

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO MARANHÃO**

**Coordenação de Engenharia Química/CCET**

Trabalho de Conclusão de Curso - TCC



**DOMINGOS GABRIEL ARANHA GAMA**

**DIMENSIONAMENTO DE CORPOS MOEDORES PARA UM  
MOINHO NA FABRICAÇÃO DE CIMENTO PORTLAND**

São Luís  
2023

**DOMINGOS GABRIEL ARANHA GAMA**

**DIMENSIONAMENTO DE CORPOS MOEDORES PARA UM  
MOINHO NA FABRICAÇÃO DE CIMENTO PORTLAND**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado  
ao Colegiado de Curso da 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. Dennys Correia da Silva  
Coorientador: Msc. Edvander Prudente de  
Almeida

São Luís  
2023

Ficha gerada por meio do SIGAA/Biblioteca com dados fornecidos pelo(a) autor(a).  
Diretoria Integrada de Bibliotecas

Gama, Domingos Gabriel Aranha.  
DIMENSIONAMENTO DE CORPOS MOEDORES PARA UM MOINHO NA  
FABRICAÇÃO DE CIMENTO PORTLAND / Domingos Gabriel Aranha  
Gama. - 2023.  
40 f.

Coorientador(a): Edvander Prudente de Almeida.  
Orientador(a): Dennys Correia da Silva.  
Monografia (Graduação) - Curso de Engenharia Química,  
Universidade Federal do Maranhão, São Luís, 2023.

1. Cemento Portland. 2. Corpos moedores. 3.  
Granulometria. 4. Lei de combinuição de Bond. I. Almeida,  
Edvander Prudente de. II. Silva, Dennys Correia da. III.  
Título.

**BANCA EXAMINADORA:**

Prof. Dr. DENNYS CORREIA DA SILVA  
Orientador – COEQ/CCET/UFMA

Prof. Msc. EDILBERTO CORDEIRO DOS SANTOS JUNIOR  
COEQ/CCET/UFMA

Msc. MEYRELLE FIGUEIREDO LIMA  
PPGEQ/UFRN

**28 de julho de 2023**

*Dedico este trabalho a minha família e amigos,  
que sempre estão ao meu lado. E aos meus  
professores que lutam pela a educação pública  
brasileira.*

## AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Domingos Gama e Silvana Aranha, que sempre estiveram ao meu lado, apoiando-me nas minhas escolhas de vida.

As minhas irmãs, Camila, Juliana e Lara que fazem da minha vida mais feliz, por me fazerem enxergar o melhor dela.

Aos meus sobrinhos, Manoela, Lorenzo, Francisco, Olivia, Caetano e Antônio, que são fonte de inspiração para futuros filhos, e que divertem o meu dia.

A minha namorada, Jullyana Almeida, que esteve me dando apoio tanto no período de estagio, quanto neste trabalho de conclusão de curso.

A A.A.A.E.Q SMAGA e a todos os seus membros ativos, por me proporcionarem desportividade e as melhores resenhas nesse ciclo.

Ao meu orientador, Dennys Correia da Silva, que sempre me passou muita tranquilidade, compromisso e parceria.

Ao meu co-orientador, Edvander Prudente de Almeida, que me ensinou muito sobre o tema, tornando-o mais confortável para mim.

Aos professores do curso de Engenharia Química da Universidade Federal do Maranhão, por me proporcionarem aulas de extrema qualidade.

Aos meus amigos do colégio Marista e da vida, Filipe, Matheus, João Luz, Gabriel, Victor, Talita e João Araujo, que sempre me fazem sorrir e são pura alegria em minha vida.

E aos meus primos, Guilherme, Pedro, Ana Clara e Joana, por sempre terem algo a compartilhar e me ajudarem a me tornar uma pessoa melhor.

“I ain't happy, I'm feeling glad. I got sunshine in a bag. I'm useless but not for long. The future is coming on.”

*Teren Jones*

GAMA, Domingos Gabriel Aranha. **Dimensionamento de corpos moedores para um moinho na fabricação de cimento Portland.** 2023. 40 folhas. Trabalho de Conclusão de Curso de Engenharia Química do Centro de Ciências Exatas e Tecnologia da Universidade Federal do Maranhão, São Luís, 2023.

## RESUMO

A moagem é um processo de grande importância na indústria de mineração e cimento. Trata-se de uma operação que visa reduzir o tamanho das partículas, considerada a etapa mais dispendiosa em termos de investimento e custo nas usinas de beneficiamento mineral e cimento. Especificamente na produção de cimento Portland, a moagem é realizada em moinhos tubulares compostos por uma estrutura cilíndrica e revestimentos internos de aço. Diversos fatores influenciam essa operação, e um deles é o nível de enchimento da carga moedora. Esse fator não só afeta a potência consumida, mas também tem um impacto significativo na granulometria do produto final, uma propriedade física que afeta o desempenho do cimento Portland. Para determinar a quantidade adequada de carga moedora, foi utilizado um método de análise granulométrica das matérias-primas a serem moídas, juntamente com a aplicação da lei de cominuição de Bond. Esse estudo foi conduzido em uma fábrica de cimento localizada na região metropolitana de São Luís. O dimensionamento realizado a partir destas duas premissas, que resultou em um dimensionamento para o cimento CP IV – 32, necessário para a fábrica, pois a mesma ainda utilizava um dimensionamento para a fabricação de outro tipo de cimento. Assim determinou-se uma distribuição de corpos moedores para câmara 1 do moinho, sendo ao todo 74 toneladas de corpos moedores, dividido em 6 tamanhos, variando 10 mm o diâmetro de cada corpo moedor onde o menor é o de 50 mm e o maior de 100 mm, pois foram utilizadas 6 peneiras, e cada uma é referente a um tamanho de corpo moedor.

**Palavras-chave:** Cimento Portland. Corpos moedores. Lei de cominuição de Bond. Granulometria.

GAMA, Domingos Gabriel Aranha. **Sizing of grinding media for a mill in Portland cement manufacturing.** Ano de Realização. 40 pagges. Final Graduation Project in Chemical Engineering from the Center of Exact and Technological Science at the Federal University of maranhão, São Luís, 2023.

## ABSTRACT

Grinding is a very important process in the mining and cement industry. It involves reducing the size of particles and is considered the costliest stage in terms of investment and cost in mineral beneficiation and cement plants. Specifically focusing on Portland cement production, grinding is carried out in tubular mills consisting of a cylindrical structure and internal steel linings. Various factors influence this operation, and one of them is the filling level of the grinding charge. This factor not only affects the power consumption but also has a significant impact on the particle size distribution of the final product, a physical property that affects the performance of Portland cement. To determine the appropriate amount of grinding charge, a method of particle size analysis of the raw materials to be ground was used, along with the application of Bond's comminution law. This study was conducted at a cement plant located in the metropolitan region of São Luís. The sizing carried out based on these two premises resulted in a sizing for CP IV - 32 cement, which was necessary for the factory since it still used sizing for the production of another type of cement. Thus, a distribution of grinding media was determined for mill chamber 1, totaling 74 tons of grinding media, divided into 6 sizes, varying 10 mm in diameter for each grinding media, where the smallest is 50 mm and the largest is 100 mm, as 6 sieves were used, each corresponding to a grinding media size.

**Keywords:** Portland cement. Grinding media. Bond's comminution law. Particle size distribution.

**LISTA DE FIGURAS**

Figura 1 – Fluxograma da produção de cimento Portland.....	05
Figura 2 – Movimento da carga no interior do moinho.....	13
Figura 3 – Desgaste de corpos moedores .....	14
Figura 4 – Esquema interno de um moinho de cimento com duas câmaras.....	16

**LISTA DE TABELAS**

Tabela 1 – Granulometria das matérias-primas para o cimento Portland.....	17
Tabela 2 – Quantidade de material retido para cada abertura de peneira.....	18
Tabela 3 – Constante de Bond associada a granulometria, determinando o carregamento de corpos moedores .....	19

**LISTA DE QUADROS**

Quadro 1 – Característica de perfis de revestimento para câmaras de moinho .....	12
Quadro 2 – Comparativo entre as cargas moedoras para cada tamanho de corpo moedor .....	20

## SUMÁRIO

FOLHA DE APROVAÇÃO.....	ii
DADOS CURRICULARES.....	ii
DEDICATÓRIA.....	iv
AGRADECIMENTOS.....	v
EPÍGRAFE.....	vi
RESUMO.....	vii
ABSTRACT.....	viii
LISTA DE FIGURAS.....	ix
LISTA DE TABELAS.....	x
LISTA DE QUADROS.....	xi
SUMÁRIO.....	xii
<b>1 INTRODUÇÃO.....</b>	<b>1</b>
<b>2 OBJETIVOS.....</b>	<b>3</b>
2.1 Objetivos gerais.....	3
2.2 Objetivos específicos.....	3
<b>3 REFERENCIAL TEÓRICO .....</b>	<b>4</b>
3.1 História do Cimento Portland .....	4
3.2 Mineral Clínquer .....	5
3.3 Características físicas do cimento.....	6
3.3.1 Resistência à compressão .....	6
3.3.2 Finura .....	6
3.3.3 Tempo de pega .....	7
3.4 Modelos de Moinhos Industriais .....	7
3.5 Cominuição .....	8
3.5.1 Leis da cominuição .....	9
3.5.2 Lei de Rittinger para cominuição .....	10
3.5.3 Lei de Kick para cominuição .....	10
3.5.4 Lei de Bond para cominuição .....	10
3.6 Fatores que afetam a moagem .....	11
3.6.1 Moinho de duas câmaras .....	11
3.6.2 Corpos Moedores .....	11

<b>4</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>12</b>
4.1	Matéria-prima utilizada .....	13
4.2	Local da pesquisa .....	14
4.3	Instrumentos utilizados para analise granulométrica .....	14
4.4	Análises, métodos e procedimentos experimentais .....	14
4.4.1	Dimensionamento da carga moedora para câmara 1 .....	14
4.4.2	Ensaio granulométrico das matérias-primas .....	15
4.5	Análise estatística .....	16
<b>5</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>17</b>
5.1	Discussão sobre o propósito da nova carga moedora na câmara 1 .....	17
5.2	Granulometria das matérias-primas .....	17
5.3	Dimensionamento da carga moedora .....	19
5.4	Discussão sobre a finura atual na fabricação do cimento Portland CP IV-32 .....	20
<b>6</b>	<b>CONCLUSÃO .....</b>	<b>21</b>
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>22</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A indústria de cimento Portland no Brasil é uma das mais importantes do mundo, tanto em termos de produção quanto de exportação. O cimento Portland é o tipo de cimento mais utilizado na construção civil e representa mais de 90 % do cimento produzido no país. Porém, para que a produção de cimento seja efetiva, é necessário que os equipamentos e máquinas responsáveis para a produção do cimento - como produto final, estejam sob dimensionamento e controle adequados, de modo a se obter um cimento com alta qualidade, bem como garantir uma vida útil prolongada aos equipamentos. Entre esses equipamentos, pode-se citar os moinhos, fundamentais para uma distribuição homogênea das partículas formadoras do cimento segundo a Associação Brasileira de Cimento Portland – (ABPC, 2021).

A moagem é uma operação unitária, que tem como objetivo reduzir o tamanho de partículas sólidas através da aplicação de forças mecânicas, a partir, da lei de cominuição. Esta operação é realizada em diversas indústrias, tais como alimentícia, farmacêutica, química, entre outras, e é utilizada para produzir diferentes tipos de produtos, como minérios, farinhas, açúcares, incluindo também o cimento. Esta operação pode ser realizada por diversos tipos de moinhos, como moinhos de bolas, moinhos de rolos, moinhos de martelos, moinhos de facas, entre outros; e o modelo a ser escolhido depende das características do material a ser moído e das especificações do produto (McKee, S.; Chow, P., 2017).

O moinho de cimento Portland é um equipamento utilizado na indústria de cimento para moer clínquer, material que resulta da fusão de calcário e argila em altas temperaturas. Pode ser do tipo vertical ou horizontal e composto por um cilindro rotativo que contém esferas de aço ou outro material resistente, que são responsáveis por moer o clínquer. O material é introduzido no moinho na forma de grão ou aglomerados (pedras) e passa por diversas etapas de moagem, até atingir a granulometria desejada, cerca de 200 µm. O dimensionamento da carga moedora para um moinho de cimento Portland envolve a determinação da quantidade e do tamanho das esferas ou outros elementos a serem utilizados no processo de moagem (Amorim, R. C. L., 2014).

O dimensionamento da carga moedora leva em consideração diversos fatores, como o tipo de clínquer, o tamanho e a capacidade do moinho, a velocidade de rotação e o grau de enchimento do moinho. Existem diversos métodos e equações disponíveis na literatura para realizar o dimensionamento da carga moedora, que variam de acordo com as condições específicas de cada processo de moagem (Santos, E. C, 2012).

O grau de enchimento do moinho de cimento Portland refere-se à quantidade de material presente dentro do moinho em relação à capacidade total do equipamento. É um parâmetro geralmente expresso em porcentagem em relação ao volume total do moinho. O valor ótimo do grau de enchimento varia de acordo com o tipo de moinho e com as condições de operação, mas geralmente fica entre 20 % a 40 % do volume total. O controle do grau de enchimento é importante para garantir uma moagem eficiente e segura, além de que o volume da carga moedora não pode sobrecarregar uma eventual capacidade máxima do equipamento. O não cumprimento desses fatores pode ocasionar em sobrecarga do moinho, desgaste físico das esferas e do revestimento interno (Bond, F. C., 1982).

Um dos métodos mais utilizados para o dimensionamento da carga moedora é a lei de cominuição de Bond, que utiliza uma equação empírica baseada na energia específica de moagem para determinar o tamanho ótimo das esferas para a moagem. Neste trabalho será apresentado o dimensionamento da carga moedora, a partir da lei de Bond, bem como pelo estudo granulométrico das matérias-primas que alimentam o moinho, o que possibilitará dimensionar uma nova carga moedora para produção de cimento Portland CP IV-32 (Tavares, L. M., 2013).

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo geral**

Dimensionar a carga moedora em um moinho tubular de duas câmaras, utilizado na fabricação de cimento Portland pozolânico.

### **2.2 Objetivos específicos**

- Dimensionar a carga moedora para cada tamanho específico de corpos moedores presentes na câmara 1 do moinho, de acordo com um grau de enchimento pré-estabelecido.
- Avaliar as propriedades físicas de um cimento Portland pozolânico que estão associadas a moagem.

### **3 REFERENCIAL TEÓRICO**

#### **3.1 História do cimento Portland**

Ao estudar o contexto histórico do cimento Portland, o aglomerante mais utilizado na indústria da construção civil, surgem divergências teóricas sobre sua exata origem. As pesquisas de Ribeiro, Pinto e Starling (2002) apresentam esse conflito, já que não há uma certeza absoluta sobre sua origem, como mencionado por Silva (2016). Segundo Sousa (2016), há relatos da utilização de cimento no antigo Egito, Grécia e Roma, onde eram empregadas terras vulcânicas com a ação da água, feitas de cal, areia e cinzas vulcânicas.

Conforme a Associação Brasileira de Cimento Portland - ABCP (2002), um marco no desenvolvimento do cimento foi estabelecido por John Smeaton, um inglês que, em 1756, conseguiu obter um produto de alta resistência através da calcinação de calcários moles e argilosos. Em 1818, o francês Vicat alcançou resultados semelhantes aos de Smeaton ao misturar componentes argilosos e calcários, sendo assim considerado o inventor do cimento artificial (Cruz, 2009).

A ABCP (2002) descreve que o cimento Portland foi desenvolvido pelo construtor inglês, Joseph Aspdin em 1824, onde produzia um pó fino que, quando hidratado e seco, resultava em uma mistura de alta resistência (Battagin, 2016). Em 1915, o cimento começou a ser utilizado na pavimentação de ruas e, posteriormente, em 1920, foi patenteado. A partir de 1929, Proctor estabeleceu uma correlação entre umidade e peso específico aparente na compactação de solos, o que impulsionou o desenvolvimento do cimento para outras aplicações na construção civil, como revestimento de canais, reservatórios, tijolos, blocos, entre outros (Silva, 2016).

No Brasil, até meados do século XIX, a cal era o material cimentício mais utilizado, especialmente na preparação de argamassas para assentamento ou revestimento. Devido à falta de tecnologias para a produção de concreto, era comum utilizar tijolos cerâmicos maciços e/ou pedras nas estruturas das construções (Medeiros et al., 2019). Chaves (2005) descreve a indústria da cal como precursora da produção de cimento no Brasil.

Santos (2005) menciona quatro fatores que dificultaram o estabelecimento da indústria cimenteira. Em primeiro lugar, a dependência de matérias-primas localizadas próximas às fábricas; em segundo lugar, a existência de reservas de calcário distantes dos estados com potencial de consumo; em terceiro lugar, a defasagem na logística, o que por vezes tornava o produto inviável. Por fim, a importação fácil de cimento sem tarifas alfandegárias

desencorajava os investidores.

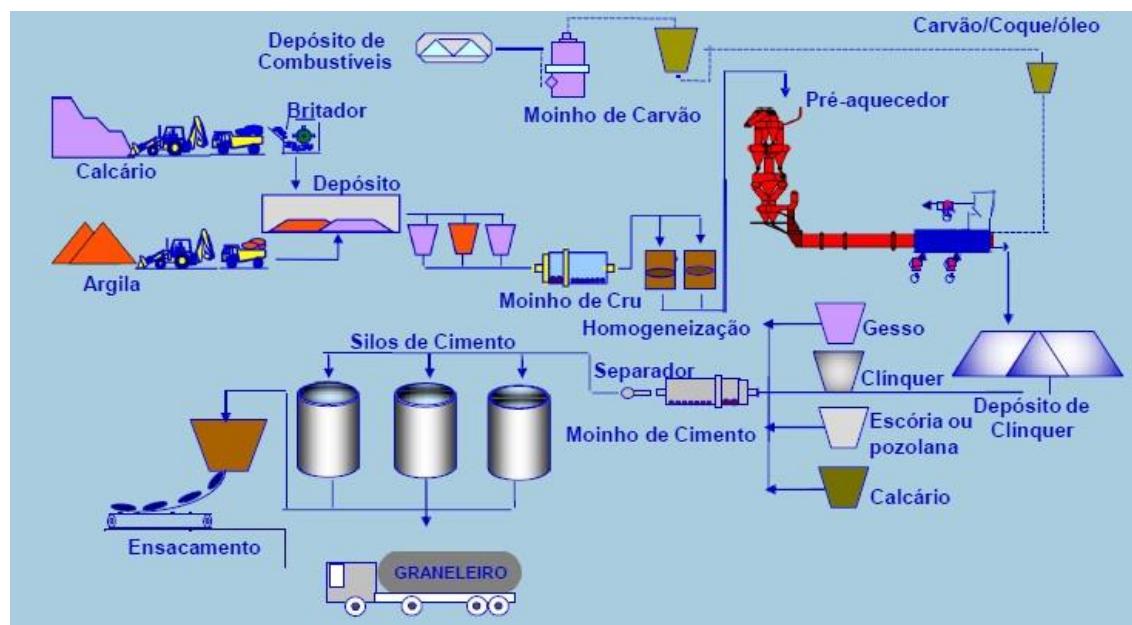
Assim, a consolidação da indústria cimenteira no Brasil ocorreu no início da década de 1930, com a operação de uma fábrica da Companhia Brasileira de Cimento Portland (CBCP), com capacidade de produção de 60 mil toneladas e controle acionário majoritário de 70 % por parte de uma empresa canadense, sendo o restante nacional (Santos, 2011).

### 3.2 Mineral Clínquer

O cimento é primordialmente composto pelo mineral clínquer Portland, que é obtido por meio da calcinação a aproximadamente 1450 °C de uma mistura específica de calcário, argila e, eventualmente, corretivos químicos contendo sílica, alumínio ou ferro. Essa combinação em proporções adequadas possibilita a formação de compostos hidráulicos e confere ao cimento Portland suas propriedades de ligação (Maringolo, 2001).

Para produzir o clínquer Portland em escala industrial, é necessário realizar uma operação complexa que envolve a extração e britagem das matérias-primas, seguidas pela preparação adequada da mistura crua (farinha), ou seja, moagem e homogeneização, e, posteriormente, a queima em forno rotativo (Centurione, 1993). O fluxograma da produção de cimento pode ser observado na Figura 1.

Figura 1 – Fluxograma da produção de cimento Portland.



Fonte: Associação brasileira de cimento Portland (2021).

A fim de produzir o clínquer, é essencial que a composição química do material contenha principalmente os óxidos de CaO, SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Raramente esses compostos são encontrados em proporções adequadas em uma única rocha, sendo necessário corrigir essa situação utilizando dois ou mais tipos de rochas. O calcário, que compreende de 75 % a 80 % da composição, e a argila, que corresponde a 20 % a 25 %, são as matérias-primas comumente utilizadas para a formação do clínquer. No caso em que um componente não está presente em frações adequadas, são incrementados aditivos como minério de ferro, pozolana, bauxita, entre outros (Sato, 2004).

### **3.3 Características físicas do cimento**

#### **3.3.1 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO**

A capacidade de um material suportar um determinado esforço de tensão sem se romper é conhecida como resistência (Alves, 2017). No caso do cimento Portland, a resistência à compressão é uma das propriedades fundamentais. No Brasil, o cimento Portland é classificado com base em sua resistência mínima aos 28 dias de hidratação, sendo atribuídas classes de resistência, como C25, C32 e C40. Isso significa que, após 28 dias de hidratação, o material deve apresentar uma resistência mínima à compressão de 25 MPa, 32 MPa e 40 MPa, respectivamente, conforme os testes estabelecidos pela norma NBR 7215 (ABNT, 2019).

Mehta e Monteiro (2014) afirmam que as propriedades mecânicas do cimento são formadas por meio de reações químicas durante sua hidratação e o endurecimento da argamassa. Essas reações ocorrem quando os compostos do cimento, como C4AF, C3S, C2S e C3A, reagem com a água, formando hidróxido de cálcio [Ca(OH)<sub>2</sub>] e silicato de cálcio hidratado (C-S-H). O C-S-H, por ser altamente resistente, é o principal responsável pelas propriedades mecânicas do material.

De acordo com a norma NBR 16697:2018, o cimento Portland deve apresentar resistências à compressão específicas, de acordo com sua classe.

#### **3.3.2 FINURA**

A finura do cimento, que se estabelece durante o processo de moagem do clínquer em combinação com o sulfato de cálcio (gesso), refere-se à superfície disponível para a hidratação (Neville, 2016).

A composição química e as propriedades físicas, como a finura, podem influenciar o desempenho do cimento (Mehta e Monteiro, 2014). Segundo Oliveira (2021), a finura do cimento é um aspecto que afeta a velocidade das reações de hidratação e desempenha um papel importante nas características da pasta, argamassa e concreto.

Conforme Neville (2016), um aumento na finura do cimento resulta em uma maior disponibilidade de C3A. Moon et al. (2017) destacam que a presença de C3A aumenta a densidade dos produtos hidratados do cimento, o que pode melhorar a compactação das estruturas dos poros e, consequentemente, aumentar a resistência à compressão. Grãos de cimento com alta finura tendem a reagir mais rapidamente e desenvolver maior resistência em menos tempo (Zaparte, 2020).

O grau de finura do cimento pode ser determinado experimentalmente, seguindo as diretrizes das normas ABNT NBR 11579 e ABNT NBR 16372. Na primeira norma, o índice de finura é obtido através da peneira de  $75 \mu\text{m}$  (nº 200), enquanto na segunda norma, é obtido pelo método de permeabilidade do ar, conhecido como método de Blaine.

Ao utilizar a NBR 11579, é possível obter a relação entre a massa do material retido na peneira, cujas partículas possuem dimensões maiores que a abertura da malha da peneira, e a massa total do material, expressa em porcentagem. Dessa forma, o índice de finura do cimento pode ser calculado através da Equação 1.

$$I = \frac{rF_c}{m} 100 \quad (1)$$

onde:

I = índice de finura do cimento (%);

r = resíduo na peneira  $75 \mu\text{m}$  (g);

m = massa inicial do cimento (g);

$F_c$  = fator de correção da peneira (-).

No método descrito na NBR 16372, mede-se o tempo necessário para uma certa quantidade de ar atravessar uma camada compactada de cimento, com dimensões e porosidade definidas. Sob condições normalizadas, a superfície específica do cimento é diretamente proporcional ao tempo necessário ( $t$ ) para o ar atravessar a camada compactada.

É importante observar que essa metodologia de ensaio pode não fornecer valores confiáveis fora da faixa de  $2000 \text{ cm}^2/\text{g}$  a  $8000 \text{ cm}^2/\text{g}$  (ABNT, 2015). Conforme estabelecido

pela ABNT NBR 16697:2018, o cimento Portland deve apresentar índices de finura específicos, de acordo com sua classe.

### 3.3.3 TEMPO DE PEGA

De acordo com Bauer (2000), a ocorrência da pega do cimento envolve o desenvolvimento das propriedades mecânicas da pasta durante o início do processo de endurecimento, resultando em características essencialmente físicas devido à reação química de hidratação. A pega é um fenômeno que ocorre quando a pasta de cimento atinge um estágio impróprio para a realização de trabalhos, especialmente quando é aplicada em argamassas e concretos (PEREIRA, 2017). O sulfato de cálcio, conhecido como gesso, desempenha um papel fundamental no controle do tempo de pega, pois sua presença no cimento determina o tempo de solidificação após a mistura com água (ARAUJO, 2019).

Esse controle é possível porque o gesso retarda a hidratação dos aluminatos tricálcicos (C3A), formando uma camada ao seu redor que retarda sua hidrólise e, como resultado, seu endurecimento. Caso o gesso não estivesse presente como componente, o cimento Portland endureceria quase imediatamente após ser misturado com água, tornando-o inviável para uso em construções (ABCP, 2022). De acordo com a ABNT NBR 16697:2018, todas as classes de cimento Portland devem apresentar um tempo de pega inicial de, no mínimo, 60 minutos, conforme os ensaios estabelecidos pela ABNT NBR 16607:2018.

## 3.4 Modelos de moinhos industriais

Os moinhos são dispositivos compostos por um invólucro cilíndrico, revestido internamente com placas de aço, borracha ou, em alguns casos, cerâmica. Eles giram sobre mancais ao redor do seu eixo central e contêm uma carga de material triturador que é elevada pela rotação do invólucro até certo ponto, onde é despejada sobre o material a ser fragmentado, assim como sobre o restante da carga presente na parte inferior do tubo. Geralmente, são utilizadas esferas, barras e *cylpebs* como meios de moagem (LUZ, 2018).

A característica principal dos moinhos tubulares é a sua operação com corpos moedores, que possuem tamanhos variados, são pesados e têm uma dureza elevada em comparação com as partículas minerais. No entanto, esses corpos moedores são relativamente pequenos em relação ao volume dos moinhos e ocupam menos da metade do espaço interno do equipamento (ROWLAND, 1986). De acordo com Chaves (2003), os fabricantes de moinhos

projetam esses equipamentos com diâmetros fixos, pois é mais viável, do ponto de vista de construção, alterar o comprimento do moinho, que é feito de chapas dobradas e soldadas. As tampas, por sua vez, são produzidas em aço fundido, exigindo moldes específicos e aumentando significativamente o custo de produção, já que a disponibilidade desses moldes é limitada.

Segundo Wills (1977), a cominuição realizada nos moinhos tubulares ocorre por meio da interação entre as partículas e os corpos moedores, podendo ocorrer por compressão, abrasão e impacto. Cada um desses mecanismos tem influência direta no desempenho da moagem, na geração de partículas ultrafinas e no desgaste dos corpos moedores. Além disso, de acordo com Wills (1977), a cominuição nesses moinhos é afetada pelo tamanho e tipo dos corpos moedores, pelo perfil de movimento e pelos espaços existentes entre a carga moedora e o material a ser cominuído.

Uma outra característica de extrema importância nos moinhos tubulares é o sistema de mancais, que são responsáveis por sustentar o conjunto rotativo. Existem dois tipos principais de mancais: os de deslizamento e os de rolamentos. Conforme Niemann (1971), não é possível afirmar que um tipo de mancal é melhor do que o outro, pois cada um possui suas particularidades e nenhum deles atende a todos os requisitos de uma aplicação específica.

A movimentação desses moinhos é realizada por meio de motores de alta potência acoplados a coroas ou pinhões. Conforme mencionado por Chaves (2003), as coroas são fabricadas em duas partes, que são parafusadas e montadas nas extremidades do equipamento de moagem. Para potências de até 400 *hp*, as coroas são produzidas com dentes retos, enquanto para potências superiores, são utilizados dentes helicoidais. Os pinhões, por sua vez, possuem uma dureza inferior às coroas e, caso haja desgaste nos dentes, é possível compensá-lo com o uso de eletrodos e posteriormente, realizar o reusinamento.

No que diz respeito aos custos operacionais das unidades de moagem, uma das principais variáveis é o consumo energético dos moinhos. De acordo com Wellenkamp (1999), é possível implementar otimizações nos moinhos tubulares visando aumentar sua eficiência energética, como o uso de moinhos multicâmaras, nos quais a carga moedora pode ser ajustada de acordo com a granulometria do material, ou a utilização de classificadores. Essas medidas visam melhorar o desempenho energético do processo de moagem.

### **3.5 Cominuição**

Conforme mencionado por Fuerstenau et al. (2002), a etapa de cominuição, que envolve a fragmentação de minérios, rochas e cimentos, consome uma quantidade significativa

de energia elétrica e grandes quantidades de aço devido ao desgaste dos meios de moagem e dos revestimentos dos moinhos. Tromans (2008) afirma que 29,3 % do consumo energético nas operações de beneficiamento e processamento de mineração nos Estados Unidos são atribuídos à cominuição. Além disso, Parapari (2020) destaca que a cominuição de matérias-primas minerais e clínquer para a produção de cimento consome 3 % da eletricidade gerada no mundo.

Segundo Parapari (2020), o mecanismo de quebra por impacto ocorre quando a carga é aplicada perpendicularmente ao fundo do moinho, caindo sobre à partícula, e a energia empregada é maior do que a necessária para a quebra. Assim, a partícula sofre uma carga superior à sua resistência, resultando em sua fratura. Nas operações de moagem, a intensidade do impacto está relacionada à energia transferida para o corpo moedor por meio do levantamento da carga moedora, que é gerada pela rotação do moinho e auxiliada pelo perfil do revestimento.

A quebra por abrasão ocorre quando há uma carga tangencial ou uma energia insuficiente aplicada, resultando em forças paralelas à superfície da partícula. Roufail et al. (2011) definem abrasão como o efeito de fricção ou desgaste de um material. Segundo Palaniandy et al. (2008), a abrasão é caracterizada pela geração de finos e não causa mudanças perceptíveis no diâmetro médio das partículas de alimentação.

Por outro lado, a quebra por compressão acontece quando a partícula é pressionada entre dois corpos moedores, duas ferramentas ou entre o meio moedor e a máquina de cominuição (Wang, 2012). Quando as partículas são submetidas à compressão entre duas superfícies, a energia potencial é convertida em energia elástica. Em materiais frágeis, a energia elástica é armazenada na estrutura cristalina e, quando atinge um valor crítico, microfissuras se formam nas ligações interatômicas (Evertsson, 2000).

### **3.5.1 LEIS DA COMINUIÇÃO**

Conforme mencionado anteriormente, a cominuição, especialmente a etapa de moagem, consome uma quantidade significativa de energia elétrica nas indústrias de mineração e processamento mineral, devido à baixa eficiência energética do processo (Napier-Munn, 2015). Ao longo dos anos, tem havido extensa pesquisa sobre a relação entre o consumo de energia e a granulometria dos materiais, uma vez que os altos custos operacionais e os esforços mecânicos aos quais os equipamentos são submetidos afetam as despesas operacionais. Beraldo (1987) observou que, na prática, a relação entre a granulometria das partículas e o consumo de energia é inversamente proporcional a uma função exponencial do diâmetro.

### 3.5.2 LEI DE RITTINGER PARA COMINUIÇÃO

A Lei de Rittinger, também conhecida como a Primeira Lei da Cominuição, foi formulada por Peter Ritter Von Rittinger em 1867. Ele estabeleceu que a energia consumida durante o processo de cominuição e o aumento da superfície específica resultante da redução da granulometria são diretamente proporcionais (Budke et al., 2011).

### 3.5.3 LEI DE KICK PARA COMINUIÇÃO

A Lei de Kick pode ser derivada a partir da teoria da análise de tensões durante as deformações de um sólido no regime elástico, conforme mencionado por Gomide em 1983. Segundo essa lei, o trabalho necessário é proporcional à diminuição do volume das partículas envolvidas (Budke et al., 2011).

### 3.5.4 LEI DE BOND PARA A COMINUIÇÃO

Bond reconheceu a necessidade de desenvolver uma lei empírica, uma vez que a primeira e a segunda leis de cominuição não abrangiam todos os casos encontrados na prática e na indústria. Assim, foram estabelecidos alguns critérios para classificar os materiais, levando em consideração suas respostas à fragmentação. A Lei de Bond sugere que "a energia consumida para reduzir o tamanho de um material é inversamente proporcional à raiz quadrada do tamanho". Bond definiu o tamanho como a abertura da peneira pela qual passa 80 % do material, as equações 2 e 3 representam essa lei de forma matemática (Budke et al., 2011). A lei de Bond é a única lei capaz de prever o consumo de equipamentos que ainda não foram instalados, além de conduzir a estimativas mais realistas (Fonseca, 2022). Essa lei foi escolhida para conduzir o dimensionamento dos corpos moedores neste trabalho, e está expressa nas equações 2 e 3.

$$E = 10WI * K \quad (2)$$

$$K = \left( \frac{1}{\sqrt{R}} - \frac{1}{\sqrt{P}} \right) \quad (3)$$

onde:

E = energia em kWh para moer uma tonelada de minério;

WI = índice de trabalho (Work Índex);

P = abertura da peneira, em micrômetros (um), através da qual passa a massa;

R = abertura da peneira, em micrômetros (um), através da qual fica retida a massa.

### **3.6 Fatores que afetam a moagem**

#### **3.6.1 MOINHOS DE DUAS CÂMARAS**

O processo de moagem do clínquer para a produção de cimento é realizado em um moinho de bolas de duas câmaras. A primeira câmara, que é mais curta, é responsável por reduzir o tamanho da alimentação bruta utilizando bolas de maior tamanho. O material moído nessa câmara passa por um diafragma intermediário e segue para a segunda câmara, que é mais longa. Nessa segunda câmara, são utilizadas bolas de menor tamanho para moer o material e obter um produto mais fino (Cleary, 2009; Magotteaux, 2022). Em resumo, a primeira câmara prepara o material para ser finalizado na segunda câmara. Cada câmara possui características específicas e, para diferentes processos, critérios de seleção são utilizados para escolher os revestimentos adequados. De acordo com Magotteaux (2022), as condições operacionais listadas no Quadro 1 devem ser analisadas para determinar o perfil ideal de um moinho de duas câmaras.

Quadro 1 – Característica de perfis de revestimento para câmaras de moinho.

<b>1<sup>a</sup> câmara – perfil levantador</b>	<b>2<sup>a</sup> câmara – perfil classificador</b>
Poder de levantamento necessário;	Diâmetro do moinho;
Agressividade do moinho quanto ao impacto;	Grau de enchimento;
Abrasividade do material a moer;	Abrasividade do material a moer;

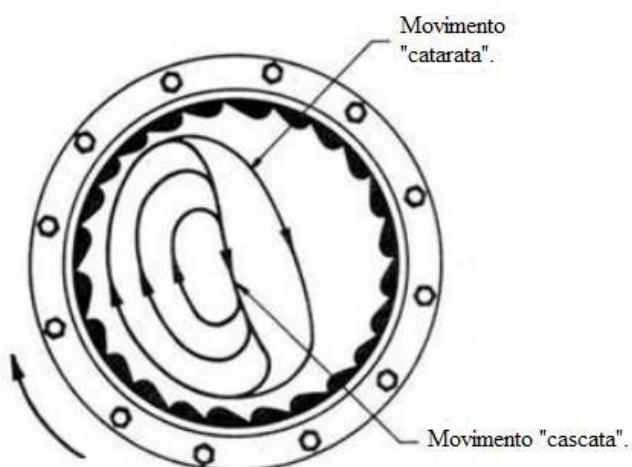
Fonte: Manual ITAU (2012).

A forma como a carga se move dentro do moinho é influenciada pela velocidade de operação e pelo nível de enchimento. Em baixas rotações por minuto e com uma alta fração de enchimento, a carga desliza sobre si mesma, o que é conhecido como o fenômeno de "cascata", conforme descrito por Taggart (1951). Por outro lado, quando a rotação é progressivamente aumentada e o nível de enchimento é reduzido, os corpos moedores são lançados em trajetórias

parabólicas, caracterizando o fenômeno da "catarata". A Figura 2 ilustra ambos os tipos de movimento.

A velocidade crítica de rotação do moinho é o valor teórico no qual as esferas moedoras aderem ao revestimento do equipamento de moagem devido à força centrífuga, resultando na falta de cominuição do material em processo. Em moinhos industriais, a velocidade de operação efetiva é definida como uma fração da velocidade crítica e depende principalmente do diâmetro do equipamento (Taggart, 1951).

Figura 2 – Movimento da carga no interior do moinho.



Fonte: Austin e Klimpel (1964).

### 3.6.2 CORPOS MOEDORES

Conforme Maggoteaux (2022), o consumo de energia e a potência operacional do moinho são influenciados pela carga moedora. A composição dessa carga é estimada com base nos parâmetros operacionais do circuito de moagem e no produto desejado. Normalmente, na primeira câmara, o peso médio de uma esfera é de 1500 a 1800 gramas, enquanto na segunda câmara varia de 30 a 50 gramas, dependendo do tipo de cimento, da finura desejada e do separador utilizado. Para a moagem de cimento Portland, geralmente são utilizadas bolas com diâmetros entre Ø 50-100 mm na primeira câmara e Ø 20-50 mm no segundo compartimento.

À medida que os corpos moedores são utilizados, ocorre um desgaste progressivo, o que afeta a eficiência do circuito de moagem. Portanto, é necessário avaliar constantemente o desgaste para repor a carga operacional, o que representa um dos principais custos no processamento de minérios. Existem várias formas de desgaste, conforme descrito por Chaves (2012). O desgaste metal-metal ocorre quando dois corpos moedores entram em contato sem a

presença de minério entre eles, resultando em áreas desgastadas. A abrasão ocorre quando partículas de alta dureza riscam a superfície das bolas, removendo material ao longo da direção do movimento. Além disso, há o desgaste por erosão, onde partículas finas ao se deslocarem sobre a superfície acabam polindo-a e erodindo-a (Chaves, 2012). A Figura 3 abaixo ilustra corpos moedores em estado de desgaste.

Figura 3 – Desgaste de corpos moedores.



Fonte: Austin e Klimpel (1964).

## 4 MATERIAIS E MÉTODOS

### 4.1 Matéria-prima utilizada

O presente estudo analisou as matérias-primas para fabricação do cimento Portland CPIV – 32, as quais são: clínquer, gipsita, cinza e pozolana. Esses insumos foram armazenados em um galpão protegido de condições climáticas adversas, de uma fábrica cimenteira.

### 4.2 Local da Pesquisa

Esse trabalho foi desenvolvido no laboratório de controle de qualidade em uma fábrica de cimento Portland localizada no distrito industrial na área metropolitana de São Luís - MA.

### 4.3 Instrumentos utilizados para análise granulométrica

Utilizou-se peneiras de aberturas variadas: 25 mm, 19 mm, 12,5mm, 8 mm, 4,75 mm e 2,36 mm, sendo uma de cada. E um fundo de peneira para acomodar as partículas mais finas.

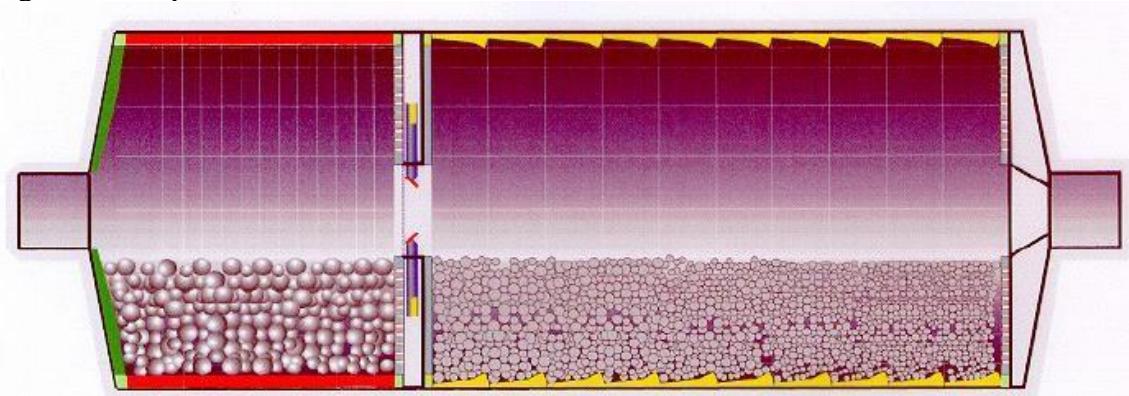
O experimento foi feito com vibração manual para a separação granulométrica das matérias-primas (clínquer, gipsita, cinza e pozolana), de acordo com a norma NBR NM 248, com uma amostragem de 12 kg para cada insumo.

### 4.4 Analises, métodos e procedimentos experimentais

#### 4.4.1 DIMENSIONAMENTO DA CARGA MOEDORA PARA CÂMARA 1

No local do presente estudo, para moagem do cimento Portland, foi utilizado um moinho tubular de duas câmaras, conforme esquema apresentado em Figura 4. Dessa forma, foi escolhida a câmara de entrada (câmara 1) para realizar o dimensionamento da carga moedora, a qual possui 30 % do volume total do moinho, e um grau de enchimento de 30 % do volume em corpos moedores, o que resulta em 74 toneladas de unidades moedoras.

Figura 4 – Esquema interno de um moinho de cimento com duas câmaras.



Fonte: (MAGOTTEAUX, 2022).

#### 4.4.2 ENSAIO GRANULOMÉTRICO DAS MATÉRIAS-PRIMAS

Foi realizado o experimento de determinação granulométrica para as matérias-primas estudadas, utilizando as peneiras de aberturas mencionadas anteriormente, pois a câmara 1 é destinada a moer as partículas até 2,36 mm de diâmetro médio.

#### 4.5 Análise estatística

A compilação dos dados foi feita a partir do *software Excel*. Por meio do *Excel* também foram feitos os cálculos de porcentagem do material retido em cada peneira, assim como uma média ponderada foi calculada - para saber a real granulometria da mistura que ocorre dentro do moinho, com os quatro tipos de insumo.

A partir do tamanho das aberturas entre as peneiras – a que passa o material e a que fica retido, foi calculada uma constante de Bond para cada intervalo. Com essa constante, pode-se associar com os resultados da granulometria da mistura, para assim correlacionar com cada tamanho de corpo moedor. Dessa forma, foi possível determinar o dimensionamento da carga moedora.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 5.1 Discussão sobre o propósito da nova carga moedora na câmara 1

Este trabalho foi orientado a fim de determinar uma nova carga moedora, presente na câmara 1 do moinho em operação numa fábrica de cimento Portland na região metropolitana de São Luís, pois a carga de corpos moedores dimensionada originalmente, era destinada para a produção do cimento CII – E - 32; atualmente a fábrica produz o cimento CP IV – 32. Tendo em vista que são formulações e granulometrias diferentes para as matérias-primas, é necessário um novo dimensionamento do perfil de moagem, para que haja otimização na planta industrial.

### 5.2 Granulometria das matérias-primas

O primeiro resultado é o granulométrico das matérias-primas, presente no processo de fabricação de cimento Portland, conforme pode ser visto na Tabela 1.

Tabela 1 - Granulometria das matérias-primas para o cimento Portland.

Série peneira (mm)	Clínquer (%)	Gesso (%)	Pozolana (%)	Cinza (%)
25,00	1,13	8,73	0,00	0,00
19,00	4,08	10,50	0,00	4,60
12,5	7,40	18,33	0,00	5,42
8,00	11,84	14,12	2,69	7,82
4,75	13,57	9,98	2,29	11,37
2,36	15,72	8,58	4,62	14,60
Fundo	46,25	29,75	90,40	56,20
Total	100,00	100,00	100,00	100,00

Fonte: Próprio autor (2023).

Essas granulometrias são associadas a quantidade de cada matéria-prima que entra no moinho, sendo 54 % da alimentação de clínquer, 5 % de gesso, 24 % de pozolana e 18 % de

cinza, para a produção do cimento Portland CP IV – 32. A Tabela 2, apresenta a distribuição granulométrica da mistura dentro do moinho.

Tabela 2: Quantidade de material retido para cada abertura de peneira.

Série peneira (mm)	Mistura (%)
25	1,04
19	3,79
12,5	6,14
8	9,34
4,75	10,83
2,36	13,09
Fundo	55,76
Total	100,00

Fonte: Próprio autor (2023).

Assim temos a visualização real da mistura entre as matérias-primas que ocorrem dentro do moinho.

Utilizando as equações (2) e (3) tem-se as constantes de Bond (K) para cada tamanho de partícula, associado a um intervalo entre duas peneiras. Foi realizado um somatório entre estes coeficientes, para mostrar o quanto representa cada o tamanho de partícula, de forma percentual. Porém, teve-se que associar esta constante com a quantidade de matéria que entra no moinho para determinar o carregamento de corpos moedores.

Para o dimensionamento da câmara 1, que é responsável por moer as partículas até 2,36 mm de diâmetro médio, a quantidade de matéria alocada no fundo da peneira 55,76 % não foi desprezada.

Tabela 3: Constante de Bond associada a granulometria, determinando o carregamento de corpos moedores.

<b>Granulometria da mistura</b>	<b>Constante de Bond</b>	<b>Bond x Granulometria</b>	<b>Carregamento de corpos moedores (%)</b>
1,04	0,001824	0,00117605	1,24
3,79	0,000930	0,00219367	2,32
6,14	0,001689	0,00645035	6,81
9,34	0,002236	0,01299093	13,72
10,83	0,003329	0,02241629	23,68
13,09	0,006075	0,04945535	52,23
Somatório	0,016083	0,09468267	100,00

Fonte: Próprio autor (2023).

Observando a Tabela 3, podemos perceber a formação da distribuição do perfil moedor, alocado em 6 parcelas, cada uma será distribuída a um tamanho de corpo moedor, com um intervalo entre eles de 10 mm, seguindo o Manual ITAU (2012).

### 5.3 Dimensionamento da carga moedora

Após do cálculo do percentual de carregamento da carga moedora para cada tamanho granulométrico, podemos relacioná-los com os tamanhos dos corpos moedores e a quantidade total de operação do moinho, isto é, 74 toneladas de corpos moedores na câmara 1. Objetivou-se então comparar os valores entre a carga moedora atual com a carga calculada a partir da lei de Bond, conforme mostra o Quadro 2. Vale ressaltar que foram escolhidos corpos moedores entre 50 mm a 100 mm com base no Manual ITAU (2012), a partir da análise do tamanho do moinho em operação.

Quadro 2 – Comparativo entre as cargas moedoras para cada tamanho de corpo moedor.

<b>Tamanho do corpo moedor (mm)</b>	<b>Carga atual de corpos moedores (t)</b>	<b>Carga calculada de corpos moedores (t)</b>
100	0	0,91
90	13	1,71
80	16	5,04
70	17	10,15
60	28	17,51
50	0	38,65

Fonte: Próprio autor (2023).

A partir dos resultados visualizados no Quadro 2, tem-se a distribuição dos corpos moedores para cada tamanho, assim objetivando o sucesso desde estudo. Também pode-se comparar com a carga moedora utilizada atualmente, percebendo-se que a quantidade em toneladas é bem diferente para um determinado tamanho. Dessa forma, notou-se que uma carga moedora está otimizada a outro tipo de granulometria, a correspondente ao cimento CP II – E – 32.

#### **5.4 Discussão sobre os ensaios físicos atuais na fabricação do cimento CPIV-32**

Os resultados das finuras, tempo de pega e resistência à compressão obtidas pelo laboratório de controle de qualidade da fábrica cimenteira, não foram disponibilizados para divulgação a partir deste trabalho, porém a empresa possui certificação da ABNT e ABPC. Sendo assim, o produto final, atende a norma ABNT NBR 16697, ainda que utilizem uma carga moedora diferente da dimensionada no presente estudo.

Dessa forma, o dimensionamento correto atenderá a ABNT NBR 16697, bem como otimizará o separador, fazendo-o com que gaste menos energia no processo. O retorno de material ao moinho será menor, mas também é possível que a alimentação seja maior. A partir disso, espera-se uma melhor produtividade.

## 6 CONCLUSÃO

Por meio deste estudo, foram analisadas as principais características dos processos de moagem, as propriedades específicas do equipamento e as características físicas de um cimento Portland pozolânico. Ao avaliar a carga moedora calculada, concluiu-se que é possível otimizar o moinho com a aplicação da lei de Bond. Isso permite prever uma nova recarga de corpos moedores para adaptar o moinho a essa condição, o que irá melhorar o desempenho do equipamento, evitando custos com desgastes dos revestimentos, carga moedora e variações indesejadas na moagem. Vale relembrar que a carga moedora atualmente utilizada pela fábrica, onde foi realizado esse trabalho, foi dimensionada para a fabricação do cimento Portland CP II-E-32, que utilizava matérias-primas de granulometria e quantidade de alimentação diferentes. Hoje, nessa mesma fábrica, produz-se o cimento Portland CP IV-32, consequentemente com um perfil de moagem não adequado.

A partir de ensaios padronizados pela ABNT - para avaliar a finura percentual, tempo de pega e a resistência à compressão, observou-se que o cimento Portland CP IV-32, produzido atualmente pela fábrica, apresenta valores considerados ideais. No entanto, isso é uma característica comum observada na produção dos cimentos Portland disponíveis no mercado nacional, pois as empresas sempre buscam alternativas para atender a norma, mesmo sem o dimensionamento da carga moedora de forma precisa, tais como aumentar a potência do separador ou diminuir a alimentação de entrada do moinho.

Finalmente, sugere-se, para trabalhos futuros, a possibilidade de determinação do tempo de desgaste da carga moedora, para uma maior eficiência na moagem do cimento Portland CP IV-32.

## REFERÊNCIAS

ALVES, R. **Resistência mecânica de concreto de cimento Portland: correlação de ensaio à compressão axial com esclerometria.** 2017.

AMORIM, R. C. L. **Moagem de cimento Portland.** 2014. 89f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2014.

ARAÚJO, M. C. de L. **Uso popular do açúcar cristal como retardador do tempo de início de pega e sua influência em pastas de Cimento Portland.** 2019. Trabalho de Conclusão de Curso.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. (2021). **Estatísticas.** Recuperado em 6 de abril de 2023, de <https://www.abcp.org.br/estatisticas/>.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **Guia básico de utilização do cimento Portland.** 7. ed. São Paulo, 2002.

BATTAGIN, A. **Uma breve história do cimento Portland.** 2016. Disponível em: <http://www.acbp.org.br/cms/basico-sobre-cimento/historia/uma-breve-historia-do-cimento-portland>. Acesso em: 09 jul. 2022.

BAUER, L. A. F. **Materiais de construção.** 5. ed. Rio de Janeiro: Editora LTC – v.1 - 2000.

Beraldo, J. L. **Moagem de Minérios em Moinhos Tubulares,** São Paulo, Editora Edgard Blücher Ltda, 1987.

BOND, F. C. **The third theory of comminution.** Mining Engineering, v. 34, n. 4, p. 484-494, 1982.

CENTURIONE, S. L. **Influência das características das matérias-primas no processo de sinterização do clínquer Portland.** São Paulo: USP, 1993. Dissertacao (Mestrado em Mineralogia e Petrologia), Instituto de Geociencias, Universidade de Sao Paulo, Sao Paulo, 1993.

CHAVES, M. **Da periferia ao centro da(o) capital: perfil dos trabalhadores do primeiro complexo cimenteiro do Brasil**, São Paulo, 1925-1945. Dissertação (Mestrado em História Social do Trabalho). Departamento de História. Campinas, Universidade Estadual de Campinas, 2005.

CLEARY, P. W. **Ball motion, axial segregation and power consumption in a full scale two chamber cement mill**. Minerals Engineering, v. 22, n. 9-10, p. 809-820, 2009.

CRUZ, R. **Uma breve história do cimento Portland**. Associação Brasileira de Cimento Portland, São Paulo, p. 1-2, 2009.

EVERTSSON, C. M. **Cone crusher performance**. Chalmers Tekniska Hogskola (Sweden), 2000.

FELLOWS, P. **Tecnologia do Processamento de Alimentos: Princípios e Prática**. 2<sup>a</sup> ed. Porto Alegre: Artmed, 2006.

FONSECA, C. K. N. **Simulação de VertiMill**. 2022.

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

INDÚSTRIA DO CIMENTO NO BRASIL, A. **A industrialização de São Gonçalo e a Companhia Nacional de Cimento Portland (1931/1942)**. (BRANDÃO, 2018)

ITAU. **Manual Técnico: cimento, cal e argamassas**. 2012.

LUZ, A. B. da; ALMEIDA, Salvador Luiz Matos de; BRAGA, Paulo Fernando Almeida. **Cominuição: Britagem e moagem**. 2018.

MARINGOLO, V. **Clínquer Co-Processado: produto de tecnologia integrada para sustentabilidade e competitividade da indústria de cimento**. 174 f. São Paulo, 2001. Tese (Doutorado em Mineralogia e Petrologia) Programa de Pós-Graduação em Mineralogia e Petrologia, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2001.

MCKEE, S.; CHOW, P. **Operações Unitárias em Engenharia Química.** 7<sup>a</sup> ed. Porto Alegre: AMGH, 2017.

MEDEIROS, J. A.; TORRES, S. M. **O cimento Portland do século XIX e as ruínas que testemunham o pioneirismo brasileiro na indústria cimenteira da América Latina.** (Medeiros, 2019).

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J.M. **Concreto: Microestrutura, propriedades e materiais.** 1<sup>a</sup> ed. São Paulo: Ibracon, 2014.

MOON, D.G; OH, S.; JUNG, H.S; CHO, C.Y- **Effects of the fineness of limestone powder and cement on the hydration and strength development of PLC concrete.** Construction Building Materials. 2017.

NAPIER-MUNN, T. **Is progress in energy-efficient comminution doomed?** Minerals Engineering, v. 73, p. 1-6, 2015.

NEVILLE, A.M. **Propriedades do Concreto.** 5. Ed. Porto Alegre: Bookman, 2016.

NUNAN, T. O.; DELBONI-JUNIOR, H. **Simulation of the mineração serra grande industrial grinding circuit.** Revista Escola de Minas/International Engineering Journal, v. 70, n. 3, p. 347-355, 2017.

OLIVEIRA, F. B. de. **Influência do tipo de cimento Portland na consistência de pastas cimentícias.** 2021.

PALANIANDY, S. et al. **Effect of operational parameters on the breakage mechanism of silica in a jet mill.** Minerals Engineering, v. 21, n. 5, p. 380-388, 2008.

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

PEREIRA, M. D. **Análise do tempo de pega dos cimentos com o uso de calorímetro e termografia.** 2017. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

PORTAL DA INDÚSTRIA. (2019). **Cimento: setor contribui para o crescimento do país.** Recuperado em 6 de abril de 2023, de <https://www.portaldaindustria.com.br/cni/imprensa/2019/10/1,44395/cimento-setor-contribui-para-o-crescimento-do-pais.html>

SANTOS, E. C.; GUIMARÃES, L. C.; CASTRO, L. M. A. **Caracterização e análise de desempenho de circuito fechado de moagem de clínquer de cimento Portland com o moinho de bolas.** Revista Escola de Minas, v. 65, n. 3, p. 331-337, 2012.

SANTOS, L. B. **A IMPORTÂNCIA DO SETOR MINERAL NO DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO DEITAPEVA/SP: ESTUDO DE CASO DA FÁBRICA DE CIMENTO LAFARGE.** 2005. 190F.

SANTOS, L.B. **A indústria de cimento no Brasil: origens,consolidação e internacionalização.** Sociedade & natureza, v. 23, n. 1, p. 77-94, 2011.

SATO, P. E. S. **Distribuição de elementos menores no processo de fabricação de clínquer portland.** 2004. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

SINDICATO NACIONAL DA INDUSTRIA DE CIMENTO. (2021). **O setor.** Recuperado em 6 de abril de 2023, de <https://snic.org.br/o-setor/>.

SILVA, M. R. **O uso do solo-cimento na construção.** In: BAUER, L. A. Falcão. Materiais de construção. 5. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2016. v. 2

TAVARES, L. M. **Fundamentos da cominuição.** In: TAVARES, L. M. (Org.). Mecanismos de Fragmentação de Partículas. Rio de Janeiro: CETEM/MCTI, 2013. p. 1-29.

WANG, M. H.; YANG, R. Y.; YU, A. B. **DEM investigation of energy distribution and particle breakage in tumbling ball mills.** Powder Technology, v. 223, p. 83-91, 2012.

ZAPARTE, T. A. et al. **Análise global da influência da finura da cinza de casca de arroz como substituição parcial ao cimento Portland nas propriedades da argamassa de revestimento.** 2020. Dissertação de Mestrado. Universidade Tecnológica Federal do Paraná.