

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO MARANHÃO**  
**Coordenação de Engenharia Química/CCET**  
Trabalho de Conclusão de Curso - TCC



**IVAILSON LOBO SANTOS**

**ANÁLISE EXPERIMENTAL DO GRAU DE ENCHIMENTO  
EM MOINHO TUBULAR EM UMA INDÚSTRIA DE  
CIMENTO PORTLAND**

São Luís  
2022

**IVAILSON LOBO SANTOS**

**ANÁLISE EXPERIMENTAL DO GRAU DE ENCHIMENTO  
EM MOINHO TUBULAR EM UMA INDÚSTRIA 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. Harvey A. Villa Vélez

São Luís  
2022

LOBO SANTOS, IVAILSON.

ANÁLISE EXPERIMENTAL DO GRAU DE ENCHIMENTO EM MOINHO TUBULAR EM UMA INDÚSTRIA DE CIMENTO PORTLAND / IVAILSON LOBO SANTOS. - 2022.

53 p.

Coorientador(a): EDVANDER PRUDENTE DE ALMEIDA.

Orientador(a): HARVEY ALEXANDER VILLA VÉLEZ.

Curso de Engenharia Química, Universidade Federal do Maranhão, UNIVERSIDADE FEDERAL DO MARANHÃO, 2022.

1. Cimento Portland. 2. Grau de Enchimento. 3. Moagem. 4. Moinhos tubulares. I. PRUDENTE DE ALMEIDA, EDVANDER. II. VILLA VÉLEZ, HARVEY ALEXANDER. III. Título.

## FOLHA DE APROVAÇÃO

**BANCA EXAMINADORA:**

Prof. Dr. HARVEY A. VILLA VELÉZ  
Orientador – DEEQ/CCET/UFMA

Prof. Dr. PAULO H. DA SILVA LEITE COELHO  
DEEQ/CCET/UFMA

Prof. Dr. JOSE ROBERTO P. RODRIGUES  
DEEQ/CCET/UFMA

**25 de julho de 2022**

**DADOS CURRICULARES****Ivailson Lobo Santos**

**NASCIMENTO** 17/06/1998 – SANTA LUZIA DO PARUÁ / MA

**FILIAÇÃO** Francisco Ivai da Silva Santos  
Genecir Lobo

**2016/2022** Curso de Graduação  
Engenharia Química - Universidade Federal do Maranhão

## AGRADECIMENTOS

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

Aos meus pais que sempre confiaram em meus projetos e respeitaram minhas escolhas.

A minha tia Maria Hilda da Silva Santos e tio Francisco das Chagas Gomes da Costa pela confiança e investimento em meus estudos durante essa trajetória.

A Dra. Ana Maria Menezes Rodrigues por me acolher como um filho no decorrer da graduação, assim como toda sua família, em especial meu irmão Thiago Rodrigues de Sousa.

Aos meus irmãos Idenilson Lobo Santos e Iara Lobo Santos por representarem inspiração e parceria.

Aos meus amigos da turma 2016.1 por tantas histórias, perrengues, partidas de truco, partidas de sinuca e muito compartilhamento de conhecimento. Especialmente a Vinicius, Pedro, Glauberthy, Lailson, Felipe, Vanessa Sousa, Priscila, Jéssica, Carla, Melissa e Gustavo.

A minha namorada Emanuelle Menezes pela amizade, apoio e companhia do início ao fim da graduação.

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

Ao meu orientador Harvey Villa, co-orientador Edvander Prudente e ao professor Romildo Sampaio por serem peças fundamentais na produção deste trabalho.

Aos professores Elmo, Wendel, Paulo, Harvey, José Roberto, Lâmia, Jaiver, Flávio, Annamaria pela contribuição em minha formação.

Aos meus amigos de Santa Luzia do Paruá: Stuart, Helton, Gustavo, Dani, Érica, TT, Cleysson, Thaylson, Elisa, Richard Carvalho e Ravel.

Aos meus amigos de Tucuruí: Leandro Macedo, Leandro Costa, Wendrel, Maklin, Felipe, Rômulo, Karine, Mery, Felicity, Dara, Vitor, Ellen e Arthur.

Aos meus primos Vagno, Dedé, Rael, Jackelyne, Rambim, Yanna, Anna Karla, Anthony e Aninha por sempre terem algo a compartilhar e me ajudarem a ser uma pessoa melhor.

SANTOS, IVALSON LOBO. **Análise experimental do grau de enchimento em moinho tubular em uma indústria de cimento Portland**. 2022. 53. Trabalho de Conclusão de Curso de Engenharia Química do Centro de Ciências Exatas e Tecnologia da Universidade Federal do Maranhão, São Luís, 2022.

## RESUMO

Um dos processos mais importantes na indústria mineral e cimenteira é a moagem. É uma operação unitária que consiste na redução de tamanho de partículas, onde o processo ocorre em moinhos sendo de longe a operação mais cara em investimentos e custo das usinas de beneficiamento mineral e de cimento. Ao fazer uma abordagem direcionada apenas à produção de cimento Portland, a moagem se dá em moinhos tubulares que são fabricados por uma carcaça cilíndrica e por revestimentos internos de aço. Dentre as variáveis nessa operação, o grau de enchimento é a que mais contribui na potência consumida, além de interferir significativamente na granulometria do produto, que é uma propriedade física que afeta no desempenho do cimento Portland. Para análise do grau de enchimento foi abordado um método convencional de medição, e para estudo das propriedades físicas do cimento Portland, adotou-se as metodologias de ensaios preconizadas pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). Este estudo foi desenvolvido em uma cimenteira na região metropolitana de São Luís, verificou-se uma relação L/D igual a 3,0 e um grau de enchimento de 27,69% com consideráveis desvios na carga. A densidade de carga determinada foi de 4,30 t/m<sup>3</sup> para a primeira câmara, com esferas de 30 a 50 mm de diâmetro, e, de 4,60 t/m<sup>3</sup> na segunda câmara, com corpos moedores entre 60 e 90 mm de diâmetro. Em ambas, foi perceptível contaminações. Propôs-se uma recarga de 34,03 toneladas. Nas características físicas do cimento foram verificados desvios superiores a 60% entre as finuras analisadas num intervalo de 12 meses, e concluiu-se pouca correlação entre essa propriedade e a resistência de um CP IV 32. Apesar das variações, todas as amostras estavam na faixa adequada conforme as normativas vigentes.

**Palavras-chave:** Moagem. Moinhos tubulares. Grau de enchimento. Cimento Portland.

SANTOS, I. L. **Experimental analysis of the filling degree in a tube mill in a Portland cement industry**. 2022. 53. End-of-course Paper of Chemical Engineering of the Exact Sciences and Technology Center of the Federal University of Maranhão, São Luís, 2022.

## ABSTRACT

One of the most important processes in the mineral and cement industry is grinding. It is a unit operation that consists of particle size reduction, where the process takes place in mills, being by far the most expensive operation in terms of investment and cost of mineral and cement processing plants. Taking an approach aimed only at the production of Portland cement, grinding takes place in tube mills that are manufactured by a cylindrical housing and internal steel linings. Among the variables in this operation, the degree of filling is the one that most contributes to the power consumed, in addition to significantly interfering in the granulometry of the product, which is a physical property that affects the performance of Portland cement. To analyze the degree of filling, a conventional measurement method was used, and to study the physical properties of Portland cement, the test methodologies recommended by the Brazilian Association of Technical Standards (ABNT) were adopted. This study was carried out in a cement plant in the metropolitan region of São Luís, and there was an L/D ratio equal to 3.0 and a filling degree of 27.69% with considerable deviations in the load. The load density determined was 4.30 t/m<sup>3</sup> for the first chamber, with spheres from 30 to 50 mm in diameter, and 4.60 t/m<sup>3</sup> in the second chamber, with grinding bodies between 60 and 90 mm in diameter. In both, contamination was noticeable. A recharge of 34.03 tons was proposed. In the physical characteristics of the cement, deviations of more than 60% were verified between the finenesses analyzed in an interval of 12 months, and little correlation was concluded between this property and the strength of a CP IV 32. Despite the variations, all samples were in the range in accordance with current regulations.

**Keywords:** Milling. Tube mills. Filling degree. Portland cement.

**LISTA DE FIGURAS**

Figura 1 – Evolução da produção cimenteira no Brasil.....	03
Figura 2 – Fluxograma da produção de cimento Portland.....	04
Figura 3 – Circuito aberto de moagem .....	11
Figura 4 – Circuito fechado de moagem. ....	12
Figura 5 – Movimento da carga no interior do moinho.....	17
Figura 6 – Desgaste de corpos moedores .....	19
Figura 7 – Esquema interno de um moinho de cimento com duas câmaras.....	19
Figura 8 – Medições de H nas entradas e saída das câmaras .....	20
Figura 9 – Posicionamento de corpo moedor para medição.....	21
Figura 10 – Esquema de dimensões do moinho .....	21
Figura 11 – Medição dos comprimentos internos .....	22
Figura 12 – Medidas geométricas da carga no moinho .....	22
Figura 13 – Componentes internos do moinho.....	26
Figura 14 – Perfil Duostep Magotteuax em K1 .....	29
Figura 15 – Perfil Classoline Magotteuax em K2 .....	29
Figura 16 – Contaminação de carga e rompimento de grelha .....	31
Figura 17 – Blaine dos cimentos pozolânicos CP IV .....	34

**LISTA DE TABELAS**

Tabela 1 – Requisitos de compressão mecânica para as classes de cimento.....	06
Tabela 2 – Finura para as classes de cimento.....	09
Tabela 3 – Comparativo entre circuitos de moagem de cimento Portland.....	13
Tabela 4 – Dimensões do moinho .....	25
Tabela 5 – Medições na K1.....	27
Tabela 6 – Cálculo do GE na K1.....	27
Tabela 7 – Medições na K2.....	28
Tabela 8 – Cálculo do GE na K2.....	29
Tabela 9 – Compilação dos resultados das propriedades do moinho em K1 e K2. ....	32
Tabela 10 – Propriedades físicas de um cimento CP IV – 32 .....	33

**LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

ABCP	Associação Brasileira de Cimento Portland
CBCP	Companhia Brasileira de Cimento Portland
SAC	Fator de Saturação de Cal
MS	Módulo de Sílica
MA	Módulo de Alumina
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
OPEX	Operational Expediture

## SUMÁRIO

FOLHA DE APROVAÇÃO.....	II
DADOS CURRICULARES .....	III
AGRADECIMENTOS .....	IV
RESUMO .....	V
ABSTRACT .....	VI
LISTA DE FIGURAS .....	VII
LISTA DE TABELAS .....	VIII
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS .....	IX
<b>1 INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA.....</b>	<b>1</b>
<b>2 OBJETIVOS .....</b>	<b>2</b>
2.1 Objetivo geral.....	2
2.1 Objetivos específicos .....	2
<b>3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>2</b>
3.1 História do cimento portland .....	2
3.2 Processo de produção de cimento .....	4
3.2.1 Clínquer portland .....	4
3.2.2 Módulos de adição .....	5
3.3 Características físicas do cimento .....	6
3.3.1 Resistência à compressão.....	6
3.3.2 Finura .....	7
3.3.3 Tempo de pega .....	9
3.4 Tperação unitária de moagem.....	10
3.4.1 Configurações de moinhos industriais .....	10
3.4.2 Circuitos de moagem .....	11
3.5 Cominuição.....	13
3.5.1 Teorias da cominuição.....	14
3.5.2 1ª lei da cominuição.....	14
3.5.3 2ª lei da cominuição.....	15
3.5.4 3ª lei da cominuição.....	16
3.6 Fatores que afetam a moagem .....	16
3.6.1 Função e revestimento das câmaras .....	16

3.6.2 Velocidade crítica .....	17
3.6.3 Composição e desgaste de corpos moedores .....	18
<b>4 MATERIAL E MÉTODOS .....</b>	<b>19</b>
4.1 Local da pesquisa .....	19
4.2 Descrição do equipamento de estudo .....	19
4.3 Avaliação métrica do moinho .....	20
4.4 Estudo das características físicas do moinho e do cimento .....	23
4.5 Cálculo do grau de enchimento .....	23
<b>5 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>25</b>
5.1 Resultados da avaliação métrica do moinho .....	25
5.2 Resultados do cálculo do grau de enchimento .....	26
5.2.1 Cálculo do grau de enchimento na k1 .....	26
5.2.2 Cálculo do grau de enchimento na k2 .....	28
5.3 Resultados das características físicas do moinho e do cimento .....	30
5.3.1 Diâmetro médio dos corpos moedores e densidade da carga .....	30
5.3.2 Características físicas do cimento .....	32
<b>6 CONCLUSÃO .....</b>	<b>35</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>35</b>

## 1 INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA

A moagem em moinhos de bolas é um importante processo tecnológico empregado para a redução do tamanho de partículas, que podem ter natureza diversa (GUPTA, 2020). As bolas são utilizadas como carga moedora e o seu nível determinará parâmetros importantes no processo de moagem, como por exemplo, o grau de enchimento do moinho.

O nível de enchimento de um moinho é definido através da fração volumétrica que os corpos moedores ocupam em relação ao volume total do equipamento. As cargas moedoras geralmente são bolas ou barras e devido ao desgaste, necessitam ser repostas periodicamente com a finalidade de assegurar a eficiência da moagem, bem como, a granulometria desejada para o processo.

Araújo (2011), diz que a fração volumétrica dos corpos moedores é a variável que mais contribui na potência consumida pelos moinhos. Logo, mensurar esse grau é de extrema importância nas indústrias mineradoras e de cimento Portland, pois, além de impactar nos custos operacionais de produção, interfere na qualidade do produto. Entretanto, trata-se de uma atividade onerosa e com elevados riscos de segurança através dos métodos convencionais.

Justifica-se o presente estudo pela dificuldade do método de medição do grau de enchimento do moinho, tendo o equipamento que estar parado, diminuindo a produtividade, além da necessidade do acesso de pessoas no interior do moinho para a realização da medição, que expõe os operadores aos riscos ambientais existente de trabalho em altura e espaço confinado. Assim sendo, foi efetuado apenas dois ensaios de medições internas no equipamento.

Então, torna-se indispensável reavaliar os processos existentes buscando propor melhorias metodológicas para diminuir a exposição dos colaboradores aos riscos de segurança, evitar perda de produtividade, otimizar custos e determinar parâmetros essenciais para melhor eficiência da moagem do aglomerante hidráulico mais empregado na construção civil.

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo geral**

Avaliar o grau de enchimento dos corpos moedores em um moinho tubular industrial de cimento Portland.

### **2.1 Objetivos específicos**

- Dimensionar o moinho industrial e os corpos moedores;
- Determinar o grau de enchimento dos corpos moedores no moinho industrial;
- Avaliar as propriedades físicas de um cimento Portland pozolânico.

## **3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **3.1 HISTÓRIA DO CIMENTO PORTLAND**

Quando se estuda o contexto histórico do aglomerante mais empregado na construção civil (RIBEIRO; PINTO; STARLING 2002), há conflito de teorias, pois não se sabe ao certo quando o cimento surgiu (SILVA, 2016). Sousa (2016), relata a origem do cimento no Egito antigo, na Grécia e em Roma. Nesta época, empregava-se terras vulcânicas sob ação hídrica. Os primeiros compostos utilizados eram a cal, areia e a cinza vulcânica.

De acordo com a ABCP (2002), o marco no desenvolvimento do cimento foi consolidado pelo inglês John Smeaton em 1756, que por meio da calcinação de calcários moles e argilosos, obteve um produto de alta resistência. Em 1818, o francês Vicat alcançou resultados similares aos de Smeaton, através da mistura de componentes argilosos e calcários, com isso, passou a ser considerado o inventor do cimento artificial (CRUZ, 2009).

A Associação Brasileira de Cimento Portland (2002), descreve que o cimento Portland foi desenvolvido pelo construtor inglês Joseph Aspdin em 1824. Aspdin, produziu um pó fino, que quando hidratado e posteriormente seco, gerava uma mistura com alta resistência (BATTAGIN, 2016).

O cimento foi empregado na pavimentação de ruas entre 1915 e 1920, quando foi patenteado. A datar de 1929, Proctor correlacionou a existência entre umidade e peso específico aparente na compactação de solos. Este nexos propiciou o desenvolvimento do cimento para

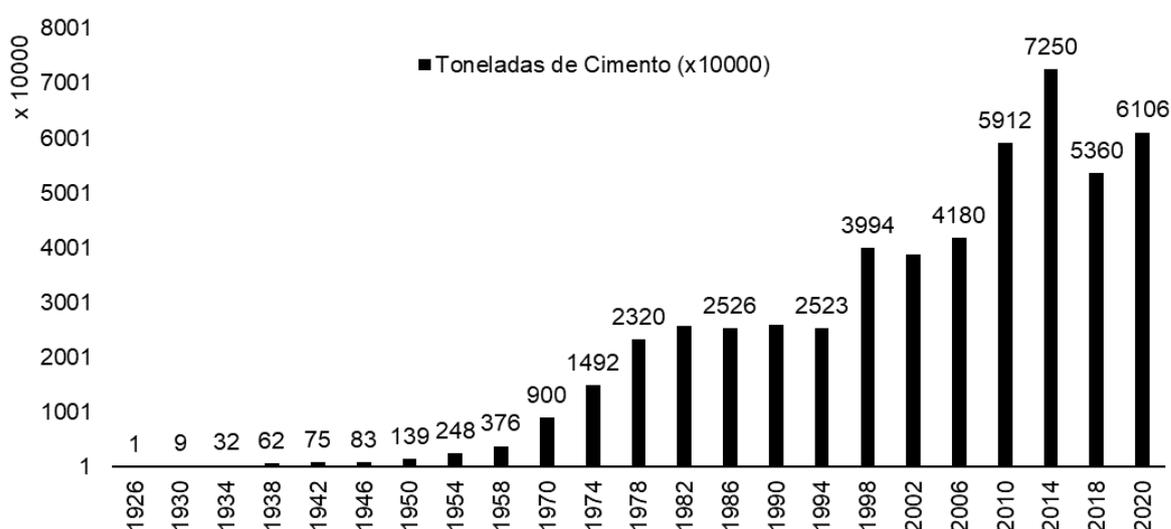
outras aplicações na construção civil, como, por exemplo, revestimento de canais, reservatórios, tijolos, blocos, dentre outros (SILVA, 2016).

No Brasil, até meados do século XIX, o material cimentício mais aplicado era a cal, em especial para o preparo de argamassas de assentamento ou de revestimento. Com a carência de tecnologias para o desenvolvimento do concreto, empregava-se tijolos cerâmicos maciços e/ou pedra nas estruturas das construções (MEDEIROS et al. 2019). Chaves (2005) descreve a indústria da cal como a precursora da produção cimenteira no Brasil.

Santos (2005) apresenta quatro variáveis que complexificam a solidificação da indústria cimenteira. Primeiro, a dependência de matérias primas nas proximidades das fábricas. Segundo, as reservas conhecidas de calcário afastadas dos estados com potencial de consumo. Terceiro, logística defasada, tornando o produto por vezes inviável. Por fim, a facilidade de importação do cimento sem tarifas alfandegárias, desencorajando os investidores.

Assim, a consolidação de uma indústria no Brasil deu-se no começo da década de 1930, com o início da operação de uma fábrica da Companhia Brasileira de Cimento Portland (CBCP), com capacidade produtiva de 60 mil toneladas e controle acionário 70% canadense e o restante nacional (SANTOS, 2011). Na Figura 1, tem-se a evolução da produção de cimento no Brasil.

Figura 1 – Evolução da produção cimenteira no Brasil.



Fonte: IPEADATA (<http://www.ipeadata.gov.br/>).

Org: Próprio autor, 2022.

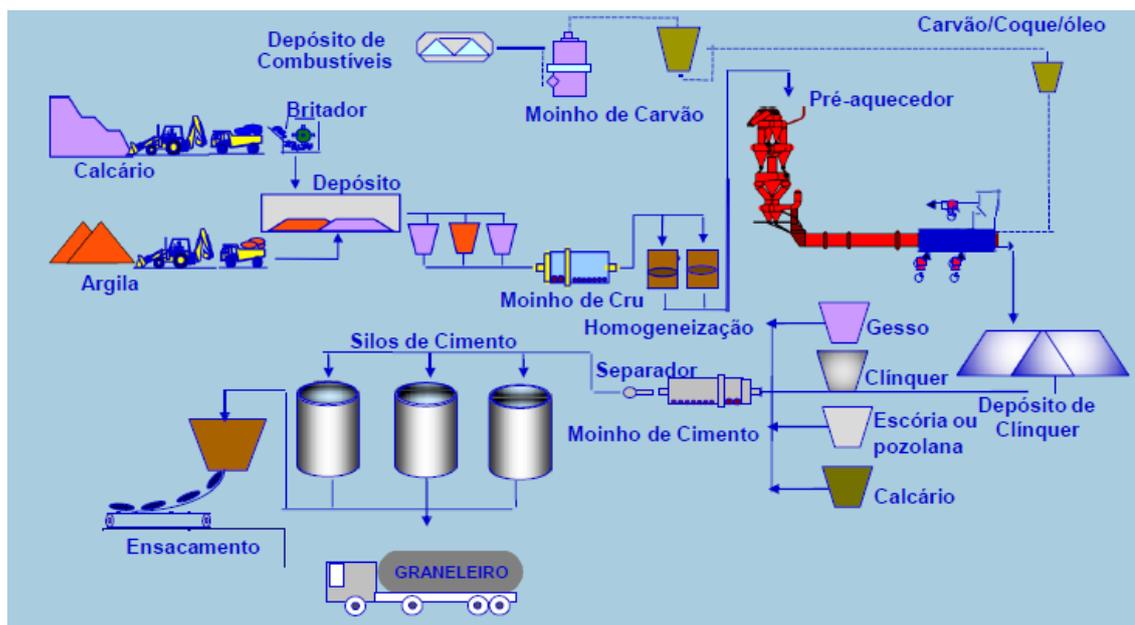
## 3.2 PROCESSO DE PRODUÇÃO DE CIMENTO

### 3.2.1 Clínquer Portland

O cimento é composto principalmente por clínquer Portland, matéria-prima resultante da calcinação próxima de 1450 °C de uma mistura de calcário, argila e eventuais corretivos químicos de natureza silicosa, aluminosa ou ferrífera utilizados dentro de proporções específicas para possibilitar a formação de compostos hidráulicos e conceder a propriedade ligante do cimento Portland (MARINGOLO, 2001).

Para se obter o clínquer Portland em escala industrial, desencadeia-se uma operação complexa que consiste na extração e britagem das matérias-primas, seguido da elaboração apropriada da mistura crua (farinha). Em outras palavras, moagem e homogeneização, com posterior queima em forno rotativo (CENTURIONE, 1993). Na Figura 2 pode ser observado o fluxograma da produção de cimento.

Figura 2 – Fluxograma da produção de cimento Portland.



Fonte: ABCP (2021).

A composição química do material para a produção do clínquer deve conter principalmente os seguintes óxidos:  $\text{CaO}$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  e  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ . Dificilmente, esses compostos serão encontrados em proporções adequadas em apenas uma rocha, dessa forma, torna-se necessário a correção com dois ou mais tipos de rochas. O calcário (75% a 80%) e a argila (20% a 25%) são as matérias primas comuns do clínquer. Em casos que um componente não se

fizer presente em frações adequadas, corrige-se com aditivos, como o minério de ferro, areia, bauxita, dentre outros (SATO, 2004).

### 3.2.2 Módulos de adição

Para a correção com aditivos, o gerenciamento das matérias-primas durante as operações industriais, se dá principalmente por meio de módulos químicos desenvolvidos empiricamente ao decorrer de décadas da evolução da indústria cimenteira, com objetivo de preservar, o mais contínuo possível, o quimismo da farinha e a homogeneidade do clínquer. Os módulos mais usados são o Fator de Saturação de Cal (SAC), o módulo de Sílica (MS) e o módulo de Alumina (MA) (CENTURIONE, 2005).

Fator de Saturação de Cal – FSC (Equação 1): Descreve a quantidade de óxido de cálcio capaz de reagir com os outros óxidos e gerar Silicato Tricálcio (C<sub>3</sub>S) no clínquer. Para valores altos, a farinha fica difícil de ser queimada, demandando maior consumo de combustível. O valor deste módulo deve ficar entre 90 e 100% em peso (BERNADO et al. 2010).

$$FSC = \frac{CaO * 100}{2,8SiO_2 + 1,2Al_2O_3 + 0,65Fe_2O_3} \quad (1)$$

Módulo de Sílica - MS (Equação 2): É a relação existente entre o teor de sílica e a soma dos teores de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Influencia na combustão da farinha, na criação de colagem no refratário do forno, na granulometria do clínquer e na fase líquida. Este módulo deve permanecer entre 2,3 e 2,7 (BERNADO et al. 2010).

$$MSC = \frac{SiO_2}{Al_2O_3 + Fe_2O_3} \quad (2)$$

Módulo de Alumina – MA (Equação 3): Caracteriza as frações de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> presente na matéria-prima. Valores baixos para este módulo possibilita viscosidade menores, facilitando a ocorrência de reações. Por outro lado, valores altos aumentam a viscosidade, dificultando as reações. Seu valor deve ficar entre 1,3 e 2,7 (BERNADO et al. 2010).

$$MA = \frac{Al_2O_3}{Fe_2O_3} \quad (3)$$

### 3.3 CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DO CIMENTO

#### 3.3.1 Resistência à compressão

A resistência de um material pode ser determinada como sua capacidade de suportar um determinado esforço de tensão sem que haja ruptura (ALVES, 2017). A resistência à compressão é uma das propriedades fundamentais ao cimento Portland. No Brasil ele é classificado de acordo com sua resistência mínima aos 28 dias de hidratação, podendo ter classes de resistência, C25, C32 e C40. Isso significa, que aos 28 dias após a hidratação, o material deverá ter compressão mínima de 25 MPa, 32 MPa e 40 MPa, respectivamente, mediante os ensaios estabelecidos na NBR 7215 (ABNT, 2019).

Mehta e Monteiro (2014) afirma que a formação das propriedades mecânicas do cimento está vinculada a reações químicas que ocorrem com sua hidratação, seguido do endurecimento da argamassa. Essas reações ocorrem quando os compostos do cimento ( $C_4AF$ ,  $C_3S$ ,  $C_2S$  e  $C_3A$ ) reagem com a água formando o hidróxido de cálcio ( $Ca(OH)_2$ ) e o silicato de cálcio hidratado (C-S-H) que, por ser um componente altamente resistente, torna-se o principal responsável pelas propriedades mecânicas do material.

De acordo com a NBR 16697:2018 o cimento Portland deve apresentar as seguintes resistências à compressão dispostas na tabela 1 em função de seu tipo de classe.

Tabela 1 – Requisitos de compressão mecânica para as classes de cimento.

Sigla	Classe	Resistências à compressão (MPa)			
		1 dia	3 dias	7 dias	28 dias
CP I	25	—	≥ 8,0	≥ 15,0	≥ 25,0
CP I-S					
CP II-E	32	—	≥ 10,0	≥ 20,0	≥ 32,0
CP II-F	40	—	≥ 15,0	≥ 25,0	≥ 40,0
CP II-Z					
CP III	25	—	≥ 8,0	≥ 15,0	≥ 25,0

CP IV	32	—	$\geq 10,0$	$\geq 20,0$	$\geq 32,0$
	40	—	$\geq 12,0$	$\geq 23,0$	$\geq 40,0$
CP V	ARI	$\geq 14,0$	$\geq 24,0$	$\geq 34,0$	—
CPB Estrutural	25		$\geq 8,0$	$\geq 15,0$	$\geq 25,0$
	32		$\geq 10,0$	$\geq 20,0$	$\geq 32,0$
	40		$\geq 15,0$	$\geq 25,0$	$\geq 40,0$
CPB Estrutural	—		$\geq 5,0$	$\geq 7,0$	$\geq 10,0$

Fonte: ABNT 16697:2018.

Org: Próprio autor, 2022.

### 3.3.2 Finura

A finura do cimento é uma propriedade física que é estabelecida no processo de moagem do clínquer combinado ao sulfato de cálcio (gesso), equivale à superfície disponível para a hidratação (NEVILLE, 2016).

A performance do cimento pode ser influenciada por sua composição química e por suas propriedades físicas como, por exemplo, sua finura (MEHTA E MONTEIRO, 2014). De acordo com Oliveira (2021), a finura é o aspecto que conduz a velocidade das reações de hidratação do cimento e apresenta sua preponderância em muitas qualidades da pasta, das argamassas e concretos.

Segundo Neville (2016) o aumento da finura faz com que haja aumento na disponibilidade de  $C_3A$ . Moon et al. (2017) reforçam que a presença de  $C_3A$  irá aumentar a densidade de produtos hidratados de cimento, podendo melhorar a densificação das estruturas dos poros que ocasiona um aumento da resistência à compressão. Grãos de alta finura tendem a reagir mais rapidamente e desenvolver maior resistência em menor tempo (ZAPARTE, 2020).

O índice de finura pode ser obtido experimentalmente através do que preconiza das normas ABNT NBR 11579 e ABNT NBR 16372. Na primeira, esse índice é obtido por meio da peneira  $75 \mu m$  (nº 200) e na segunda, obtém-se através do método de permeabilidade do ar (método de Blaine).

Ao se utilizar a NBR 11579, obter-se-á a relação entre a massa do material que está sendo ensaiado, cujas dimensões das partículas são superiores a malha de abertura da peneira (fração retida), e massa total, em porcentagem. Logo, o índice de finura do cimento pode ser obtido pela Equação 4:

$$I_F = \frac{r * F_C}{m} * 100 \quad (4)$$

onde:

$I_F$  = índice de finura do cimento (%);

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

$m$  = massa inicial do cimento (g);

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

Ao se utilizar a NBR 16372, é observado o tempo requerido para uma determinada quantidade de ar fluir através de uma camada de cimento compactada, de dimensões e porosidade especificadas. Sob condições normalizadas, a superfície específica do cimento é proporcional a  $t$ , onde  $t$  é o tempo para determinada quantidade de ar atravessar a camada compactada de cimento. Então, a superfície específica é alcançada pela Equação 5:

$$S = K \frac{\sqrt{\varepsilon^3} * \sqrt{t}}{\rho(1 - \varepsilon)\sqrt{0,1n}} * 100 \quad (5)$$

onde:

$S$  = superfície específica em massa ( $cm^2/g$ );

$K$  = constante do aparelho de Blaine (-);

$\varepsilon$  = porosidade da camada (-);

$t$  = tempo (s);

$\rho$  = massa específica do cimento ( $g/cm^3$ );

$n$  = viscosidade do ar à temperatura do ensaio ( $Pa^{0,5}/cm$ ).

É possível que essa metodologia de ensaio não conceda valores significativos fora do intervalo de 2000  $cm^2/g$  a 8000  $cm^2/g$  (ABNT, 2015). De acordo com a ABNT NBR 16697:2018 o cimento Portland deve apresentar os seguintes índices de finuras em função do seu tipo de classe, apresentados na tabela 2:

Tabela 2 – Finura para as classes de cimento.

<b>Sigla</b>	<b>Classe</b>	<b>Finura – Resíduo na Peneira 75 <math>\mu\text{m}</math> (%)</b>
CP I		
CP I-S	25	$\leq 12,0$
CP II-E	32	$\leq 12,0$
CP II-F		
CP II-Z	40	$\leq 10,0$
	25	$\leq 8,0$
CP III	32	$\leq 8,0$
CP IV	40	$\leq 8,0$
CP V	ARI	$\leq 6,0$
	25	$\leq 12,0^*$
CPB		
Estrutural	32	$\leq 12,0^*$
	40	$\leq 12,0^*$
CPB		
Estrutural	—	$\leq 12,0^*$

\* Resíduo na peneira 45  $\mu\text{m}$ .

Fonte: ABNT 16697:2018. Tabela 4 – Requisitos físicos e mecânicos.

Org: Próprio autor, 2022.

### 3.3.3 Tempo de pega

Conforme Bauer (2000), a ocorrência da pega do cimento compreende o desenvolvimento das propriedades mecânicas da pasta no início do processo de endurecimento, propriedades essencialmente físicas decorrentes a reação química de hidratação. A pega trata-se de um fenômeno designado como o instante em que a pasta atinge determinado aspecto impróprio a um trabalho, esse conceito, se compreende explicitamente quando a pasta de cimento é aplicada a argamassas e concretos (PEREIRA, 2017).

O gesso é o principal agente regulador no controle do tempo de pega, pois sua presença no cimento determinará o tempo de enrijecimento após sua mistura com água (ARAÚJO, 2019).

Esse controle ocorre porque o gesso atrasa a hidratação dos aluminatos tricálcicos ( $\text{C}_3\text{A}$ ), formando uma membrana ao seu redor, que ocasiona o retardo de sua hidrólise e como consequência o seu endurecimento. Caso não houvesse a gipsita como componente, o cimento

Portland endureceria quase que de imediato ao ser misturado à água, tornando-o inviável para uso em obras (ABCP, 2022).

Segundo a ABNT NBR 16697:2018, todas as classes de cimento Portland devem apresentar tempo de pega inicial  $\geq$  a 60 minutos por meio de ensaios preconizados pela ABNT NBR 16607:2018.

### 3.4 OPERAÇÃO UNITÁRIA DE MOAGEM

#### 3.4.1 Configurações de moinhos industriais

Moinhos industriais são moinhos constituídos de uma carcaça cilíndrica, com revestimento interno por placas de aço ou borracha (eventualmente com revestimento cerâmico), que giram sobre mancais em torno do seu eixo com uma carga moedora. Esta carga é elevada pela rotação da carcaça até o ponto onde caem sobre o material a ser fragmentado e sobre o restante das cargas que estão na parte inferior do tubo. Comumente, utiliza-se bolas, barras e *cylpebs* como meio moedor (LUZ, 2018).

A principal particularidade dos moinhos tubulares é a operação com corpos moedores, que apresentam tamanhos variados, pesados e de elevada dureza, quando comparado às partículas minerais. Todavia, ??? são pequenos em relação ao volume dos moinhos e abrangem menos da metade do volume do equipamento (ROWLAND, 1986).

Chaves (2003) relata que os fabricantes de moinhos desenvolvem estes equipamentos com diâmetros pré-definidos, pois, sob a ótica de construção, é mais viável alterar o comprimento do moinho, que é constituído de chapa calandrada e soldada. Já as tampas são produzidas de aço fundido que requerem moldes específicos e dessa forma, há um incremento significativo no custo de produção, uma vez que a disponibilidade desses moldes é restrita.

Segundo Wills (1977), a cominuição em moinhos tubulares é um evento entre partículas e corpos moedores, podendo ocorrer através da compressão, abrasão e impacto, tendo cada um desses mecanismos, influência direta no desempenho da moagem, na geração de ultrafinos e no desgaste dos corpos moedores. De acordo com Wills (1977) a cominuição nesses moinhos é impactada pelo tamanho e tipo do corpo moedor, o perfil de movimento e os espaços entre a carga moedora e o material a ser cominuído.

Outra característica de extrema relevância na composição dos moinhos tubulares são os mancais, pois suportam todo o conjunto rotativo, e são divididos em dois tipos principais:

mancais de deslizamento e mancais de rolamentos. Conforme Niemann (1971), não se pode afirmar uma superioridade de desempenho entre relação aos diferentes tipos de mancais, pois cada um apresenta suas singularidades, e nenhum desempenha todos os requisitos de uma determinada aplicação.

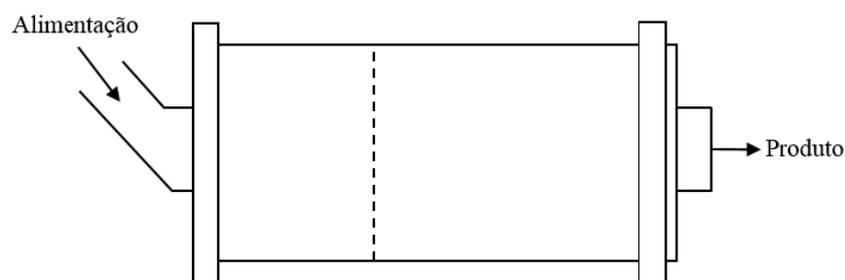
O acionamento desses moinhos se dá através de motores de alta potência acoplados a coroas ou pinhões. Chaves (2003) discorre que as coroas são fabricadas em duas metades, aparafusadas e montadas nas extremidades do equipamento de moagem. Para potências de até 400 HP, as coroas são fabricadas com dentes retos e helicoidais para potências superiores. Os pinhões são produzidos para ter dureza inferior as coroas e, em caso de desgaste dos dentes, compensa-se com eletrodos e depois re-usinado.

No *OPEX* das unidades de moagem, uma das principais variáveis nas despesas operacionais é o consumo energético dos moinhos. Wellenkamp (1999) explica que otimizações podem ser implantadas aos moinhos tubulares, de maneira a performar sua eficiência energética, como o emprego de moinhos multicâmaras, nos quais a carga moedora pode ser combinada à granulometria do material ou com a implementação de revestimentos classificadores.

### 3.4.2 Circuitos de moagem

O processo de moagem pode ser operado em dois tipos de circuitos, fechado ou aberto. No primeiro, deseja-se o produto com granulometria especificada, ou seja, exatidão na classificação do material, utilizando-se equipamentos classificadores (como por exemplo, os ciclones e peneiras vibratórias). Conforme Wills et al. (2006), o circuito aberto (Figura 3) qualifica-se por uma única passagem da matéria-prima através do moinho, não sendo necessário classificações específicas para os processos posteriores.

Figura 3. Circuito aberto de moagem.

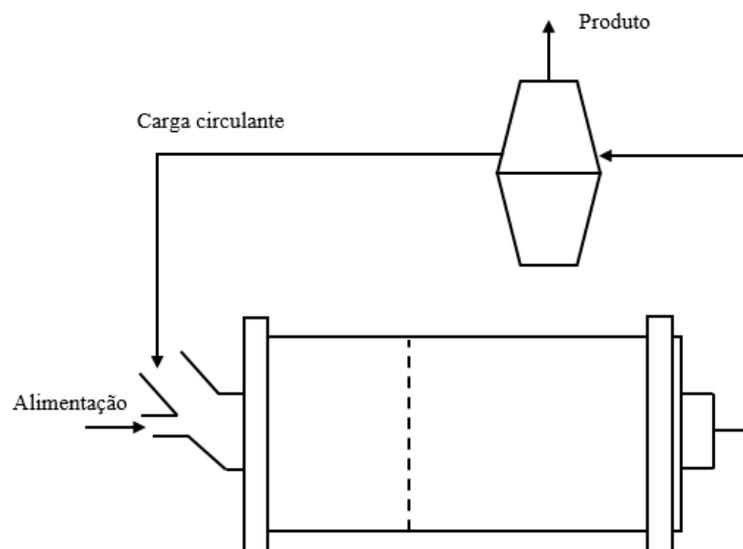


Fonte: Próprio autor (2022).

Desta forma, Wills et al. (2006) afirmaram que este tipo de circuito é dificilmente utilizado em processo mineral, pois além de não se ter controle sobre a granulometria do material, ainda, é requerido uma baixa taxa de alimentação de modo que o tempo de residência do material no moinho seja suficiente para a cominuição desejada, como consequência, há a produção excessiva de finos e o consumo ineficiente de energia.

Diferentemente do circuito aberto, no fechado, o material grosseiro (“oversize”) retorna ao moinho o quanto for necessário para que se alcance a granulometria desejada. Em vista disto, a alimentação total do moinho é constituída por uma alimentação nova (Figura 4), que ainda não passou pelo moinho, e por uma quantidade que já passou pela moagem e que ainda não atingiu a granulometria especificada para o produto, denominada de carga circulante.

Figura 4. Circuito fechado de moagem.



Fonte: Próprio autor (2022).

Chaves et al. (2006) definem a carga circulante como um artifício utilizado para acertar a distribuição granulométrica do produto do moinho, ou seja, aumentando-se a carga circulante, aumenta-se a quantidade de material que passa pelo moinho, diminuindo o tempo de residência de cada partícula dentro dele, gerando, conseqüentemente, uma redução de finos. A presença de maior número de partículas faz com que o efeito da carga sobre as partículas seja amortecido (“cushioning effect”), o que também contribui para diminuir a geração de finos. Isso também diminui a sobremoagem e aumenta a energia disponível para a moagem de partículas mais grossas.

Baseada no Manual Técnico Cimento Itau, a tabela 3 apresenta uma comparação entre os dois circuitos de moagem de cimento Portland.

Tabela 3 – Comparativo entre circuitos de moagem de cimento Portland.

<b>Circuito aberto</b>	<b>Circuito fechado</b>
Menor custo de inversão e espaço ocupado.	Maior flexibilidade operacional.
Maior tendência à formação de coating.	Maior controle sobre finura e granulometria.
Sistema mais viável para blaines até 320 m <sup>2</sup> /kg.	Para blaines > 350 m <sup>2</sup> /kg, menor consumo específico.
Curva granulométrica de distribuição das partículas com pequena inclinação.	Distribuição granulométrica das partículas mais estreitas.

Fonte: Manual ITAU (2012).

### 3.5 COMINUIÇÃO

Conforme Fuerstenau et al. (2002), a cominuição de minérios, rochas e cimentos consome de forma significativa tanto energia elétrica como também grandes quantidades de aço, devido ao desgaste da mídia de moagem e revestimentos dos moinhos. Segundo Tromans (2008), 29,3% do consumo energético no beneficiamento e processamento nas operações de mineração nos Estados Unidos, são devidos à cominuição. De acordo com Parapari (2020), a cominuição de matérias-primas minerais e clínquer para cimento consome 3% da eletricidade gerada no mundo.

Nas operações de moagem, o fenômeno de fragmentação mineral resulta da combinação de três componentes principais: o impacto, a compressão e a abrasão. Cada componente apresenta diferente eficiência no seu aproveitamento energético sobre o minério, cuja ação é executada por diversos tipos de corpos moedores (bolas de ferro, de aço ou de porcelana, barras de ferro, “pebbles” do próprio minério etc.) que depende também da viscosidade do meio em que atuam e de outras inúmeras variáveis (YOVANOVIC, 1973).

Segundo Parapari (2020), o mecanismo de quebra por impacto é ocasionado quando a carga é aplicada perpendicular à partícula, e a energia empregada é um múltiplo da necessária para a quebra. Dessa maneira, a partícula sofre uma carga maior do que a resistência da partícula, fator necessário para a fratura. Para as operações de moagem, a intensidade de impacto está vinculada na energia transferida ao corpo moedor, através do levantamento da carga moedora que é gerada pela rotação do moinho e auxiliada pelo perfil de revestimento.

A quebra por abrasão é causada pela carga tangencial ou pela energia insuficiente da carga aplicada e as forças atuantes são paralelas à superfície. Roufail et al. (2011) definem abrasão como um efeito de esfregar ou aparar um material. De acordo com Palaniandy et al. (2008) afirmam que a abrasão é caracterizada pela formação de finos e não há mudanças perceptíveis no diâmetro médio das partículas de alimentação.

Por sua vez, a quebra por compressão ocorre quando a partícula é pressionada por dois corpos moedores, duas ferramentas ou entre o meio moedor e a máquina de cominuição (WANG, 2012). Quando as partículas começam a sofrer compressão entre duas superfícies, a energia potencial é transformada em energia elástica. Em materiais frágeis, a energia elástica é armazenada na rede cristalina e, à medida que atinge um valor crítico, forma-se microfissuras nas ligações interatômicas (EVERTSSON, 2000).

### 3.5.1 Teorias da cominuição

Como mencionado anteriormente, o processo de cominuição, especialmente a moagem, é um dos maiores consumidores de energia elétrica nas indústrias de mineração e processamento mineral, devido à baixíssima eficiência energética do processo (NAPIER-MUNN, 2015). Assim, ao decorrer dos anos, o nexos entre o consumo de energia e a granulometria dos materiais foi extensamente pesquisada, pois elevados custos operacionais e esforços mecânicos aos quais os equipamentos são submetidos, modulam as despesas de operação. Beraldo (1987) observa que na prática a relação entre a granulometria das partículas e o consumo energético é inversamente proporcional a uma função-potência do diâmetro, como demonstrado na Equação 6:

$$dE = -K \frac{dx}{x^n} \quad (6)$$

onde:

$E$  = energia aplicada a uma massa unitária do material;

$x$  = diâmetro das partículas;

$K$  e  $n$  = constantes dependentes do material.

### 3.5.2 1ª lei da cominuição

A Lei de Rittinger ou Primeira Lei da Cominuição foi postulada por Peter Ritter Von Rittinger, que em 1867, estabeleceu que a energia consumida durante a cominuição e o incremento de superfície específica gerada por redução da granulometria é diretamente proporcional à nova superfície gerada (BUDKE et al, 2011). Esta relação pode ser expressa através da Equação 7.

$$E = k_1 \left( \frac{1}{P} - \frac{1}{F} \right) \text{ ou } E = k_1 (S_1 - S_0) \quad (7)$$

onde:

$E$  = energia específica (kWh/t);

$K$  = fator de proporcionalidade ou fator característico do material;

$S_1$  = área do produto;

$S_0$  = área inicial;

$P$  = tamanho do produto;

$F$  = tamanho de alimentação.

### 3.5.3 2ª lei da cominuição

A Lei de Kick pode ser deduzida com base na teoria da análise de tensões durante as deformações do sólido no regime elástico (GOMIDE, 1983). De acordo com essa lei, o trabalho requerido é proporcional à redução em volume das partículas envolvidas (BUDKE et al, 2011). A Equação 8 demonstra esse postulado.

$$E = K * \log \left( \frac{D_0}{D_1} \right) \quad (8)$$

onde:

$E$  = energia específica (kWh/t);

$K$  = constante do material;

$D_0$  = diâmetro inicial;

$D_1$  = diâmetro final;

### 3.5.4 3ª lei da cominuição

Bond [] percebeu a necessidade de elaborar uma lei empírica, haja vista que a primeira lei e segunda lei de cominuição não enquadravam todos os casos encontrados na prática e na indústria, sendo necessários alguns critérios para classificar os materiais tendo em consideração as 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 como tamanho a abertura da peneira pela qual passa 80% do material (BUDKE et al, 2011). A Equação 9 representa matematicamente esta lei.

$$E = 10WI * \left( \frac{1}{\sqrt{P80}} - \frac{1}{\sqrt{A80}} \right) \quad (9)$$

onde:

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

WI = índice de trabalho (Work Índex);

P80 = abertura da peneira, em micrômetros (um), através da qual passa 80% da massa do produto;

A80 = abertura da peneira, em micrômetros (um), através da qual passa 80% da massa de alimentação.

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).

## 3.6 FATORES QUE AFETAM A MOAGEM

### 3.6.1 Função e revestimento das câmaras

A moagem de clínquer para produção de cimento é constantemente processada em um moinho de bolas de duas câmaras. Na primeira câmara e mais curta, a alimentação bruta é cominuída utilizando-se mídia composta por grandes bolas, o material moído nessa câmara sai através de um diafragma intermediário e entra na segunda câmara mais longa onde são empregadas bolas menores, para moer o material do produto mais fino (CLEARY, 2009; MAGOTTEAUX, 2022). Ou seja, a primeira câmara tem a função de preparar o material para a segunda completar o processo.

As câmaras apresentam suas particularidades e para diferentes processos, critérios de seleção serão empregados para a escolha dos revestimentos dessas. De acordo com Magotteaux

(2022), as seguintes condições operacionais dispostas no quadro 1 devem ser analisadas para escolha do perfil ideal de um moinho com duas câmaras.

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

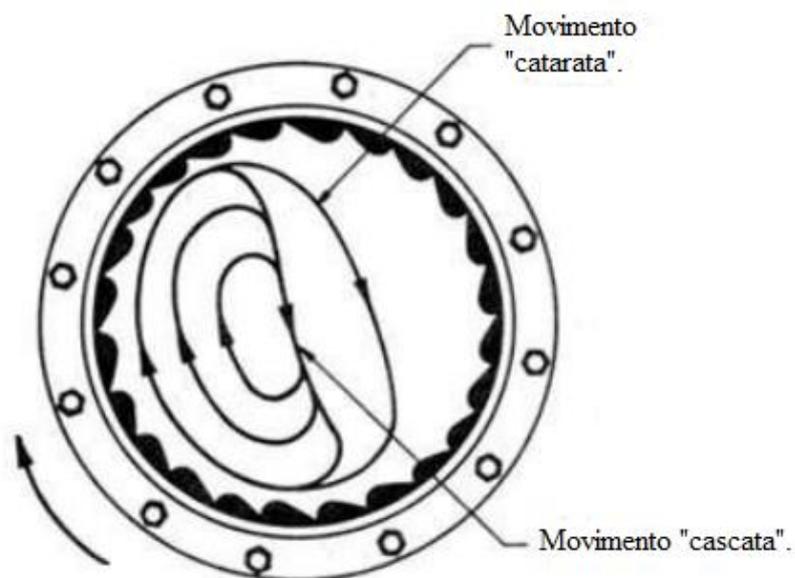
1ª câmara – perfil levantador	2ª câmara – perfil classificador
Poder de levantamento necessário;	Diâmetro do moinho;
Agressividade do moinho quanto ao impacto;	Grau de enchimento;
Abrasividade do material a moer;	Abrasividade do material a moer;

Fonte: Manual ITAU (2012).

### 3.6.2 Velocidade crítica

A velocidade de operação e o nível de enchimento interferem o movimento da carga dentro do moinho. Quando em baixas rotações por minutos e alta fração de enchimento, a carga desliza sobre ela mesma, fenômeno denominado por Taggart (1951) como “cascata”. Por outro lado, se há uma elevação progressiva da rotação e diminuição do nível de enchimento, os corpos moedores são lançados em trajetórias parabólicas, fenômeno intitulado como “catarata”. A Figura 5 ilustra ambos os movimentos:

Figura 5 – Movimento da carga no interior do moinho.



Fonte: Austin e Klimpel (1964).

A velocidade crítica de rotação do moinho refere-se ao valor teórico a partir do qual os corpos moedores esféricos se aderem ao revestimento do equipamento de moagem. Esse fenômeno se dá pelo efeito da força centrífuga, e em função disso não exercem cominuição sobre o material em processo. Nos moinhos industriais, a velocidade efetiva de operação é estabelecida como uma fração da velocidade crítica, e deriva principalmente do diâmetro do equipamento, conforme a Equação 10 a seguir:

$$V_c = \frac{42,305}{\sqrt{D}} \quad (10)$$

onde:

$V_c$  = velocidade crítica do moinho (rpm);

$D$  = diâmetro do moinho interno ao revestimento (m).

### 3.6.3 Composição e desgaste de corpos moedores

O consumo energético, bem como a potência de operação do moinho é uma variável dependente da carga moedora. A composição dessa carga será estimada de acordo com os parâmetros operacionais do circuito de moagem e do produto desejável. Conforme Magotteuax (2022), normalmente o peso médio de um corpo esférico na primeira câmara é de 1500 a 1800 gramas e na segunda câmara é de 30 a 50 gramas, a depender do tipo de cimento, finura desejada e do separador existente. Para moagem de cimento Portland, geralmente utiliza-se na primeira câmara bolas com diâmetros entre Ø 60 – 90 mm, e Ø 30 – 50 mm. para o segundo compartimento.

No decorrer da utilização dos corpos moedores, haverá um desgaste progressivo, o que impactará na eficiência do circuito de moagem. Dessa forma, há a necessidade de constante avaliação do desgaste para reposição da carga operacional, sendo um dos principais aspectos no custo de processamento de minérios.

Segundo Chaves (2012), existem diversas maneiras nas quais o desgaste pode ocorrer, dentre elas, está o desgaste metal versus metal, isto é, o contato entre dois corpos moedores, sem minério entre eles, que desenvolverá áreas desgastadas. Outra forma de desgaste se dá por riscamento quando partículas de elevada dureza riscam a superfície das bolas levantando material paralelamente à direção do movimento. Além disso, há também o desgaste por erosão, onde a trajetória das partículas finas sobre a superfície vai polindo-a e erodindo-a (CHAVES, 2012). Na Figura 6, pode-se observar alguns corpos moedores em estado de desgaste.

Figura 6 – Desgaste de corpos moedores.



Fonte: Austin e Klimpel (1964).

## 4 MATERIAL E MÉTODOS

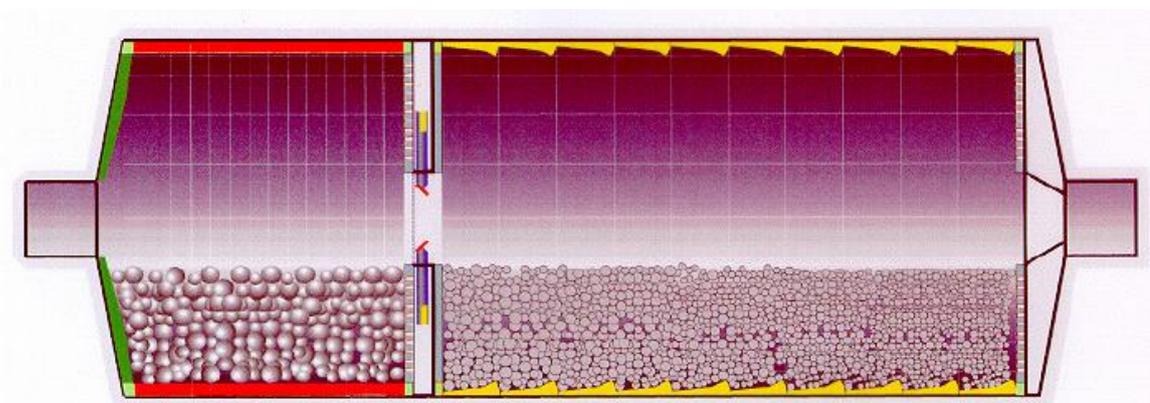
### 4.1 LOCAL DA PESQUISA

O presente estudo foi desenvolvido em uma fábrica de moagem de Cimento Portland no distrito industrial da Área Metropolitana de São Luís - MA.

### 4.2 EQUIPAMENTO DE ESTUDO E FERRAMENTAS UTILIZADAS

Este estudo foi desenvolvido com um moinho de bolas da fabricante Fives – FCB, com capacidade nominal para 77 ton/h de cimento. O moinho em estudo é compartimentado em duas câmaras como mostrado na Figura 7.

Figura 7 – Esquema interno de um moinho de cimento com duas câmaras.



Fonte: (MAGOTTEAUX, 2022).

Material caracterizado e equipamentos utilizados:

- Cimento Portland CP IV – 32;

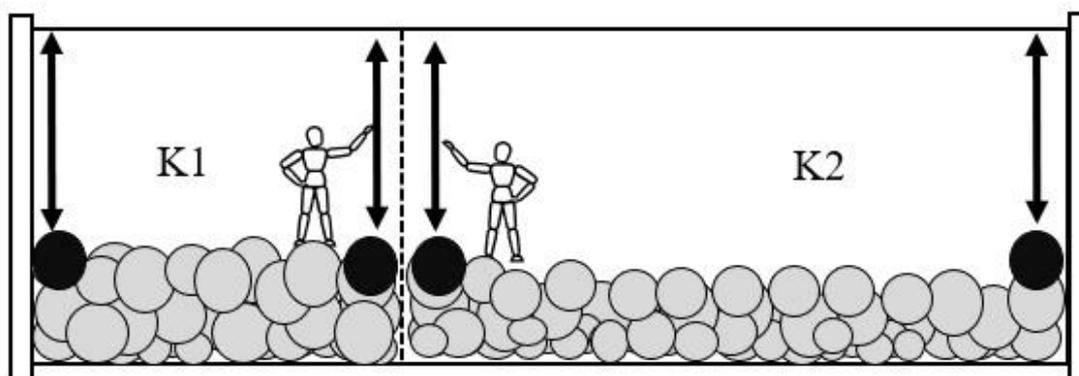
- Peneirador aerodinâmico;
- Aparelho de Blaine;
- Dinatete *FORNEY*;
- Peneiras 75  $\mu\text{m}$ ;
- Trena graduada;

#### 4.3 AVALIAÇÃO MÉTRICA DO MOINHO

Para o desenvolvimento deste trabalho foi utilizado o método convencional de medição de moinhos de bolas que consiste na entrada de no mínimo duas pessoas para o interior do equipamento, onde, com auxílio de trenas e/ou lasers, afere-se as métricas necessárias conforme planejamento experimental e metodologia abordada (Figura 8). As medições só foram realizadas após uma análise cuidadosa dos riscos de segurança conforme a normativa NR 33 – Segurança e saúde nos trabalhos em espaços confinados (2006), bem como em horários com paradas programadas para evitar custos de perda de produção. As duas câmaras do moinho em estudo foram nomeadas como:

- K1 – primeira câmara;
- K2 – segunda câmara.

Figura 8 – Medições de H nas entradas e saída das câmaras.



Fonte: Próprio autor (2022).

Utilizando a fórmula descrita na proposta por Napier et al. (1996), considerou-se as dimensões de cada câmara e efetuou-se as medidas de H visando obter uma estimativa rápida do grau de enchimento (GE). De outro modo, aplicando o manual de medição de carga moedora da Magotteaux, efetuou-se medições de H nas entradas e despache de K1 e K2. Para maior

representatividade dos resultados, foi feita uma análise visual do perfil de distribuição da carga moedora com o propósito de posicionar uma bola nos pontos em que será aferido as medidas, tendo então uma altura de carga que represente a distribuição dos demais corpos esféricos ao logo da câmara, como pode ser observado na Figura 9.

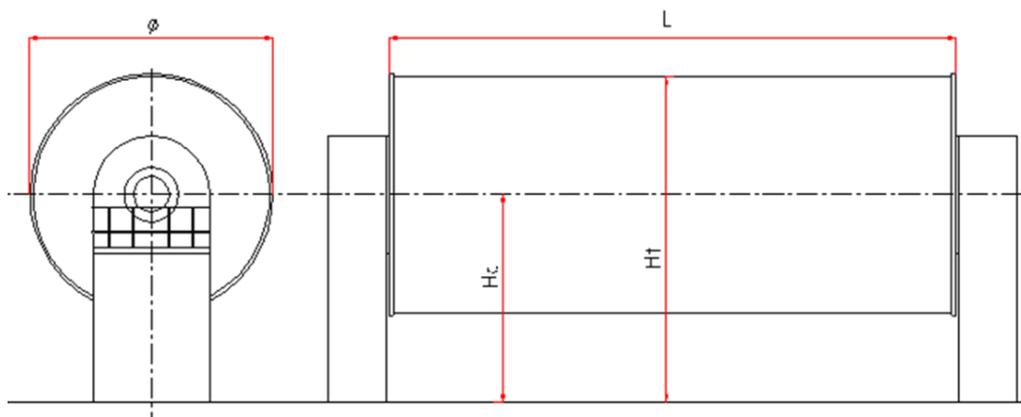
Figura 9 – Posicionamento de corpo moedor para medição.



Fonte: Próprio autor (2022).

A altura total ( $H_t$ ) do moinho corresponde à distância do plano cujo moinho está instalado, até o seu topo, e a altura do centro ( $H_c$ ) é a distância do plano de instalação ao centro do equipamento, como se observa na Figura 10.

Figura 10 – Esquema de dimensões do moinho.



Fonte: Próprio autor (2022).

Na Figura 10, tem-se a representação da medida do comprimento externo do

equipamento, para obtenção dos resultados a serem discutidos, bem como a aferição das dimensões internas. Para obtenção do comprimento total interno, mediu-se  $L_{iK1}$  e  $L_{iK2}$  como mostrado na Figura 11. Através da Equação 11, obteve-se  $L_i$ .

$$L_i = L_{iK1} + L_{iK2} \quad (11)$$

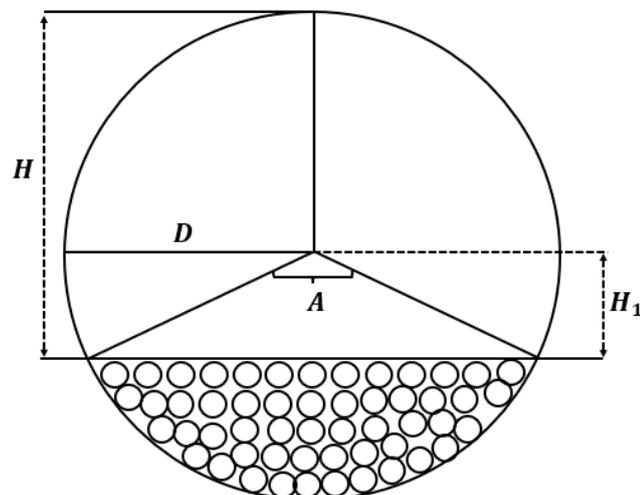
Figura 11 – Medição dos comprimentos internos.



Fonte: Próprio autor (2022).

Para o cálculo do grau de enchimento, foi mensurado as medidas conforme demonstra o esquema da Figura 12.

Figura 12 – Medidas geométricas da carga no moinho.



Fonte: Próprio autor (2022).

#### 4.4 ESTUDO DAS CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DO MOINHO E DO CIMENTO

Nesta etapa foram medidas e avaliadas as características físicas do processo no moinho de bolas:

- Diâmetro médio dos corpos moedores;
- Densidade das esferas;
- Composição das bolas;
- Velocidade crítica;

Como complemento foram também investigadas as características físicas do cimento processado. A metodologia utilizada para obtenção desses parâmetros foi conforme preconiza as normas ABNT NBR 12826:2017, 16372:2015, 7215:2019.

- Finura;
- Superfície específica;
- Resistência;

#### 4.5 CÁLCULO DO GRAU DE ENCHIMENTO

Para o cálculo do grau de enchimento da seção cilíndrica, dispõe-se das Equações de 12 a 16, obtidas no manual técnico da Magotteaux.

$$S_T = \frac{\pi Di^2}{4} \quad \text{Equação (12)}$$

$$H_1 = H - \frac{Di}{2} \quad \text{Equação (13)}$$

$$A = 2 \arccos \left( \frac{2H_1}{Di - 2e} \right) * 57,2956 \quad \text{Equação (14)}$$

$$S_1 = \frac{Di^2}{8} \left( \frac{\pi A}{180^\circ} - \text{sen}A \right) \quad \text{Equação (15)}$$

$$GE = \frac{S_1}{S_T} * 100 \quad \text{Equação (16)}$$

onde:

$S_T$  = área total interna ao revestimento [m<sup>2</sup>];

$D_i$  = diâmetro interno do moinho [m];

$H_1$  = profundidade máxima da carga [m];

$H$  = altura livre da carga moedora [m];

$A$  = ângulo do setor circular formado pela superfície exposta da carga [°];

$S_1$  = área ocupada pela carga [m<sup>2</sup>]

$GE$  = grau de enchimento da seção cilíndrica [%].

Como visto na Figura 8 e no método descrito, obteve-se quatro pontos para  $H_1$ , e, portanto, quatro medidas de  $GE$ , sendo duas em cada câmara, os índices “e” e “s” indicam que as medições se referem a entrada e saídas das câmaras dos moinhos respectivamente.  $GE_{e,K1}$ ,  $GE_{s,K1}$  para a primeira câmara e  $GE_{e,K2}$ ,  $GE_{s,K2}$  para a segunda câmara. O grau de enchimento total do moinho será obtido por uma média aritmética simples dos parâmetros descritos acima, conforme a Equação 17.

$$GE = \frac{GE_{e,K1} + GE_{s,K1} + GE_{e,K2} + GE_{s,K2}}{4} \quad \text{Equação (17)}$$

Onde:

$S_T$  = área total interna ao revestimento [m<sup>2</sup>];

$D_i$  = diâmetro interno do moinho [m];

$H_1$  = profundidade máxima da carga [m];

$H$  = altura livre da carga moedora [m];

$A$  = ângulo do setor circular formado pela superfície exposta da carga [°];

$S_1$  = área ocupada pela carga [m<sup>2</sup>]

$GE$  = grau de enchimento da seção cilíndrica [%].

Napier et al. (1996) sugeriram a Equação 18 para o cálculo do grau de enchimento que leva em consideração a distância entre a superfície da carga e o topo do revestimento interno.

$$GE = 113 - \left( \frac{H}{Di} * 126 \right) \quad \text{Equação (18)}$$

onde:

$H$  = distância vertical entre o topo e a superfície da carga [m]

$Di$  = diâmetro interno do moinho, interno ao revestimento [m]

Ao se aplicar a Equação 18, necessita-se de um  $H$  médio, pois através deste, tem-se uma medida de maior representatividade ao longo da seção cilíndrica.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1 RESULTADOS DA AVALIAÇÃO MÉTRICA DO MOINHO

Foi realizado a medição das dimensões externas e internas do moinho em estudo com auxílio de trenas conforme os esquemas apresentados nas Figuras 10 e 11. Os dados aferidos estão na tabela 4:

Tabela 4 – Dimensões do moinho.

Dimensões	(m)
$L_e$	$13,40 \pm 0,05$
$L_i$	$12,68 \pm 0,05$
$D_e$	$4,20 \pm 0,05$
$D_i$	$4,00 \pm 0,05$
$H_c$	$5,30 \pm 0,05$
$H_t$	$7,40 \pm 0,05$

Fonte: Próprio autor (2022).

Nota-se que as medidas externas são maiores do que as internas, isso deve aos componentes internos (Figura 13) do equipamento. Entre  $D_e$  e  $D_i$  há os revestimentos com espessuras de 100 a 200 mm para cada câmara, e entre  $L_e$  e  $L_i$ , há a presença do diafragma intermediário e das emendas na entrada e saída do moinho. Além do citado, Araújo (2011) aponta desvios nas medições internas do moinho devido ao possível desgaste aos qual os revestimentos estão sujeitos. Outro ponto que pôde ser discutido é a relação L/D que está na

faixa ótima de dimensionamento de acordo com os estudos de Paxton (2010), em que foi comparado o consumo específico de energia e a eficiência para vários moinhos de cimento, alcançando uma relação L/D entre 2,5:1 e 3,0:1.

Figura 13 – Componentes internos do moinho.



Fonte: Magotteuax (2022).

Além das dimensões estabelecidas no moinho, as proporções estabelecidas entre as medidas características  $L_i/L_e$ ,  $D_i/D_e$ ,  $H_c/H_t$  encontra-se em conforme parâmetros estabelecidos pelas normas técnicas de segurança para equipamento de moagem industrial (DIN-ISO no.: 2768-2, 2013). Isto assegura que exista um correto funcionamento na carcaça do moinho quando houver movimento axial pelas bolas e carga de material, onde são exercidas forças de cisalhamento e tensão de forma constante.

No caso do moinho de estudo, como há duas câmaras, K1 e K2, e existe uma operação contínua, com entrada e saída do produto, é definido por alguns especialistas (NUNAN; DELBONI-JUNIOR, 2017; GOMES et al., 2016; LAMECK, 2005) que existe uma zona morta no centro do moinho, sendo essa, uma posição de equilíbrio alcançada pelo material e ar provenientes das duas extremidades do próprio moinho, resultando em um acúmulo de material, que então atua como uma almofada que reduz o impacto da bola e o desgaste no centro do equipamento.

## 5.2 RESULTADOS DO CÁLCULO DO GRAU DE ENCHIMENTO

### 5.2.1 Cálculo do grau de enchimento na K1

Para o cálculo do grau de enchimento na K1, aplicou-se as Equações 12 a 16. As medidas  $e$ ,  $d$  e  $h$  apresentadas na tabela 5 foram mensuradas internamente, podendo também serem chamadas de dimensões úteis. Os valores apresentados nas tabelas 5 e 7 são resultados de uma média de duas medições, devido à um erro de  $\pm 50$  mm ser considerado comum devido aos equipamentos utilizados nas medições, bem como à configuração da carga moedora durante os ensaios.

Tabela 5 – Medições na K1.

	K1 – Entrada (mm)	K1 - Saída (mm)
$d$	1270	1200
$h$	1330	1240
$D$	4050	4050
$2e$	150	150

Fonte: Próprio autor (2022).

A profundidade máxima da carga foi obtida através da Equação 13. Na entrada da primeira câmara obteve-se uma profundidade de 695 mm e no despacho 640 mm, evidenciando uma concentração de carga maior no final da câmara, conseqüentemente, um grau enchimento maior no despacho. Calculado  $H_{e,K1}$  e  $H_{s,K1}$ , foi possível determinar o ângulo do setor circular formado pela superfície exposta da carga, área ocupada e fração de enchimento. Os resultados são mostrados na tabela 6.

Tabela 6 – Cálculo do GE na K1.

	Entrada		Saída
$H_{e,K1}$	695,00 mm	$H_{s,K1}$	640,00 mm
$A_{e,K1}$	138,24°	$A_{s,K1}$	141,68°
$S_{e,K1}$	3,58 m <sup>2</sup>	$S_{s,K1}$	3,79 m <sup>2</sup>
$S_t$	12,88 m <sup>2</sup>	$S_t$	12,88 m <sup>2</sup>
$GE_{e,K1}$	27,79 %	$GE_{s,K1}$	29,43 %

Fonte: Próprio autor (2022).

A partir de uma média entre os dois GE apresentados na tabela 6, estimou-se um grau de enchimento igual a 28,61% para a primeira câmara de moagem. Em seus estudos, Araujo (2011)

demonstrou uma diferença de 50 mm entre as profundidades de carga próximo a alimentação e a descarga, semelhante ao que foi encontrado neste trabalho ao comparar-se  $H_{e,K1} = 695,00$  mm com  $H_{s,K1} = 640,00$  mm. Logo, mesmo que com pequenas diferenças nas medições diretas, observa-se uma variação maior que 5,00% entre os GE apresentados e maior que 8,00% para as profundidades de carga ao utilizar-se o método tradicional, o que implica em um desvio alto ainda que com apenas duas medidas. Nesse compartimento os corpos moedores são expressivamente maiores que no segundo, dessa forma, ter-se-á maior irregularidades na superfície da carga.

### 5.2.2 Cálculo do grau de enchimento na K2

A discussão feita para os resultados da primeira câmara, são aplicáveis na segunda. Os dados das medições são apresentados na tabela 7 e os resultados dos cálculos a partir desses dados são mostrados na tabela 8.

Tabela 7 – Medições na K2.

	K2 – Entrada (mm)	K2 - Saída (mm)
d	1200	1200
h	1355	1340
D	4100	4100
2e	100	100

Fonte: Próprio autor (2022).

A priori, já pode ser observado uma diferença entre os diâmetros úteis de K1 e K2, isso é justificado em função dos perfis de revestimentos, haja vista que são de dimensões e modelos diferentes para atender as necessidades do processo, como mostrado nas Figuras 14 e 15. Aplicando a Equação 12, tem-se que a área superficial total de K1 equivale a 12,88 m<sup>2</sup>, valor menor quando comparado a área superficial total de K2 que é igual a 13,20 m<sup>2</sup> (tabela 8).

Figura 14 – Perfil Duostep Magotteuax em K1.



Fonte: Próprio autor (2022).

Figura 15 – Perfil Classoline Magotteuax em K2.



Fonte: Próprio autor (2022).

Tabela 8 – Cálculo do GE na K2.

Entrada		Saída	
$H_{e,K2}$	755,00 mm	$H_{s,K2}$	740,00 mm
$A_{e,K2}$	135,64°	$A_{s,K2}$	136,57°
$S_{e,K2}$	3,51 m <sup>2</sup>	$S_{s,K2}$	3,56 m <sup>2</sup>
$S_t$	13,20 m <sup>2</sup>	$S_t$	13,20 m <sup>2</sup>
$GE_{e,K2}$	26,59 %	$GE_{s,K2}$	26,97 %

Fonte: Próprio autor (2022).

Diferentemente dos GE encontrados na K1, bem como nas medições da profundidade da carga, notou-se aqui menores discrepâncias entre esses valores. Enquanto na K1 a variação entre as profundidades de carga era de 8,59% na alimentação e despacho, em K2 essa diferença é reduzida para 2,03%, comprovando que com um diâmetro médio das esferas menor nesse compartimento, obtém-se uma superfície mais regular, e dessa forma, melhor precisão nas medidas. Outro indicador da descrição anterior, são os resultados obtidos para os graus de enchimento, cuja variação percentual está em apenas 1,43% versus 5,90%. Diante dos dados expostos pode-se estabelecer um grau de enchimento médio na segunda câmara igual a 26,78%, e aplicando a Equação 17, efetiva-se uma fração de enchimento total do moinho igual a 27,69%, o que, de acordo com a avaliação de Florencio (2015), está abaixo das condições operacionais comuns para o tipo de moinho em estudo, que seria uma fração variando entre 30 e 45%. Isto posto, importante ressaltar que em frações abaixo dessa margem perde-se a eficiência da moagem e aumenta-se o desgaste dos revestimentos mediante os fenômenos de cominuição apresentados por Parapari (2020), sobretudo no impacto entre os corpos moedores e corpos moedores com os revestimentos.

### 5.3 RESULTADOS DAS CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DO MOINHO E DO CIMENTO

#### 5.3.1 Diâmetro médio dos corpos moedores e densidade da carga

Em continuidade à análise experimental proposta pelo presente trabalho, os resultados do diâmetro médio dos corpos moedores e a densidade aparente da carga serão apresentados. Na primeira câmara, mediu-se corpos esféricos com diâmetros variando entre 50 e 90 mm e na segunda câmara, bolas entre 15 e 50 mm. Nos limites inferiores, nota-se diâmetros abaixo do prescrito como ideal por Cleary (2009) para moagem de cimento em moinhos de duas câmaras. Entretanto, isso é justificado devido ao desgaste da carga moedora, fenômeno característico de moagem a seco.

Essa análise torna-se importante, por dois motivos principais: num primeiro momento, durante a realização do estudo foi encontrado contaminação das cargas, corpos metálicos sem forma definida com 180 mm na K1 e corpos esféricos com 90 mm na K2. Isso é um indicativo de que havia grelhas internas ausentes no diafragma, sendo um problema, já que durante o processo de moagem, as cargas poderiam transitar em câmaras não apropriadas, causando futuros desgastes aos revestimentos internos e assim, diminuindo a eficiência do moinho. Evidencia-se os fatos descritos acima através da Figura 16.

Figura 16 – Contaminação de carga e rompimento de grelha.



Fonte: Próprio autor (2022).

Em um segundo momento foi possível determinar a densidade aparente da carga por meio do peso das esferas, diâmetro e volume ocupado. Foi determinado  $\rho_{K1}$  igual a  $4,30 \text{ t/m}^3$  e  $\rho_{K2}$  igual  $4,60 \text{ t/m}^3$ . À face do exposto, e com os resultados de  $GE = 27,69\%$  deste estudo, estimou-se o peso da carga em ambas as câmaras e assim propor uma recarga moedora ao se comparar os resultados obtidos que foram  $63,08 \text{ t}$  para K1 e  $134,23 \text{ t}$  para K2 ao manual técnico de operações do moinho, que por sua vez, preconiza uma carga de  $70,68 \text{ t}$  para o primeiro compartimento e  $160,66 \text{ t}$  para o segundo. Dessa forma, em função dos parâmetros apresentados, para a um bom trabalho operacional do processo e garantia das propriedades físicas do cimento, a recarga ideal proposta é de  $7,60 \text{ t}$  para K1 e  $26,43 \text{ t}$  para K2.

Outra condição operacional calculada foi obtida através da Equação 10, que descreve a velocidade crítica do moinho, e apresentou um resultado igual a  $20,64 \text{ RPM}$ . Esse valor representa  $100\%$  da velocidade crítica, sendo que a velocidade de operação é dada em porcentagem dessa velocidade. Segundo Oliveira (2012) a velocidade de operação do moinho gira em torno de  $60$  e  $85\%$  da  $V_c$ , e em casos extremos, pode atingir operar entre  $50$  e  $90\%$ . Luz, et al. (2010) atentaram que velocidades altas incrementam a capacidade do moinho e exercem uma moagem mais grosseira, todavia implicam em seu desempenho ( $\text{kWh/t}$ ).

Da mesma maneira do recomendado por Beraldo (1987) para percentuais de velocidade, considerando o grau de enchimento determinado e o diâmetro externo de  $4,20 \text{ m}$ , adotou-se

aqui um percentual de 72% da  $V_c$ , ou seja, a velocidade estabelecida para o moinho equivale a 14,86 RPM.

A Tabela 9 faz uma compilação das propriedades obtidas durante o estudo para as câmaras moedoras no moinho.

Tabela 9 – Compilação dos resultados das propriedades do moinho em K1 e K2.

	D (mm)	$H_e$ (mm)	$H_s$ (mm)	$S_e$ (m <sup>2</sup> )	$S_s$ (m <sup>2</sup> )	$S_t$ (m <sup>2</sup> )	$G_e$ (%)	$G_s$ (%)
K1	4050,00	695,00	640,00	3,58	3,79	12,88	27,79	29,49
K2	4100,00	755,00	740,00	3,51	3,56	13,20	26,59	26,97

Fonte: Próprio autor (2022).

### 5.3.2 Características físicas do cimento

Analisado as condições operacionais de moagem já discutidas, algumas propriedades físicas também foram obtidas neste estudo. Dentre elas, na Tabela 10, tem-se as médias mensais para finura na ASTM 325 MESH/TYLER, superfície específica e a resistência à compressão aos 28 dias da hidratação.

Através do que preconiza a ABNT NBR 12826, todas as finuras encontradas estão dentro do estabelecido pela normativa, no entanto, observou-se elevados percentuais para os desvios médios e padrão entre as amostras, 66,08% e 78,79% respectivamente. De acordo com Zaparte (2020), essa propriedade é estabelecida principalmente no processo de moagem, então, pode ser inferido que essa dispersão entre os resultados advém de inconstâncias do processo, como variações da fração de enchimento e tempo de residência. Mehta e Monteiro (2014) afirmam que o desempenho do cimento pode ser influenciado por essa propriedade e Andreatta (2020) considera que para obtenção de finuras maiores o custo é formidável. Por fim, Neville (2016) ressalta que a finura é uma propriedade fundamental no cimento e deve ser estatisticamente controlada, com menores variações possíveis.

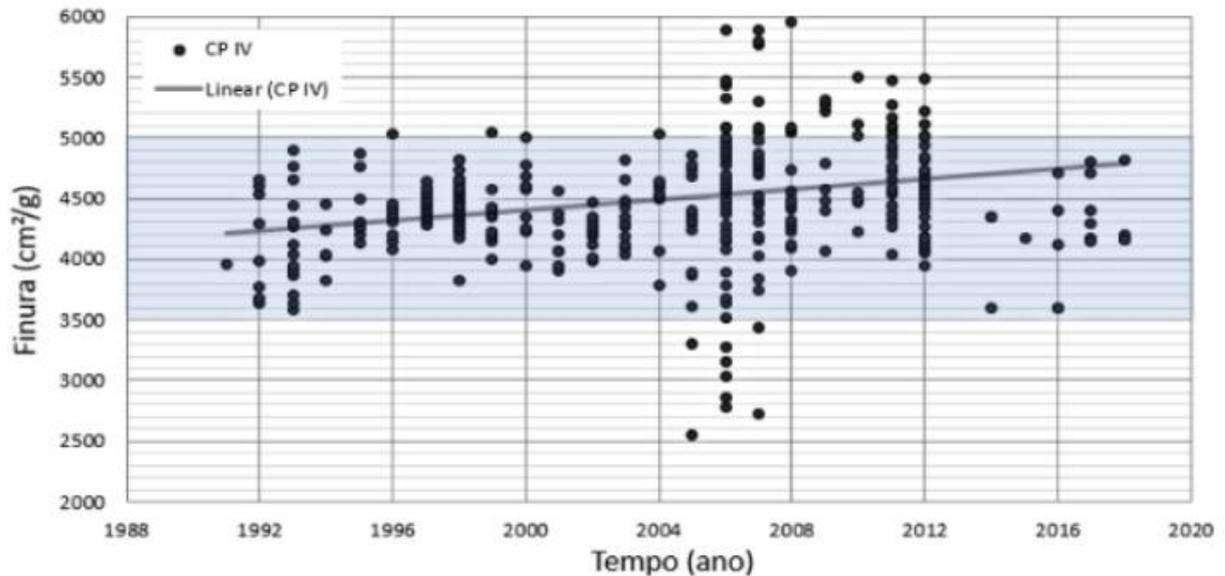
Tabela 10 – Propriedades físicas de um cimento CP IV – 32.

<b>Período</b>	<b>#325 /n° 45 (%)</b>	<b>Blaine (cm<sup>2</sup>/g)</b>	<b>R28 (mPA)</b>
Janeiro	5,26	5650,00	34,25
Fevereiro	3,88	5540,00	34,20
Março	3,55	5470,00	34,22
Abril	3,32	5240,00	35,23
Mai	3,14	5350,00	34,27
Junho	3,29	5290,00	34,00
Julho	2,97	5200,00	34,12
Agosto	3,00	5280,00	34,09
Setembro	3,69	5520,00	34,28
Outubro	4,73	5500,00	34,50
Novembro	4,80	5450,00	34,26
Dezembro	4,52	5480,00	34,29

Fonte: Próprio autor (2022).

O blaine também é uma forma de mensurar a finura do cimento, todavia, expresso em termos de superfície específica. Essa medida não varia apenas em função do processo de moagem, mas ainda em larga faixa em razão do tipo de cimento. Ao comparar 279 pesquisas com 941 resultados de finura blaine, Simoneto (2020) mostrou que no mercado brasileiro a maior concentração de blaines está entre 3500 e 5000 cm<sup>2</sup>/g, sendo o intervalo mais representativo para os cimentos do tipo CP I, CP II e CP III. Quando se foca nos cimentos do tipo CP IV, como neste trabalho, a maior concentração dos dados está na faixa de blaines maiores que 5000 cm<sup>2</sup>/g como apresentados na tabela 10. É observado ainda que de acordo com a finura ideal de 3500 cm<sup>2</sup>/g proposta por Aïtcin (2008), a média de finura (5414,18 cm<sup>2</sup>/g) do cimento CP IV – 32 ensaiado está 1,5x acima. Simoneto (2020) apontou estatisticamente que com o passar do tempo há uma tendência de crescimento na finura do cimento Portland pozolânicos de classe IV, isso está evidenciado na Figura 17.

Figura 17 – Blaine dos cimentos pozolânicos CP IV.



Fonte: Simoneto (2020).

A resistência do cimento é outra propriedade fundamental na característica do produto, e nesse contexto, os cimentos CP IV são destaque por apresentarem elevada resistência e serem uma classe de produtos modernos e sustentáveis (CAPELLO, 2008). De acordo com os dados da tabela 10, as amostras ensaiadas estão acima do que preconiza a ABNT NBR 16697:2018,  $R \geq 32,0$  MPa para CP IV – 32. Foi possível notar também que ao longo dos meses o desvio padrão de 0,32 dessa propriedade foi relativamente baixo e que os desvios do processo de moagem não afetaram significativamente nessa característica, assegurando dessa forma o que defendem Lima et al. (2016), ao recomendarem o produto para ambientes agressivos que necessitam de alta resistência. Por último, é válido destacar que dentre os tipos de cimento, outros performam melhores resultados em relação ao CP IV, como mostrou Souza et al. (2020), ao compará-lo com o CP V. Explica ainda que a discrepância nas resistências obtidas em seu estudo está na disponibilidade química de  $C_3S$  (silicato tricálcico) e no alto teor de  $SiO_2$  (sílica) proveniente das cinzas volantes.

## 6 CONCLUSÃO

Com este estudo observou-se as principais características dos circuitos de moagem, bem como especificidades de dimensionamento de moinhos tubulares, propriedades específicas do equipamento e características físicas de um cimento Portland pozolânico. Sob a ótica da avaliação do grau de enchimento, concluiu-se que o moinho estava em operação em uma fração considerada abaixada da ideal, dessa forma, tornou-se viável prever uma nova recarga de 34,03 toneladas afim de melhorar a performance do equipamento e evitar custos com o desgaste dos revestimentos, carga moedora e diminuição dos desvios da moagem. Diante de ensaios normatizados pela ABNT para avaliação da finura percentual, superfície específica e resistência à compressão conseguiu-se examinar possíveis inconstâncias no processo e reavaliar a operação mediante as sugestões. Verificou-se que em termos de superfície específica o cimento CP IV – 32 apresenta valores acima do considerado ideal, todavia, isso é uma realidade dos cimentos Portland comercializados no mercado nacional. Finalmente, sugere-se para trabalhos futuros uma comparação da medição do nível de enchimento com mais metodologias disponíveis na literatura e determinação da eficiência e consumo específico de energia do moinho por meio das leis de cominuição aplicáveis. Alguns autores indicam ainda a avaliação do grau de enchimento por meio da correlação dessa variável com a potência operacional do motor principal do moinho.

## REFERÊNCIAS

AITCIN, P. C. **Binders for Durable and Sustainable Concrete**. 1. ed. New York: Taylor and Francis, 2008.

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

ANDREATTA, K. A. **Estimativa da finura do cimento durante o processo de moagem em moinho de bolas**. 2020.

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. **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-cimmento-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.

BERNARDO, A. C. S. M.; CARPIO, R. C.; SILVA, R. J. **Otimização multi-objetivos da produção de cimento Portland com co-processamento e adição de mineralizadores**. CEP, v. 37500, p. 903, 2010.

BUDKE, R. et al. **Efeito do tratamento térmico no índice de trabalho (wi) de amostras de quartzo**. XXIV ENTMME - Salvador/Bahia, p. 468-469, 2011.

CENTURIONE, S. L. **Influência das características das matérias-primas no processo de sinterização do clínquer Portland**. São Paulo: USP, 1993. Dissertação (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.

DE FREITAS OLIVEIRA, R. **Uma revisão dos princípios de funcionamento e métodos de dimensionamento de moinhos de bolas**. 2012.

DIN-ISO. **General tolerances for linear measures**. Technical norm 2768-2. International Organization for Standardization, 2013.

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

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

GOMES, W. L.; DELBONI-JUNIOR, H.; CHIEREGATI, A. C.; JATOBÁ, T. L. A. **Development of ball mill test for simulation of industrial circuit**. Revista Escola de Minas/International Engineering Journal, v. 69, n. 1, p. 91-96, 2016.

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

GUPTA, V. K. **Effect of particulate environment on the grinding kinetics of mixtures of minerals in ball mills**. Powder Technology, v. 375, p. 549-558, 2020.

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

KIHARA, Y; CENTURIONE, S. L. O Cimento Portland. In: ISAIA, G. C. (Ed.). **Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações**. São Paulo: IBRACON, 2005. p. 296-322.

LAMECK, N. N. S. **Effects of grinding media shapes on ball mill performance**. Dissertation of the Faculty of Engineering from the University of Winwatersrand. Johannesburg, 2005.

LIMA, CAHIO SHERIGHAN BENJAMIN et al. **Produção, utilização e vantagens do cimento Portland e CP IV**. Revista FAROCIENCIA (ISSN 2359-1846), v. 4, 2016.

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.

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.** 1ª 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.

OLIVEIRA, G. A. R. N.; ZAKON, Abraham. **Critérios de Projeto para Moinhos de Cimento Portland.** Projeto Final de Curso para a Obtenção do Grau de Engenheiro Químico, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2012.

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.

ROMANOVICH, A. A.; ROMANOVICH, L. G.; CHEKHOVSKOY, E. I. **Determination of rational parameters for process of grinding materials pre-crushed by pressure in ball mill**. In: *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. IOP Publishing, 2018. p. 042091.

SAMPAIO, R. M.; MATOS, E. N. V. **Study of operational conditions, process variables, and drying kinetics of coriander leaves (*Coriandrum sativum*) using tray dryer**. *Ciência e Cultura, Barretos, SP*, v. 9, n. 1, p. 29-37, mai. 2013.

SAMPAIO, R. M.; MOREIRA, D.; PEREZ, V. H.; MARCOS, S. K.; SILVA, L. R.; BOIZAN, M. A. **Osmo-dehydration and convective drying kinetic of italian tomato**. *Latin American Applied Research, Bahia Blanca*, v. 45, n. 4, p. 255-260, 2015.

SANTOS, L. B. **A importância do setor mineral no desenvolvimento econômico de Itapeva/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.

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.

SIMONETO, G. W. et al. **Avaliação da Alteração da Finura e Composição do Cimento Portland Brasileiro nas Últimas Décadas: Estudo Exploratório**. 2020. Trabalho de Conclusão de Curso.

SOUZA, M. T. et al. **Desempenho de concretos preparados com cimentos portland cp iv e cp v utilizando o método de dosagem ipt/epusp: um estudo de caso.** Tecno-Lógica, v. 24, n. 2, p. 221-227, 2020.

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.