moagem carecem de estudos complementares.

A potência de operação foi alcançada em todas as recargas do período de 2018, excetuando-se que alguns períodos a mesma teve um valor abaixo do esperado (1,87 MW para os moinhos 1 e 2 e 1,43 MW para os moinhos compartimentados) devido a alguns problemas operacionais da planta.

O desvio padrão mostrou-se em tendência de queda desde 2017, enfatizando que as recargas, juntamente com as condições de processos estão sendo benéficas para a quebra de partículas na moagem.

7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Em complementação ao trabalho desenvolvido, recomenda-se que haja um estudo que apresente em formato matemático a dependência das variáveis de processo, como, densidade de pasta, fluxo de bauxita, qualidade do minério, recargas de corpo moedor com a qualidade da moagem, ou seja, com a massa retida acumulada na malha especificada.

Ainda se recomenda que haja uma avaliação do desgaste de corpo moedor juntamente com o *Work Index*, granulometria da alimentação do moinho, umidade da bauxita e outras variáveis de processo que venham a impactar o processo de desgaste e assim poder fazer uma estimativa da data da próxima recarga com mais precisão.

Recomenda-se também que para um melhor ajuste do modelo, deve-se compará-lo com a carga medida no moinho por algum outro método indireto ou mesmo algum método direto.

REFERÊNCIAS

ALVES, V. K. **Otimização de carga moedora utilizando ferramentas de modelamento matemático e simulação de moagem**. 2006. 122 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Minas) – Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2006.

ARAÚJO, E. N. C.; DELBONI, Jr. H. **Development of a Method to measure charges in tumbling mills**. REM: R. Esc. Minas, 311-316, Ouro Preto, Minas Gerais, 2014.

ARAÚJO, E.N.C. **Desenvolvimento de um método para medição de cargas em moinhos tubulares**. 2011. 62 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

BERALDO, J. L. **Moagem de minérios em moinhos tubulares – 1. Ed.** São Paulo: Edgar Blücher, 1987.

BOND, F.C. **Crushing and grinding calculations**. Part II British Chem Eng 6(8) 543-548, 1961.

BOND, F.C. **The Third Theory of Comminution**. Vol. 193, p.484. AIME Trans. Mayo, 1952.

CARVALHO, M. A. O. **Avaliação da disposição de moinhos em circuitos de moagem de minério de ferro**. 2015. 103 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Minas)– Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2015.

CASSOLA, M. S.; MORAES, S. L. de; ALBERTIN, E. **Desgaste na mineração: o caso dos corpos moedores**. REM: R. Esc. Minas, Vol. 59, 173-178, Ouro Preto, 2006.

CHAVES, A.P. **Britagem, peneiramento e moagem – 5. Ed.** Oficina de Textos. São Paulo, 2012.

CLEARY, P. W.; OWEN, P. **Development of models relating charge shape and power draw to SAG mill operating parameters and their use in devising mill operating strategies to account for liner wear**. Minerals Engineering, Vol. 117, 42-62, Australia, 2018.

DIAS, J. A. **A análise sedimentar e o conhecimento dos sistemas marinhos**. Disponível em: <http://w3.ualg.pt/~jdias/JAD/ebooks/Sedim/SedimB_AG.pdf>. Acesso em 02 de dez. de 2019.

GOMIDE, R., **Operações unitárias: operações com sistemas sólidos granulares – 1. Ed.** São Paulo: Câmara Brasileira do Livro, 1983.

GUPTA, A.; YAN, D.S. **Mineral Processing Design and Operations: An Introduction – 2. Ed.** Elsevier. Sydney, 2016.

HIND, R. A., BHARGAVA, S. K., GROCOTT, S. C., **The surface chemistry of Bayer process solids: a review.** Colloids and surfaces A: Physicochemical and engineering aspects, n. 146, pp.359-374, 1999.

METSO. **Descrição e especificações técnicas dos moinhos.** São Luís, 2014.

NAPIER-MUNN, T.J; MORREL, S.; MRRISON, R.D.; KOJOVIC, T., **Mineral Comminution Circuits: Their operation and Optimisation – 2. Ed.** Australia, Queensland: Julius Kruttschnitt Mineral Research Centre, 1999.

PERRY, R. H.; CHILTON, C. H. **Manual de Engenharia Química – 5. Ed.** Rio de Janeiro: Editora Guanabara Dois S.A, 1980.

PONTT, J. Monsag: **A new monitoring system for measuring the load filling of a SAG mill.** Department of Eletronics Technical University Federico Santa Maria. Valparaiso, Chile, 2004.

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

RUYS, A. **Alumina Ceramics – Chapter 3 – Refining of Alumina: The Bayer Process.** Elsevier, p. 49-70. Sydney, 2019. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/book/9780081024423/alumina-ceramics#book-info>>. Acesso em 11 de nov. de 2019.

SAIB NETO, N. **Determinação dos parâmetros de quebra do calcário calcítico usado na pelotização de minério de ferro.** 2011. 121 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Minas)– Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2011.

SILVA FILHO, E. B.; ALVES, M. C. M; DA MOTTA, M., **Lama vermelha da indústria de beneficiamento de alumina: produção, características, disposição e aplicações alternativas.** Revista Matéria, v. 12, n. 2, pp.322-338, Recife, 2007.

TANG, J.; QUIAO, J.; LIU, Z.; ZHOU, X.; YU, G.; ZHAO, J. **Mechanism characteristic analysis and soft measuring method review for ball mill load based on mechanical vibration and acoustic signals in the grinding process.** Minerals Engineering, Vol. 128, 294-311, China, 2018.

TORRES, A. A. de O. **Modelagem do processo bayer utilizando o software comercial Aspen Plus.** 2001. 185 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2001.

UIZES, J.; ARAÚJO, J., **Melhoria do processo de lavagem ácida dos aquecedores.** São Luís, MA: ALUMAR S.A, 2003.

VELOSO, A. M. O. **Estudo do comportamento do Ferro no licor do processo bayer – um estudo de caso.** 2007. 147 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química)– Faculdade de Engenharia Química, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2007.

VON RITTINGER, P.R., **Leherbuch der Aufbereitungskunde.** Berlín, 1867.

WAO – **World Aluminium Organization**, Disponível em: <<http://www.world-aluminium.org>>. Acesso em: 12 de nov. de 2019.

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