

Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”  
Instituto de Química - Câmpus de Araraquara

Eduarda Lizier Ribeiro

Proposta para diminuição de riscos ocupacionais no processo de beneficiamento de  
minério pela implementação de silo de armazenamento

Araraquara  
2024

Eduarda Lizier Ribeiro

Proposta para diminuição de riscos ocupacionais no processo de beneficiamento de minério pela implementação de silo de armazenamento

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado a Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” como parte dos requisitos para obtenção do título de Bacharela em Engenharia Química.

Orientador(a): Lorena Oliveira Pires

Araraquara

2024

R484p

Ribeiro, Eduarda Lizier

Proposta para diminuição de riscos ocupacionais no processo de beneficiamento de minério pela implementação de silo de armazenamento / Eduarda Lizier Ribeiro. -- Araraquara, 2024  
69 f. : il.

Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado - Engenharia Química) - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Instituto de Química, Araraquara

Orientadora: Lorena Oliveira Pires

1. Calcário. 2. Sílica. 3. Exposição ocupacional. 4. Silos. 5. Cisalhamento. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca da Universidade Estadual Paulista (UNESP), Instituto de Química, Araraquara. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

Eduarda Lizier Ribeiro

Proposta para diminuição de riscos ocupacionais no processo de beneficiamento de minério pela implementação de silo de armazenamento

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado a Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” como parte dos requisitos para obtenção do título de Bacharela em Engenharia Química.

Araraquara, 02, julho, 2024

**Banca examinadora**

---

Profa. Dra. Lorena Oliveira Pires  
Instituto de Química / Unesp Araraquara

---

Profa. Dra. Kelly Johana Dussan Medina  
Instituto de Química / Unesp Araraquara

---

Profa. Dra. Geisa Albini  
Instituto de Química / Unesp Araraquara

## **AGRADECIMENTOS**

Gostaria de agradecer à minha orientadora, Lorena Oliveira, que com paciência e dedicação, acompanhou todo o processo de elaboração deste trabalho, fornecendo orientações valiosas e contribuindo para seu desenvolvimento. Sem sua colaboração, este TCC não seria possível.

Agradeço à minha mãe, que me ensinou a importância da disciplina, do esforço e da dedicação e me apoiou em todas as escolhas que fiz durante minha jornada acadêmica. Seu exemplo de vida é minha inspiração e motivação para buscar sempre o melhor.

E gostaria de agradecer ao meu namorado, que me apoiou incansavelmente em todas as fases deste trabalho. Sua paciência, compreensão e carinho foram fundamentais para que eu pudesse manter o equilíbrio emocional e alcançar a conclusão deste TCC.

## RESUMO

A mineração desempenha um papel significativo na economia do Brasil, com sua contribuição variando entre 2% e 4% do Produto Interno Bruto (PIB) nacional ao longo da última década. A indústria de beneficiamento de minério apresenta diversos impactos ambientais e à saúde dos colaboradores que atuam nos processos de extração de minérios e transformação dos mesmos em produtos acabados. Pode-se citar como impactos ambientais o desmatamento de áreas naturais, deposição de rejeitos de maneira inadequada e consequente contaminação de cursos de água naturais, e poluição sonora, decorrente de explosões de rocha. Os trabalhadores também estão expostos à riscos no processo de extração e beneficiamento, como ruído elevado, atmosfera com presença de particulado nocivo a saúde e vibrações decorrentes do uso de grandes equipamentos. O objetivo desse trabalho foi analisar a planta de beneficiamento de calcário dolomítico de uma empresa na região metropolitana de São Paulo na qual a emissão de particulado de sílica é evidente e intensa, e assim propor melhorias no sistema de armazenamento de produto para que emissões de particulado decorrente de ação do vento fossem controladas, assim tornando o ambiente de trabalho salubre. Foi utilizada a metodologia da Célula de Cisalhamento de Jenike e normas internacionais (AS 3774), assim obtendo como resultado quatro silos esbeltos para armazenamento da produção diária de 3700 toneladas de calcário dolomítico. O investimento do projeto foi baseado na perda de faturamento atrelada a perda de produção, com retorno em 12 meses. O valor estimado para o investimento foi de 5,94 milhões, valor pertinente para a implantação de unidades de armazenamento. Assim, com a proposta, foi possível estabelecer um cenário no qual a empresa aumentaria seu faturamento em 4%, proporcionaria um ambiente salubre para seus colaboradores e melhoraria sua imagem em saúde ocupacional perante o cenário da mineração.

**Palavras-chave:** calcário; sílica; exposição ocupacional; silo; cisalhamento.

## ABSTRACT

Mining plays a significant role in Brazil's economy, with its contribution varying between 2% and 4% of the national Gross Domestic Product (GDP) over the last decade. The ore processing industry has several environmental and health impacts on employees who work in the processes of extracting ores and transforming them into finished products. Environmental impacts include deforestation of natural areas, inappropriate disposal of waste and consequent contamination of natural water courses, and noise pollution resulting from rock explosions. Workers are also exposed to risks in the extraction and processing process, such as high noise, an atmosphere containing particulates that are harmful to health, and vibrations resulting from the use of large equipment. The objective of this work was to analyze the dolomitic limestone processing plant of a company in the metropolitan region of São Paulo in which silica particulate emissions are evident and intense, and thus propose improvements in the product storage system so that particulate emissions resulting from wind action were controlled, thus making the working environment healthy. The Jenike Shear Cell methodology and international standards (AS 3774) were used, resulting in four slender silos for storing the daily production of 3700 tons of dolomitic limestone. The project investment was based on the loss of revenue linked to the loss of production, with a return in 12 months. The estimated value for the investment was 5.94 million, a value relevant for the implementation of storage units. Thus, with the proposal, it was possible to establish a scenario in which the company would increase its revenue by 4%, provide a healthy environment for its employees and improve its image in occupational health in the mining scenario.

**Keywords:** limestone; silica; occupational exposure; silo; shear.

## LISTA DE FIGURAS

|                                                                                                                                                                                                                     |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Figura 1:</b> Contribuição para o valor da produção por substância mineral, 2020 .....                                                                                                                           | 19 |
| <b>Figura 2:</b> PIB da mineração do Brasil como participação no PIB nacional, 2010-17 ...                                                                                                                          | 20 |
| <b>Figura 3:</b> Localização dos depósitos minerais no Brasil.....                                                                                                                                                  | 20 |
| <b>Figura 4:</b> Fluxograma do processo de lavra e beneficiamento à céu aberto. ....                                                                                                                                | 28 |
| <b>Figura 5:</b> Variação dos custos das operações unitárias em função da fragmentação.....                                                                                                                         | 30 |
| <b>Figura 6:</b> Fluxograma do processo de beneficiamento de minério.....                                                                                                                                           | 31 |
| <b>Figura 7:</b> Representação de carga em movimento em moinhos tubulares.....                                                                                                                                      | 33 |
| <b>Figura 8:</b> Representação do Overflow e do Underflow. ....                                                                                                                                                     | 34 |
| <b>Figura 9:</b> Peneira Vibratória .....                                                                                                                                                                           | 35 |
| <b>Figura 10:</b> Representação da obstrução de fluxo em silos. ....                                                                                                                                                | 38 |
| <b>Figura 11:</b> Representação gráfica da obtenção do ângulo de atrito entre produto e material da parede do silo.....                                                                                             | 39 |
| <b>Figura 12:</b> Representação da obtenção dos diferentes ângulos de repouso. ....                                                                                                                                 | 40 |
| <b>Figura 13:</b> Representação da Célula de Cisalhamento de Jenike .....                                                                                                                                           | 40 |
| <b>Figura 14:</b> Gráficos obtidos ao realizar o experimento com célula de cisalhamento. ....                                                                                                                       | 41 |
| <b>Figura 15:</b> Curva característica de YL e EYL .....                                                                                                                                                            | 42 |
| <b>Figura 16:</b> Representação gráfica da obtenção da Função de Fluxo. ....                                                                                                                                        | 42 |
| <b>Figura 17:</b> Representação de um arco estável em uma tremonha. ....                                                                                                                                            | 43 |
| <b>Figura 18:</b> Representação dos tipos de fluxo em tremonhas.....                                                                                                                                                | 44 |
| <b>Figura 19:</b> Análise de tensões para a não formação de arcos.....                                                                                                                                              | 45 |
| <b>Figura 20:</b> Diagramas para a determinação de fatores de fluxo para tremonhas cônicas com ângulo interno efetivo de 30°, 40°, 50° e 60°.....                                                                   | 46 |
| <b>Figura 21:</b> Diagrama de fluxo de massa em tremonha cônica. ....                                                                                                                                               | 47 |
| <b>Figura 22:</b> Determinação da função $H(\theta)$ para tremonhas cônicas e em cunha.....                                                                                                                         | 47 |
| <b>Figura 23:</b> Representação gráfica do critério de fluxo e não fluxo, ou seja, não formação ou formação de arco coesivo.....                                                                                    | 48 |
| <b>Figura 24:</b> a) Máscara PFF2, b) Máscara semifacial filtrante. ....                                                                                                                                            | 57 |
| <b>Figura 25:</b> a) Protetor auditivo tipo plug, b) Protetor auditivo tipo concha.....                                                                                                                             | 57 |
| <b>Figura 26:</b> a) Botina de couro com biqueira de plástico, b) Bota de PVC.....                                                                                                                                  | 58 |
| <b>Figura 27:</b> Vestimenta com proteção contra choques elétricos .....                                                                                                                                            | 59 |
| <b>Figura 28:</b> a) Luva de raspa, b) Luva de Neoprene, c) Luva nitrílica, d) Luva de polivinila (PVC), e) Luva para proteção contra choques elétricos.....                                                        | 59 |
| <b>Figura 29:</b> Creme protetor para atividades com contato com graxa, óleo, solvente, querosene, gasolina, tinta à óleo, cola, cola instantânea, cera, verniz, cal, cimento seco, negro de fumo, pó e terra. .... | 60 |
| <b>Figura 30:</b> Mangote de segurança confeccionado em grafatex de algodão e poliéster..                                                                                                                           | 60 |
| <b>Figura 31:</b> a) Cinturão de segurança, b) Talabarte.....                                                                                                                                                       | 61 |
| <b>Figura 32:</b> Fluxograma de blocos do processo de moagem de calcário. ....                                                                                                                                      | 63 |
| <b>Figura 33:</b> Imagem do armazenamento da produção de calcário.....                                                                                                                                              | 64 |
| <b>Figura 34:</b> Imagem da dispersão de partículas por ação do vento no momento de descarregamento da planta. ....                                                                                                 | 65 |
| <b>Figura 35:</b> Curvas de Função Fluxo obtidas por A. Serkan Cagli.....                                                                                                                                           | 68 |
| <b>Figura 36:</b> Fator de fluxo para materiais com ângulo de atrito interno efetivo igual a 60°. ....                                                                                                              | 69 |
| <b>Figura 37:</b> Curvas de Funções Fluxo e a reta de inclinação $\arctan(1/ffc)$ .....                                                                                                                             | 70 |

|                                                                                  |    |
|----------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Figura 38:</b> Relação de parâmetro do silo definida pela Norma AS 3774 ..... | 71 |
|----------------------------------------------------------------------------------|----|

## LISTA DE TABELAS

|                                                                                                    |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Tabela 1:</b> Intervalos de granulometria para cada etapa do processo de britagem.....          | 32 |
| <b>Tabela 2:</b> Classificação dos produtos de acordo com o valor do Índice de Escoabilidade ..... | 43 |
| <b>Tabela 3:</b> Comparação de propriedades do material estudado com dados da literatura.          | 68 |
| <b>Tabela 4:</b> Valores de propriedades do material estudado. ....                                | 69 |

## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

|                |                                                                      |
|----------------|----------------------------------------------------------------------|
| <b>ABRACAL</b> | Associação Brasileira dos Produtores de Calcário Agrícola            |
| <b>ACGIH</b>   | American Conference of Governmental Industrial Hygienists            |
| <b>ANM</b>     | Agência Nacional de Mineração                                        |
| <b>AS</b>      | Australian Standard (Padrão Australiano)                             |
| <b>CA</b>      | Certificado de Aprovação                                             |
| <b>CNY</b>     | Yuan Renminbi chinês                                                 |
| <b>DIN</b>     | Deutsches Institut für Normung (Instituto Alemão para Normatizações) |
| <b>EN</b>      | European standard (Padrão Europeu)                                   |
| <b>EPC</b>     | Equipamento de Proteção Coletiva                                     |
| <b>EPI</b>     | Equipamento de Proteção Individual                                   |
| <b>IARC</b>    | Agência Internacional para Pesquisa em Câncer                        |
| <b>ISO</b>     | International Organization for Standardization                       |
| <b>NR</b>      | Normas Regulamentadoras                                              |
| <b>PAINPSE</b> | Perda Auditiva Induzida por Níveis de Pressão Sonora Elevados        |
| <b>pH</b>      | Potencial Hidrogeniônico                                             |
| <b>PIB</b>     | Produto Interno Bruto                                                |
| <b>PVC</b>     | Policloreto de vinilo                                                |
| <b>ZAR</b>     | Zincagem de Alta Resistência                                         |

## LISTA DE SÍMBOLOS

|                 |                                                                |
|-----------------|----------------------------------------------------------------|
| $a$             | Raio superior do tronco de cone acima do corpo cilíndrico [m]  |
| $A_{M_{cilin}}$ | Área do corpo cilíndrico do silo [m <sup>2</sup> ]             |
| $A_{M_{cone}}$  | Área do tronco de cone superior [m <sup>2</sup> ]              |
| $A_{M_{trem}}$  | Área da tremonha do silo [m <sup>2</sup> ]                     |
| $A_{M_T}$       | Área total do cilindro [m <sup>2</sup> ]                       |
| $b$             | Abertura de descarga da tremonha [m]                           |
| $d_c$           | Diâmetro do silo [m]                                           |
| $FF$            | Função Fluxo                                                   |
| $ff$            | Fator de fluxo                                                 |
| $ff_c$          | Fator de fluxo da tremonha                                     |
| $g_b$           | Geratriz do cone abaixo da tremonha [m]                        |
| $g_{cone}$      | Geratriz do cone superior do silo [m]                          |
| $g_{trem}$      | Geratriz do cone completo representativo da tremonha [m]       |
| $H(\theta)$     | Função do ângulo da tremonha                                   |
| $h_0$           | Distância entre o ponto de carga e a base superior do silo [m] |
| $h_b$           | Altura total do silo [m]                                       |
| $h_c$           | Altura do corpo cilíndrico do silo [m]                         |
| $h_s$           | Altura do cone superior [m]                                    |
| $h_{t1}$        | Altura do cone completo da tremonha [m]                        |
| $LT$            | Limite de Tolerância                                           |
| $P_1$           | Produção de um dia [ton]                                       |
| $P_{30}$        | Produção de trinta dias [ton]                                  |

|                |                                                               |
|----------------|---------------------------------------------------------------|
| $r$            | Raio superior do tronco de cone acima do corpo cilíndrico [m] |
| $V_1$          | Volume da tremonha cônica [m³]                                |
| $V_2$          | Volume do corpo cilíndrico do silo [m³]                       |
| $V_3$          | Volume do tronco de cone superior [m³]                        |
| $V_T$          | Volume total do silo [m³]                                     |
| $\alpha$       | Ângulo cuja tangente equivale a $1/ff_c$ [°]                  |
| $\gamma$       | Peso específico [N/m³]                                        |
| $\theta$       | Ângulo de inclinação da tremonha com o eixo vertical [°]      |
| $\mu_w$        | Coeficiente de atrito com a parede                            |
| $\pi$          | Valor de $\pi$ (pi)                                           |
| $\sigma$       | Pressão normal [Pa]                                           |
| $\sigma_1$     | Maior tensão principal de consolidação [Pa]                   |
| $\sigma_{1a}$  | Tensão atuando em um arco estável imaginário [Pa]             |
| $\sigma_c$     | Tensão não confinada [Pa]                                     |
| $\sigma_{cri}$ | Tensão crítica [Pa]                                           |
| $\sigma_{pre}$ | Tensão normal de pré cisalhamento [Pa]                        |
| $\sigma_s$     | Tensão na qual ocorre o cisalhamento do material [Pa]         |
| $\sigma_w$     | Tensão normal de consolidação material na parede [Pa]         |
| $\tau$         | Tensão cisalhante [Pa]                                        |
| $\tau_{pre}$   | Tensão cisalhante de pré cisalhamento [Pa]                    |
| $\tau_w$       | Tensão normal cisalhante na parede [Pa]                       |
| $\phi_e$       | Ângulo de atrito interno efetivo [°]                          |
| $\phi_i$       | Ângulo de atrito interno [°]                                  |

$\phi_r$       Ângulo de repouso [°]

$\phi_w$       Ângulo de atrito com a parede [°]

## SUMÁRIO

|                                                                                                                 |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1. Introdução.....                                                                                              | 16 |
| 2. Revisão Bibliográfica.....                                                                                   | 18 |
| 2.1. Indústria de mineração no Brasil .....                                                                     | 18 |
| 2.2. Indústria do Calcário.....                                                                                 | 21 |
| 2.2.1. Calcário .....                                                                                           | 21 |
| 2.2.2. Tipos de calcário e aplicações .....                                                                     | 21 |
| 2.2.3. Indústria no Brasil e no mundo .....                                                                     | 23 |
| 2.3. Processo de extração mineral e beneficiamento .....                                                        | 25 |
| 2.3.1. Etapas do processo de extração mineral .....                                                             | 25 |
| 2.3.2. Fluxograma de processo – lavra à céu aberto .....                                                        | 27 |
| 2.3.3. Principais operações unitárias do processo de lavra à céu aberto .....                                   | 28 |
| 2.3.4. Etapas do processo de beneficiamento de minério.....                                                     | 30 |
| 2.3.5. Fluxograma de processo de beneficiamento .....                                                           | 31 |
| 2.3.6. Principais operações unitárias do processo de beneficiamento.....                                        | 32 |
| 2.3.6.1. Britagem e moagem.....                                                                                 | 32 |
| 2.3.6.2. Peneiramento e Classificação.....                                                                      | 34 |
| 2.3.6.3. Concentração e Desaguamento .....                                                                      | 35 |
| 2.4. Dimensionamento de equipamentos .....                                                                      | 37 |
| 2.4.1. Tipos de Silos .....                                                                                     | 37 |
| 2.4.2. Propriedades do produto armazenado.....                                                                  | 38 |
| 2.4.2.1. Ângulo de atrito com a parede e ângulo de repouso.....                                                 | 39 |
| 2.4.2.2. Célula de cisalhamento de Jenike.....                                                                  | 40 |
| 2.4.2.3. Demais propriedades importantes .....                                                                  | 43 |
| 2.4.3. Dimensionamento de tremonhas cônicas em fluxo mássico .....                                              | 44 |
| 2.5. Impactos ambientais e riscos à saúde do trabalhador .....                                                  | 48 |
| 3. Avaliação de riscos, perigos e medidas de controle no processo de extração e beneficiamento de minério ..... | 50 |
| 3.1. Perigos, riscos e danos à saúde.....                                                                       | 50 |
| 3.2. Medidas de controle e prevenção de riscos.....                                                             | 53 |
| 3.3. Equipamentos de proteção individual - EPI.....                                                             | 56 |
| 4. Objetivo.....                                                                                                | 62 |
| 5. Estudo de Caso .....                                                                                         | 63 |
| 6. Métodos utilizados.....                                                                                      | 67 |
| 6.1. Cálculo aproximado da perda de produto .....                                                               | 67 |

|        |                                                                  |    |
|--------|------------------------------------------------------------------|----|
| 6.2.   | Dimensionamento do silo de armazenamento .....                   | 67 |
| 6.2.1. | Propriedades do produto .....                                    | 67 |
| 6.2.2. | Dimensionamento da tremonha e do silo .....                      | 69 |
| 6.3.   | Especificação do material utilizado para construção do silo..... | 71 |
| 7.     | Resultados .....                                                 | 73 |
| 7.1.   | Dispersão de partículas – perda de produto .....                 | 73 |
| 7.2.   | Dimensionamentos e material escolhido.....                       | 73 |
| 7.3.   | Readequação da planta industrial e custo envolvidos.....         | 75 |
| 8.     | Discussão.....                                                   | 77 |
| 9.     | Conclusão .....                                                  | 79 |
| 10.    | Referências .....                                                | 81 |

## 1. Introdução

A indústria de mineração desempenha um papel crucial na economia brasileira, contribuindo entre 2% e 4% do Produto Interno Bruto (PIB) nacional ao longo da última década. O Brasil é reconhecido mundialmente como um dos principais produtores de minerais, sendo responsável pela extração de aproximadamente 70 tipos diferentes, conforme dados da Agência Nacional de Mineração (ANM).

Dentre os minerais explorados em território brasileiro pode-se citar o calcário, uma rocha sedimentar carbonática que apresenta diversas aplicações no agronegócio, na indústria e na construção civil. Sua obtenção consiste na extração do solo, através dos processos da lavra, e beneficiamento, com as operações de britagem e moagem.

Os processos envolvidos na obtenção de calcário apresentam impactos negativos tanto ao meio ambiente como à saúde do trabalhador. Tem-se como principais impactos ambientais a remoção da vegetação nativa; contaminação do solo e recursos hídricos presentes no local e poluição sonora. Já o trabalhador encontra-se vulnerável a doenças ocupacionais decorrentes da exposição intermitente à agentes de risco (poeiras e poluição sonora) como agravamentos na performance respiratória e perda auditiva.

Dessa forma, este trabalho teve por objetivo avaliar uma planta de beneficiamento de calcário, a fim de analisar a emissão de partículas na atmosfera e propor alternativas para a eliminação de agentes de risco à saúde do trabalhador.

Foi identificado que a fonte de risco mais expressiva no setor de moagem de calcário é a emissão de particulado decorrente do método de armazenamento utilizado. Atualmente, a produção de calcário dolomítico é armazenada no pátio ao lado da linha de produção, o que acarreta na dispersão de produto por ação do vento. As concentrações de particulado de sílica cristalina no setor são quase duas vezes mais que a concentração permitida pela ACGHI (American Conference of Governmental Industrial Hygienists). Para eliminar a fonte de risco, propõe-se o dimensionamento de um silo ao final da linha de produção realizando o armazenamento correto de calcário.

O dimensionamento foi realizado a partir da Célula de Cisalhamento de Jenike, que permitiu determinar as propriedades de cisalhamento do material armazenado e as dimensões da tremonha do silo, como ângulo de inclinação e diâmetro do bocal de descarga. Também foram utilizadas normas internacionais de dimensionamento de

equipamentos de armazenagem, com as quais foi possível determinar as demais dimensões do silo, como diâmetro e altura total.

Com dados de perda de produção decorrente da dispersão de particulado pelo vento, foi possível estimar o valor do investimento viável para a proposta considerando as condições da empresa estudada e os parâmetros de projeto a serem considerados, como estruturas de sustentação, sistemas de controle de carga e descarga e montagem de equipamentos, por exemplo.

## **2. Revisão Bibliográfica**

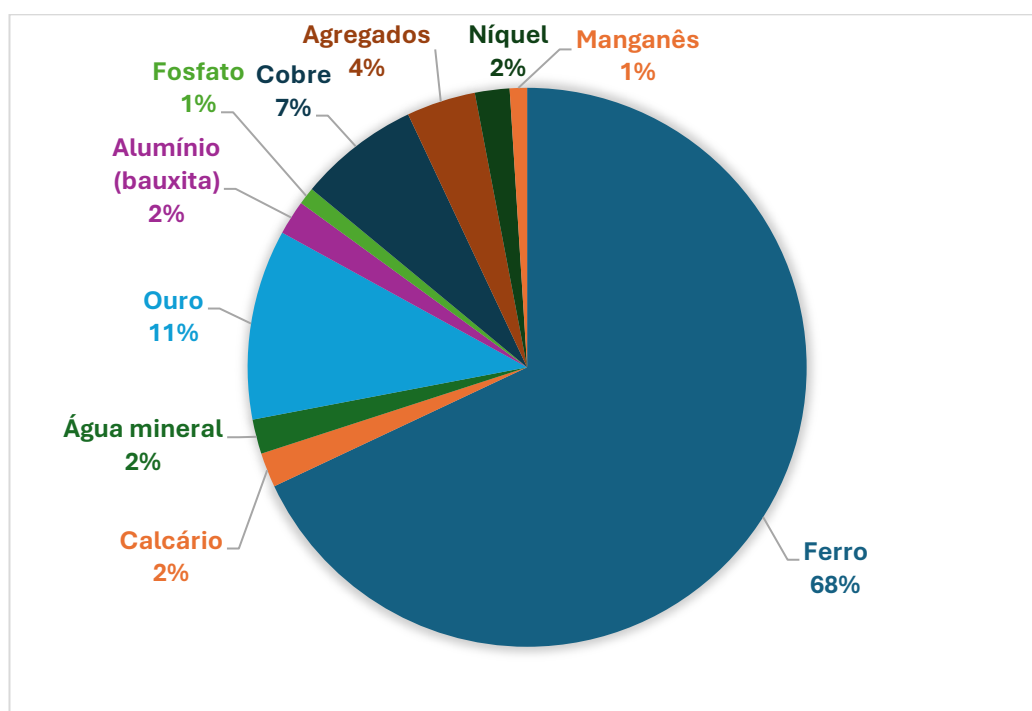
### **2.1. Indústria de mineração no Brasil**

A indústria de mineração desempenha um papel notável no avanço socioeconômico de um país, tendo em vista sua importância para o desenvolvimento de diversos segmentos da indústria. Sua conexão com a história do Brasil remonta aos primórdios da ocupação do interior, quando a busca por ouro marcou o início da exploração de recursos minerais. Ao longo dos séculos, à medida que a ocupação do território cresceu e o conhecimento geológico se aprofundou, novos depósitos foram descobertos, destacando a contínua relevância da mineração (Jazida, 2023).

Atualmente, o Brasil é amplamente reconhecido como um dos principais produtores de minerais no mundo, abastecendo uma variedade impressionante de cerca de 70 substâncias minerais, de acordo com a Agência Nacional de Mineração (ANM). Ferro, alumínio, manganês, cobre, nióbio, estanho, níquel e ouro são os principais minerais explorados, e correspondem a 98,6% do valor da produção comercializada (Jazida, 2023).

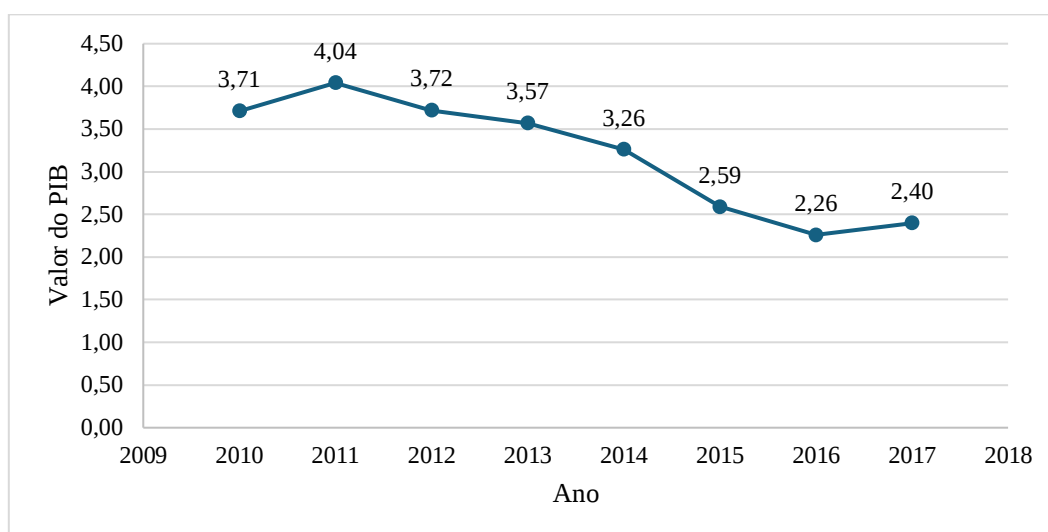
A mineração de metais desempenha um papel de destaque na atividade mineral no Brasil. Aproximadamente 80% do valor total da produção da mineração é atribuído a substâncias metálicas. A Figura 1 ilustra a contribuição de cada mineral para o valor da produção de mineração em 2020. Como podemos observar, o ferro é o mineral mais significativo no setor, representando 68% do total. Os metais subsequentes em importância são o ouro e o cobre, ocupando o segundo e o terceiro lugares, respectivamente. No ano de 2020, o ouro contribuiu com 11% do valor da produção, enquanto o cobre representou 7%. Os demais produtos da mineração têm uma participação inferior a 5% no valor total da produção do setor (OCDE, 2022).

**Figura 1:** Contribuição para o valor da produção por substância mineral, 2020



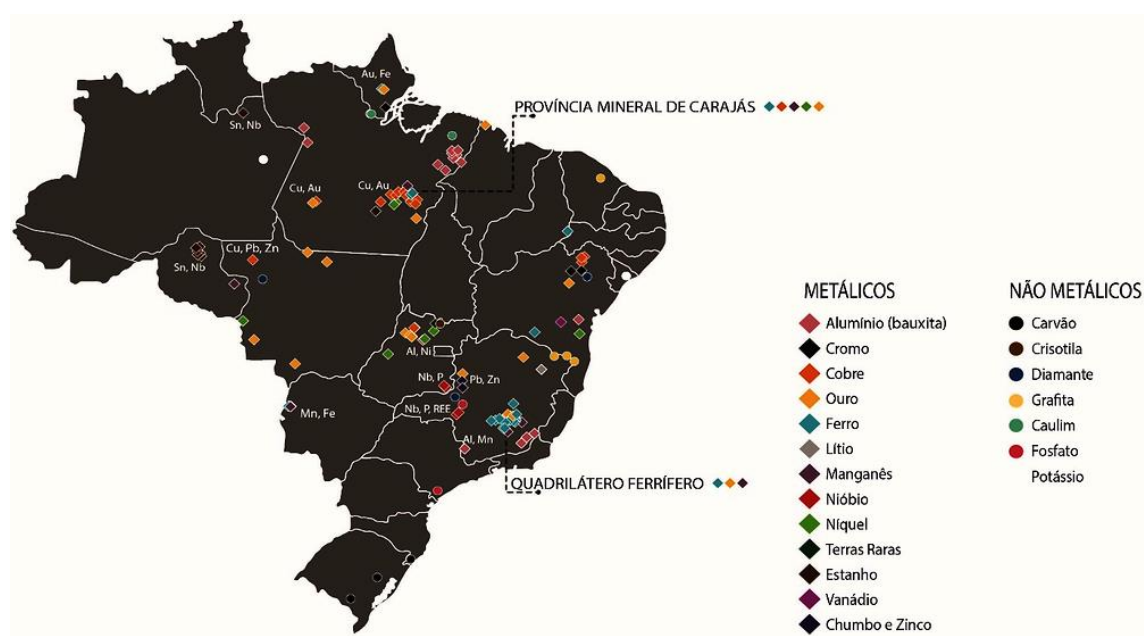
**Fonte:** Adaptado de ANM (2020), Anuário Mineral Brasileiro, Agência Nacional de Mineração. Relatório Anual de Lavra – RAL.

A mineração desempenha um papel significativo na economia do Brasil, com sua contribuição variando entre 2% e 4% do Produto Interno Bruto (PIB) nacional ao longo da última década. As principais atividades dentro da indústria de mineração que contribuem de forma substancial para a produção nacional incluem a extração de minério de ferro, a fabricação de produtos derivados de metais e a produção de itens não metálicos. Em 2017, a combinação dessas três atividades representou 1,61% do PIB brasileiro. A Figura 2 ilustra a evolução da contribuição das atividades de mineração para o PIB brasileiro de 2011 a 2017. O PIB associado à mineração diminuiu ao longo da última década, chegando a uma contribuição de aproximadamente 2,4% em 2017 (OCDE, 2022).

**Figura 2:** PIB da mineração do Brasil como participação no PIB nacional, 2010-17

**Fonte:** Adaptado de IBGE (2020)

O país conta com diversas reservas de minério, como ferro, cobre, alumínio, nióbio, e muitas empresas atuantes no ramo da mineração, como a Vale e a CSN Mineração. As principais reservas estão nas regiões Norte (Rondônia, Pará e Amazonas), Sudeste (São Paulo e Minas Gerais) e Centro-Oeste (Mato Grosso do Sul, Mato Grosso e Goiás), como apresentado na Figura 3 (Verum Partners, 2020).

**Figura 3:** Localização dos depósitos minerais no Brasil

**Fonte:** Verum Partners, 2020.

Em relação aos principais *players* do mercado nacional (Verum Partners, 2020), destacam-se os elencados a seguir:

- Alumínio: Produzido pela Mineração Rio do Norte S.A, Mineração Paragominas S. A e Alcoa World Alumina Brasil Ltda.
- Cobre: Produzido pela Salobo Metais S.A, Vale S.A. e Mineração Maracá Industria e Comercio S.A.
- Ferro: Produzido pela Vale S.A., Congonhas Minérios S.A. e Anglo American Minério de Ferro Brasil S.A.
- Nióbio: Niobras Mineração Ltda, Companhia Mineradora do Pirocloro de Araxá e Mineração Taboca S.A.
- Manganês: Vale S.A., Mineração Corumbaense Reunida S.A. e Mineração Buritirama S.A.
- Calcário: Britacal, Provale e Carbomil Química S.A.

## **2.2. Indústria do Calcário**

### **2.2.1. Calcário**

O calcário é uma rocha sedimentar carbonática, composta majoritariamente pelos minerais carbonato de cálcio (calcita) e/ou dolomita. Pode apresentar diversas impurezas como silicatos, argilas, sulfetos, siderita, fosfatos, sulfatos de ferro, glauconita, matéria orgânica e óxidos de ferro e magnésio (SILVA, 2023).

A obtenção do calcário se dá a partir da moagem da rocha de calcário. É uma matéria-prima rica que apresenta diversas aplicações no agronegócio, na indústria e na construção civil. Pode ser usado para a produção de cimento, compostos metalúrgicos, fertilizantes e corretivos para o solo, vidro, entre outros produtos (SILVA, 2023).

### **2.2.2. Tipos de calcário e aplicações**

O calcário é utilizado amplamente em diversos setores. É uma rocha importante e versátil, que se destaca pela grande disponibilidade e baixo custo. Pode ser utilizada nas seguintes aplicações:

- Controle da acidez do solo;
- Produção de cal;
- Insumos agrícolas;
- Produção de cimento;
- Tratamento de água e esgotos;
- Purificação do ar.

- Produção de alimentos e bioestruturas;
- Metalurgia;
- Fabricação de vidros e tintas;
- Produção de brita, aços, plástico.

Existem diversos tipos de calcário, com diferentes composições. O calcário calcítico apresenta alto teor de carbonato de cálcio (97-99%), enquanto o calcário dolomítico apresenta 54% de carbonato de cálcio e 46% de carbonato de magnésio. O calcário calcítico é amplamente utilizado na correção de solos (calagem), devido a seu alto teor de carbonato de cálcio, que permite eficácia na neutralização da acidez do solo. Já o calcário dolomítico também é utilizado para correção de solos, mas tem por objetivo repor as quantidades de cálcio e magnésio necessárias à plantação. Também é usado para diminuir a ação do alumínio e manganês no solo, que são fatores prejudiciais à agricultura (Inducal, 2023).

A calagem se faz necessária quando o pH do solo for menor que 5,5 considerando um sistema de plantio direto, e 6,0 no caso do sistema convencional. A correção do pH deverá ser feita antes do início do plantio, sendo que o calcário pode ser aplicado na superfície do solo quando há um sistema de plantio direto. Já no sistema convencional, o calcário deve ser aplicado em uma camada com até 20 cm de profundidade. A calagem apresenta diversos benefícios, como: ajuste de pH do solo, fornecimento de macronutrientes (cálcio e magnésio), aumenta a disponibilidade de fósforo e demais macro e micronutrientes, aumenta a atividade biológica do solo e a eficiência de adubos (Inducal, 2023).

A cal virgem, ou cal viva, é obtida a partir da queima completa do carbonato de cálcio. É composta por óxido de cálcio e óxido de magnésio, e é caracterizada por ser um sólido branco e alcalino. Apresenta diversas aplicações, como na construção civil, sendo utilizada na produção de argamassas e na preparação da pintura. Também é usada nas indústrias metalúrgica, farmacêutica, de papel e celulose, no tratamento de água, na indústria alimentícia, entre outros (SILVA, 2023).

Já a cal hidratada é obtida pela hidratação da cal virgem, sendo assim constituída de hidróxido de cálcio e hidróxido de magnésio. Há também o calcário calcinado, que é obtido pela calcinação total ou parcial do calcário, e apresenta características intermediárias ao calcário e a cal virgem (MORAES, 2023).

### **2.2.3. Indústria no Brasil e no mundo**

A pandemia de COVID-19 e os lockdowns implementados ao redor do mundo tiveram um impacto negativo no mercado do calcário, interrompendo a produção e as cadeias de suprimentos. Apesar disso, o setor está em fase de recuperação desde a remoção das restrições, impulsionado pela demanda crescente em setores como o de papel e celulose, tratamento de água, agricultura e construção (Mordor Intelligence, 2023).

No curto prazo, espera-se que o aumento das necessidades do setor de construção e a expansão da produção de aço mundialmente estimulem o mercado do calcário. Contudo, as preocupações existentes com a saúde relacionadas ao uso do calcário e as elevadas emissões de CO<sub>2</sub> decorrentes do processo de calagem agrícola representam obstáculos ao crescimento (Mordor Intelligence, 2023).

O calcário é essencial na siderurgia, sendo usado na criação de escória durante a produção de ferro e aço. O aço, uma liga de significativa importância, tem vasta aplicabilidade em diversas indústrias, incluindo construção, automotiva, eletrônica, aeroespacial e defesa. Conforme dados da Associação Mundial do Aço, a produção mundial de aço cresceu para aproximadamente 1,951 milhão de toneladas em 2021, um acréscimo de 3,8% em comparação com as 1,879 milhão de toneladas produzidas em 2020. Esse aumento na produção de aço sugere um crescimento na demanda por calcário no setor siderúrgico (Mordor Intelligence, 2023).

Além de sua aplicação na produção de aço, o calcário é utilizado em centrais elétricas que queimam combustíveis fósseis para a dessulfuração dos gases emitidos; processo este que elimina o dióxido de enxofre das emissões. Segundo a Administração de Informação de Energia dos Estados Unidos, em 2021 foram produzidos aproximadamente 4,108 bilhões de quilowatts-hora (ou 4,11 trilhões de kWh) de eletricidade por instalações de geração de eletricidade de grande escala no país (Mordor Intelligence, 2023).

A China domina o mercado de calcário em termos de consumo e produção devido à disponibilidade local de matérias-primas e sua indústria química desenvolvida. A indústria siderúrgica consome a maior quantidade de calcário globalmente e a China é um dos maiores produtores de aço bruto do mundo, respondendo por mais de 50% da participação global. Além disso, o setor de construção chinês é o mais expressivo do

mundo, empregando 746 milhões de pessoas em 2021. De acordo com o Escritório Nacional de Estatísticas, a produção do setor de construção da China, avaliada em CNY 29,3 trilhões, aumentou dinamicamente em 2021, contribuindo com 25,7% para o PIB do país em comparação com a participação de 11,0% do PIB em 2020, impulsionando assim a demanda pelo mercado de calcário (Mordor Intelligence, 2023).

O mercado de calcário está parcialmente consolidado no mundo, sendo alguns dos principais *players*: Imerys, Carmeuse, Graymont Limited, Mineral Technologies Inc., e Omya AG (Mordor Intelligence, 2023).

Anteriormente à pandemia de Covid-19, o setor brasileiro de calcário mantinha uma produção anual estimada entre 45 e 50 milhões de toneladas. No entanto, as restrições de transporte impostas pelo contexto pandêmico levaram os produtores de calcário agrícola a não anteverem o crescimento que se seguiria. Atualmente, o mercado conta com cerca de 270 empresas, sendo 90% delas de pequeno ou micro porte, com produções que variam de 20 a 50 mil toneladas por ano. Apenas 5% das empresas são de médio porte e outras 5% de grande porte, sendo que estas últimas detêm uma parcela significativa da produção total. "Produtores em São Paulo chegam a ultrapassar a marca de 1 milhão de toneladas por ano, enquanto o Paraná se destaca como o principal estado produtor", destaca representante da Abracal (Associação Brasileira dos Produtores de Calcário Agrícola) (FORNARI, 2022).

Euclides Francisco Jutkoski, Diretor Executivo da Abracal aponta que a entrada de novos participantes no mercado é um evento raro. A mineração de calcário, como qualquer outra atividade mineral, exige certa escala de produção para ser economicamente viável. Um dos obstáculos significativos para novos investidores é a legislação ambiental, pois as rigorosas normas ambientais aplicam-se igualmente a pequenos e grandes mineradores, o que desencoraja a entrada de novos capitais no setor. Adicionalmente, o custo de produção representa outro desafio significativo. Uma pesquisa realizada pelo sindicato dos produtores de calcário de São Paulo indica que, embora a demanda pelo mineral tenha crescido devido ao aumento na produção de alimentos, os custos associados também subiram, particularmente os relacionados ao óleo diesel, lubrificantes e componentes de equipamentos (FORNARI, 2022).

No Brasil, a demanda por calcário agrícola alcança 70 milhões de toneladas, revelando uma defasagem de 20 milhões de toneladas para um insumo crucial na

correção da acidez do solo e na potencialização dos fertilizantes. Segundo análises da Abracal, é crucial que agricultores e autoridades se concentrem nessa questão. Antigamente, o custo do corretivo em relação aos fertilizantes representava cerca de 10% do valor de uma fórmula básica de adubo, equivalendo o valor de 10 toneladas de corretivo a uma tonelada de fertilizante. Atualmente, essa proporção está em torno de 2%, tornando o calcário consideravelmente mais acessível em comparação aos fertilizantes (FORNARI, 2022).

Em 2021, as empresas de calcário destinaram aproximadamente R\$ 168 milhões, ou 4% a 5% de seu faturamento, em aprimoramentos produtivos. “No segmento de calcário agrícola, a demanda por alta tecnologia é baixa, visando-se alcançar a máxima produção no menor tempo”, destaca o Diretor Executivo da Abracal (FORNARI, 2022).

Especificamente em São Paulo, a indústria explora formas de aproveitar a camada estéril que precede a rocha calcária, buscando expandir a produção de calcário sem grandes investimentos, dada à infraestrutura já existente. Jutkoski menciona duas estratégias adotadas pelas empresas: promover a análise de solo, similar à iniciativa de Minas Gerais com laboratórios públicos e privados, e intensificar a colaboração com pesquisadores e universidades. “O calcário deve ser o primeiro insumo aplicado ao solo”, conclui o representante da Abracal (FORNARI, 2022).

## **2.3. Processo de extração mineral e beneficiamento**

### **2.3.1. Etapas do processo de extração mineral**

De acordo com o Departamento Nacional de Produção Mineral (Verum Partners, 2020), o processo de mineração conta com quatro etapas:

- Prospecção: etapa inicial na qual há o estudo da região e ocorre o reconhecimento geológico preliminar;
- Pesquisa mineral: fase de exploração, delineamento e avaliação da jazida mineral;
- Lavra: fase de desenvolvimento do projeto e exploração da jazida;
- Descomissionamento de mina: fase de desativação e fechamento da mina.

A lavra é caracterizada pelo conjunto de operações que tem por objetivo aproveitar industrialmente uma jazida mineral, desde a extração até o beneficiamento do minério, considerando as características socioeconômicas e geológicas da região. Em algumas minas, mais de um método de lavra pode ser empregado, a depender da disposição do mineral; e existem dois tipos de lavra: a lavra a céu aberto e a lavra subterrânea (Verum Partners, 2020).

A lavra a céu aberto é empregada quando a jazida de minério é superficial, e é possível explorar o minério até o esgotamento da jazida (Jazida, 2023). Os principais métodos são:

- Mineração em Bancadas (*Open Pit Mining*): Este processo implica na escavação de depósitos subsuperficiais em forma de bancos, que são camadas horizontais com inclinações calculadas com base na proporção de minério útil em relação ao material estéril. É extensamente aplicado em depósitos de grande escala e contribui com mais da metade da produção mineral nos métodos de mineração de superfície.
- Mineração em Tiras (*Strip Mining*): É empregado em jazidas compostas principalmente por camadas horizontais de minério com pequenas espessuras em relação às dimensões laterais. Nesse método, o material estéril é diretamente depositado em áreas próximas às escavações previamente realizadas. É comumente utilizado em depósitos de xisto betuminoso, carvão e outros minerais de estrutura horizontal.
- Mineração Aluvionar (*Placer Mining*): Este procedimento consiste na dragagem de depósitos do tipo placer, quer sejam naturais ou artificiais. A quantidade de água necessária varia de acordo com o tamanho da draga e o tamanho do depósito de placer.
- Pedreiras: As pedreiras são amplamente empregadas na extração de minerais e rochas para uso na construção civil. Este é o método mais conhecido e utilizado pelo público em geral, especialmente para a obtenção de minerais que se encontram a pouca profundidade.

A lavra subterrânea é a abordagem preferida para depósitos minerais situados a profundidades consideráveis, nos casos em que a relação entre material estéril e minério

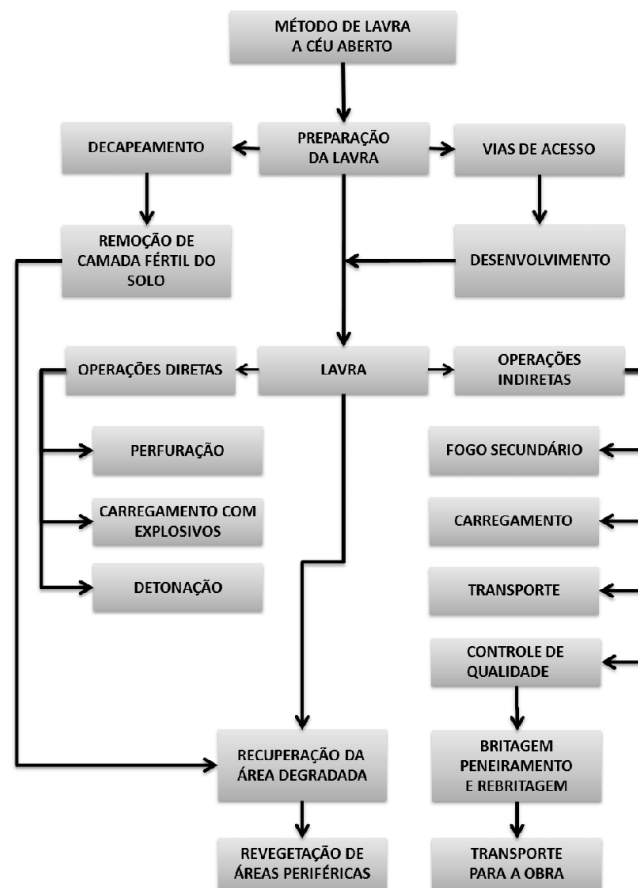
não favorece a mineração a céu aberto ou quando é requerida pela legislação (Jazida, 2023). Os principais métodos de mineração subterrânea incluem:

- **Métodos de Realce Autoportantes:** Estes métodos são empregados quando a continuidade e a homogeneidade do minério explorado são substanciais. Incluem técnicas como câmaras e pilares, subníveis e recuo por crateras verticais (VCR). Tais métodos são relativamente simples e altamente produtivos.
- **Métodos de Suporte das Encaixantes:** Nesse enfoque, a produtividade é mais limitada devido ao menor volume desmontado e à necessidade de operações de recalque e enchimento. Envolve técnicas como recalque e corte e enchimento.
- **Método de Abatimento:** Este método se vale da gravidade e da pressão acima do bloco mineralizado para promover o desprendimento do minério. Isso pode ser realizado por meio de subníveis, blocos ou longwall, conforme as características específicas da jazida.

### **2.3.2. Fluxograma de processo – lavra à céu aberto**

A Figura 4 apresenta o fluxograma do processo de lavra a céu aberto e beneficiamento mineral (britagem, peneiramento e rebritagem).

**Figura 4:** Fluxograma do processo de lavra e beneficiamento à céu aberto.



Fonte: Silva *et al*, 2014.

### 2.3.3. Principais operações unitárias do processo de lavra à céu aberto

O processo de lavra de jazidas minerais pelo método céu aberto conta com as seguintes etapas de trabalho e processos:

1. Desmatamento da região;
2. Remoção do capeamento;
3. Drenagem da mina;
4. Desmonte;
5. Carregamento;
6. Transporte;
7. Disposição do estéril.

A superfície da mina deve ser preparada antes das atividades de extração terem início. Dessa forma, é necessário desmatar a área, remover troncos, desviar rios ou riacho para fora dos limites da mina, drenar lagos e pântanos, remover edificações e

construções nos limites da mina. O processo de remoção vegetal é feito com tratores de lâmina (EZEQUIAS, 2020).

A etapa de drenagem da mina consiste no controle das águas pluviais, águas do lençol freático e águas de infiltração. É necessário pois permite a operação da lavra e estabiliza os taludes. É um processo que ocorre de forma simultânea a construção e exploração da mina (EZEQUIAS, 2020).

Os trabalhos essenciais e cruciais na mineração incluem a criação de trincheiras principais que possibilitam o acesso dos meios de transporte da superfície até a reserva mineral, bem como a preparação do solo para as atividades de desmonte e extração. Durante a fase de construção da mina, os trabalhos básicos de mineração também abrangem a escavação de trincheiras de corte, que estabelecem o fronte inicial para as operações de exploração da jazida (EZEQUIAS, 2020).

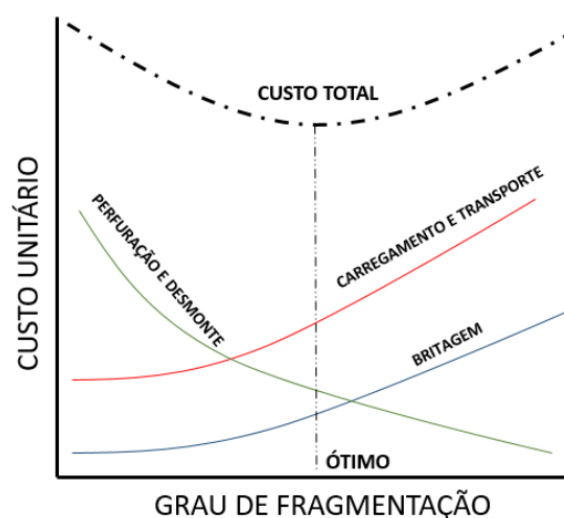
As operações de mineração envolvem procedimentos específicos para a extração e o transporte do minério até as instalações de beneficiamento. Estes procedimentos incluem:

- **Perfuração:** Máquinas de perfuração são empregadas para perfurar o minério, podendo ser realizadas de forma pneumática ou hidráulica. Parâmetros como diâmetro, espaçamento e profundidade dos furos são cuidadosamente calculados (Jazida, 2023).
- **Desmonte:** Nesta fase, explosivos são utilizados para fragmentar o minério. Os furos de perfuração são carregados com explosivos, e detonações controladas são efetuadas. O desmonte pode ser executado de maneira mecânica ou hidráulica, dependendo das características da rocha (Jazida, 2023). Uma operação de desmonte eficiente resulta em uma distribuição granulométrica equilibrada, evitando o acúmulo de material muito fino ou fragmentos muito grandes (matacos). Isso é alcançado por meio de um planejamento e execução adequados da perfuração (FERREIRA, 2021).
- **Transporte:** Após a fragmentação, o minério é transportado por meio de caminhões, vagonetas ou outros meios apropriados para pilhas de estocagem ou para as instalações de processamento (Jazida, 2023). O processo fundamental de carregamento e transporte em uma mina segue

as seguintes etapas: o caminhão se desloca até uma área de carregamento, onde as carregadeiras estão posicionadas. O caminhão aguarda o carregamento de sua caçamba, em seguida, parte para um local de descarga, frequentemente um britador ou pilha, onde descarrega o material. Após essa etapa, o ciclo se reinicia (FERREIRA, 2021).

É crucial estabelecer uma conexão entre essas operações, pois a otimização do processo como um todo depende do desempenho individual de cada uma delas, o qual influencia diretamente o resultado geral. A partir da Figura 5, é evidente que os custos de perfuração e desmonte diminuem à medida que a granulometria aumenta, enquanto os custos de carregamento e transporte aumentam com o aumento da granulometria. Segundo Botelho (2014), isso implica que é necessário encontrar um ponto de custo ótimo, levando em consideração a relação inversa entre os custos das operações unitárias.

**Figura 5:** Variação dos custos das operações unitárias em função da fragmentação.



**Fonte:** Adaptado de Botelho, 2014.

#### 2.3.4. Etapas do processo de beneficiamento de minério

O processo de beneficiamento de minérios consiste em operações unitárias que tem por objetivo a modificação da granulometria, a forma ou concentração das espécies, sem provocar alterações na identidade química dos minerais. Entretanto, algumas operações podem acarretar mudanças químicas, como aquelas decorrentes de exposição térmica (ALVES, 2012).

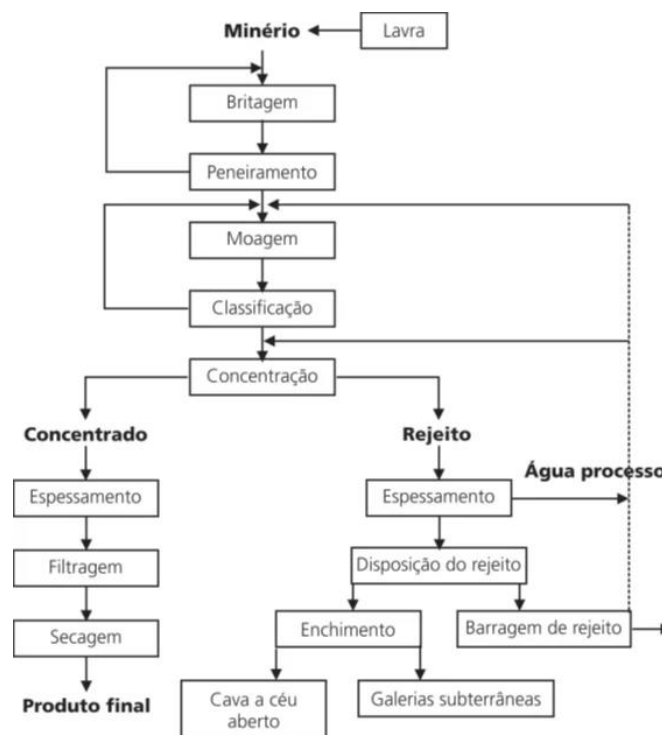
Nas operações unitárias são utilizadas propriedades como densidade, cor, condutividade elétrica, suscetibilidade magnética ou propriedade de superfície da molécula para promover a separação ou concentração do minério de interesse. Para isso ocorrer também é necessário que o minério apresente uma única espécie mineralógica, que é obtida a partir da fragmentação do mineral pelos processos de cominuição. A concentração do minério obtido após a separação pode ser realizada a úmido, sendo necessária a retirada da água no final do processo por operações hidro-pirometalúrgicas. Apesar da crescente modernização e inovação de processos industriais, ainda se faz improvável a obtenção de uma separação completa de minerais durante o processo de beneficiamento (ALVES, 2012).

Dessa maneira, entende-se que o processo de beneficiamento de minérios é de significativa importância à economia, pois permite acesso aos minerais da crosta terrestre em pureza adequada a produção de produtos para o mercado.

### 2.3.5. Fluxograma de processo de beneficiamento

A Figura 6 apresenta o fluxograma do processo de beneficiamento de minério.

**Figura 6:** Fluxograma do processo de beneficiamento de minério.



**Fonte:** Cristal Jr, 2020.

### 2.3.6. Principais operações unitárias do processo de beneficiamento

As plantas industriais de beneficiamento de minério são construídas considerando três etapas globais:

- I. Cominuição: britagem, moagem, peneiramento e classificação;
- II. Concentração: concentração magnética, por flotação, etc.; e
- III. Desaguamento: espessamento e filtração. secador rotativo, spray dryer, etc (ALVES, 2012).

A variação de cada planta irá depender de qual tipo de minério estará sendo tratado, pois cada minério demandará definição e sequência de operações e condições de operação específicas. Dessa forma se faz necessário estudo prévio das propriedades físico-químicas do minério, para que o processo seja construído de maneira adequada (ALVES, 2012).

#### 2.3.6.1. Britagem e moagem

Como visto anteriormente, o processo de cominuição consiste na mudança de tamanho do minério. Esse processo é realizado através das operações de britagem e moagem, peneiramento e classificação (ALVES, 2012).

Existem diversos tipos de etapas na britagem, porém todas com o mesmo objetivo de diminuição do tamanho das partículas. As etapas resultam na granulometria correta para o progresso da operação, apresentando diferentes equipamentos. Todo o conjunto de etapas pode resultar em fragmentos de rocha de 1000 mm até 10 mm (COLLERE, 2020).

A Tabela 1 apresenta as etapas da britagem e os intervalos de granulometria de alimentação e produto que cada uma compreende (COLLERE, 2020).

**Tabela 1:** Intervalos de granulometria para cada etapa do processo de britagem.

| Estágios de britagem | Tamanho máximo do fragmento de alimentação (mm) | Tamanho máximo do fragmento de produto (mm) |
|----------------------|-------------------------------------------------|---------------------------------------------|
| Britagem primária    | 1000                                            | 100                                         |
| Britagem secundária  | 100                                             | 10                                          |
| Britagem terciária   | 10                                              | 1                                           |
| Britagem quaternária | 5                                               | 0,8                                         |

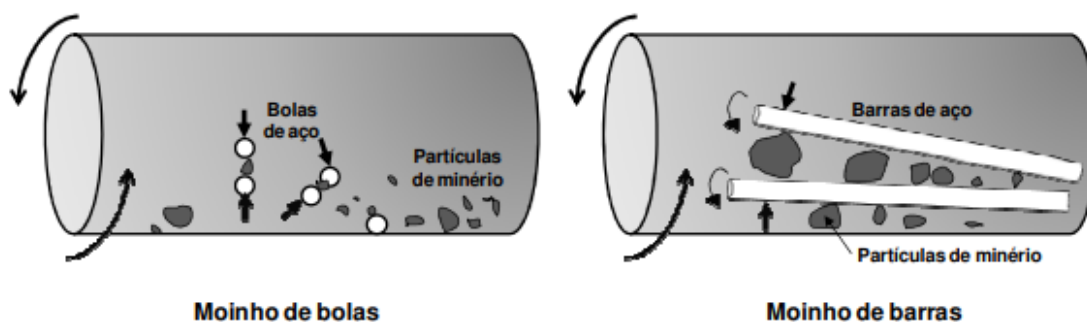
**Fonte:** COLLIERE, 2020.

A britagem primária é realizada a seco, e podem ser aplicados diversos tipos de britadores como britador de mandíbulas e britador de impacto. Esse processo recebe o material diretamente da lavra, ou seja, os fragmentos de maior granulometria, e pode chegar a uma razão de redução em torno de 8:1 (COLLERE, 2020).

A britagem secundária consiste no processo de britagem subsequente ao de britagem primária, com objetivo de redução granulométrica do material para destino à moagem. É comum a operação de escalpe, que consiste no descarte da fração fina na alimentação, visando maior capacidade de produção. São muito utilizados britadores giratórios, britadores de martelo, britadores de rolos e britadores cônicos; sendo o processo usualmente realizado a seco, em circuito aberto ou fechado (COLLERE, 2020). Os britadores secundários são mais leves e de menores dimensões quando comparados aos primários. Em alguns casos é necessária a britagem terciária ou quaternária para adequar a granulometria para o processo de moagem (SALAZAR, 2014).

A última etapa do processo de cominuição é a moagem, que tem por objetivo reduzir as partículas para granulometria entre 40 e 300  $\mu\text{m}$  através da fragmentação por impacto e abrasão. Essa operação unitária é realizada no moinho (Figura 7), um equipamento formado por um recipiente com corpos moedores, que são partes livres para se mover dentro da estrutura do moedor e fragmentar o material. Existem diversos tipos de corpos moedores como moinhos de barras, moinhos de bolas e moinhos semi-autógenos (SALAZAR, 2014).

**Figura 7:** Representação de carga em movimento em moinhos tubulares.

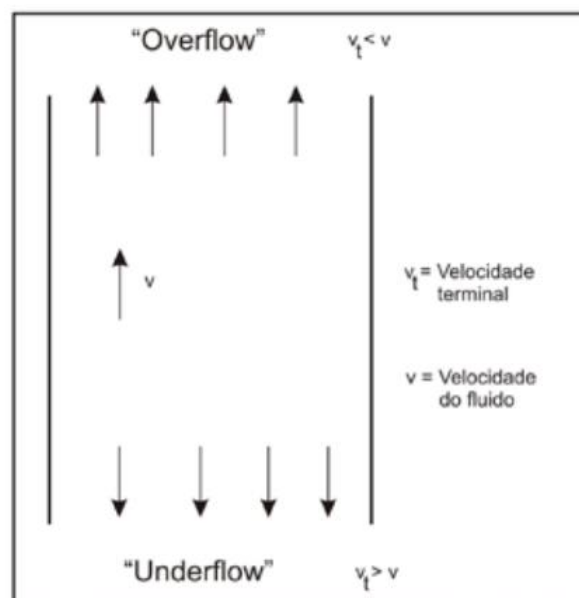


**Fonte:** SALAZAR, 2014.

### 2.3.6.2. Peneiramento e Classificação

Após a fragmentação do material, é necessário verificar se a granulometria está correta, e para isso são utilizados equipamentos para a classificação das partículas. Os classificadores são uma coluna de separação na qual o fluido, líquido ou gasoso, ascende em velocidade constante. As partículas, ao serem introduzidas no classificador, irão ascender com o fluido ou cair ao fundo da coluna, dependendo da velocidade terminal das mesmas, ou seja, da velocidade constante que apresentam ao sedimentarem em um meio fluido. Assim, obtém-se dois produtos, o *overflow*, composto pelas partículas que apresentam velocidade terminal menor que a velocidade do fluido; e o *underflow*, composto por partículas com velocidade terminal maior que a velocidade do fluido, como pode-se ver na Figura 8 (LUZ, *et al*, 2010).

**Figura 8:** Representação do *Overflow* e do *Underflow*.



**Fonte:** LUZ, *et al*, 2010.

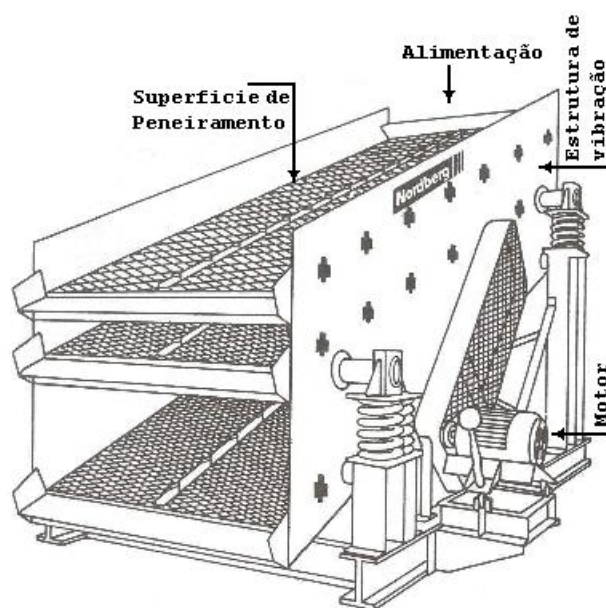
O processo de peneiramento pode ser realizado a seco ou a úmido. O peneiramento a seco é normalmente realizado em frações granulométrica de até 6 mm, sendo possível peneira com eficiência frações de 1,7 mm. Já no peneiramento a úmido é adicionado água ao material e pode ser aplicado para peneira partículas de diâmetro de até 0,4 mm (LUZ, *et al*, 2010).

Existem diversos tipos de equipamentos que podem ser utilizados no peneiramento de materiais. São divididos em três tipos:

- a) Grelhas: são formadas por barras metálicas dispostas de forma paralela, com espaçamento regular entre si;
- b) Crivos: são formados por chapas metálicas planas ou curvas com perfurações de várias formas e dimensões determinadas;
- c) Telas: são formadas por fios metálicos trançados de forma a deixarem espaços abertos (malhas) de dimensões determinadas, podendo ser quadradas ou retangulares (LUZ, *et al*, 2010).

Na mineração, as peneiras vibratórias (Figura 9) estão constantemente presentes no processo. O movimento de vibração é caracterizado por impulsos rápidos e de pequena amplitude, de 1,5 a 25 mm, com alta frequência, de 600 a 3600 movimentos por minuto (LUZ, *et al*, 2010).

**Figura 9:** Peneira Vibratória



**Fonte:** LUZ, *et al*, 2010.

#### **2.3.6.3. Concentração e Desaguamento**

O processo de concentração de minérios está presente quando se faz necessário separar o mineral ou os minerais de interesse daqueles que não são. Para que isso ocorra é necessário que o material de interesse não esteja agregado com os demais, apresentando a importância do bom desenvolvimento dos processos de fragmentação e classificação. As principais características físico-químicas dos minerais consideradas nesse processo são a densidade e a diferença de susceptibilidade magnética. Quando essas características não são expressivamente diferentes entre o mineral de interesse e os

demais, utilizam-se técnicas baseadas em propriedades de superfície, como a flotação (LUZ, *et al*, 2010).

O método mais utilizado no processo de concentração é a concentração gravítica ou gravimétrica. Esse processo baseia-se na diferença de densidade dos minerais em um meio fluido, ar ou água. São utilizadas mesas vibratórias, hidrociclones e centrifugadores centrífugos para realizar a concentração (LUZ, *et al*, 2010).

Outra forma de realizar o processo de concentração é pela flotação. A flotação na concentração de minério encontra-se na interface água/ar e água/óleo, e atualmente são utilizados os seguintes processos na indústria mineral:

- Flotação por espumas: minerais hidrofóbicos dispersos no meio aquoso são coletados por bolhas de ar e arrastados até a superfície, já os minerais hidrofílicos permanecem no meio aquoso;
- Flotação em película: utiliza-se as propriedades da interface água/ar para realizar a separação, na qual o produto é despejado lentamente no meio aquoso, fazendo com que os minerais hidrofílicos se molhem e afundem enquanto os hidrofóbicos permanecem secos e na superfície;
- Flotação em óleo: utiliza-se as propriedades da interface água/óleo. Os minerais são adicionados em uma suspensão água/óleo e passam por um processo de agitação, fazendo com que os minerais hidrofílicos permaneçam na água e os hidrofóbicos desloquem-se para o óleo após o repouso do sistema;
- Flotação carreadora: processo de recuperação de partículas ultrafinas a partir do uso de partículas hidrofóbicas de maior granulometria. As partículas finas aderem as partículas maiores, assim são carregadas pelas bolhas de ar juntamente com as partículas hidrofóbicas;
- Eletroflotação: as bolhas de gás são formadas a partir da decomposição eletroquímica da água; e
- Flotação em floco: utilizado na recuperação de partículas finas. As mesmas agregam-se e os flocos formado são flotados de modo tradicional (LUZ, *et al*, 2010).

Após o processo de concentração se faz necessário a retirada do material que não é de interesse. Quando há presença de água pode-se realizar o processo de

desaguamento de polpas e lamas minerais, comumente realizado pelo espessamento, que consiste em aumentar a concentração da suspensão por meio da sedimentação em tanques. É formada uma fase líquida clarificada, que é retirada pela parte superior do tanque, enquanto o sólido de interesse é retirado pela parte inferior (OLIVEIRA, 2004).

Os espessadores mais utilizados são aqueles que possuem um tanque cilíndrico com um fundo cônico. O fundo apresenta raspadores, que tem por finalidade direcionar o sólido sedimentado ao orifício de descarte da fase sólida. Sua desvantagem consiste em seu tamanho, pois ocupa área maior quando comparado à outros métodos de separação sólido-líquido, como a filtração ou centrifugação (OLIVEIRA, 2004).

## **2.4. Dimensionamento de equipamentos**

### **2.4.1. Tipos de Silos**

Os silos são equipamentos que tem por objetivo o armazenamento de sólidos particulados, diferente de reservatórios que fazem o armazenamento de fluidos. Em reservatórios as forças hidrostáticas predominam, enquanto em silos é necessário considerar as pressões elevadas decorrente do atrito do produto armazenado com as paredes do silo.

Na indústria existem diversos tipos de silos, com diferentes finalidades. São classificados de acordo com suas características como: formato, material utilizado na construção, capacidade de armazenamento e função desempenhada. As três principais funcionalidades são: espera, secagem e armazenamento (Sansuy, 2024).

Os silos de espera são muito utilizados na agropecuária para realizar a limpeza e armazenamento inicial de grãos. O produto não permanece por um longo período de tempo nesse tipo de silo, pois as condições de temperatura não são adequadas para o armazenamento correto do produto. Já os silos de secagem, como o nome indica, exercem a função de controle de temperatura interna e umidade do produto, garantindo as condições ideais para armazenagem. Assim, o produto segue para o silo de armazenamento, no qual será efetivamente estocado até a etapa de transporte (Sansuy, 2024).

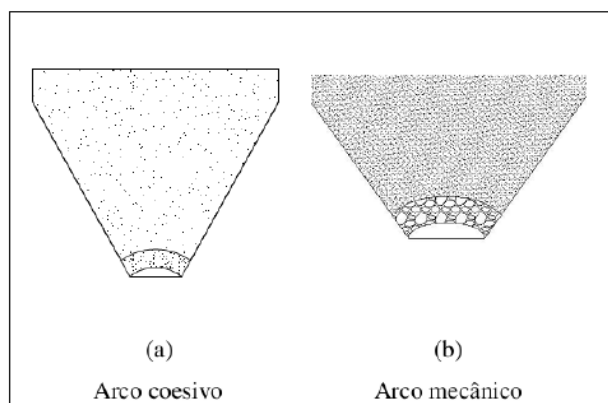
Outro parâmetro que diferencia os silos é a tipo de fundo, que pode ser plano ou cônico (ou com tremonha). Caso o diâmetro da base seja menor que a altura do silo, esta

será denominado silo vertical, no caso contrário, será denominado silo horizontal (LOBATO, 2013).

#### 2.4.2. Propriedades do produto armazenado

Para o dimensionamento de silos industriais é necessário determinar como o produto flui pelo silo; movimento que será governado pelas propriedades de fluxo do produto e pela geometria e estrutura da tremonha utilizada. Os principais problemas de descarga de silos estão relacionados com as dimensões das tremonhas e geometria do silo, que podem levar a formação de arcos coesivos (Figura 10) que obstruem a passagem de produto. Os arcos coesivos são mais comuns em produtos de granulometria fina e coesiva, enquanto os arcos mecânicos podem ocorrer no escoamento de produtos com tamanhos variados e formas irregulares (LOBATO, 2013).

**Figura 10:** Representação da obstrução de fluxo em silos.



**Fonte:** LOBATO, J. C. M., 2013.

Alguns fatores, como rugosidade da parede do silo, forma e inclinação da tremonha e o tamanho do orifício de saída são fatores que influenciam no comportamento do produto durante a descarga. Em sistema de descarga por gravidade também deve ser analisado as diferenças de pressão formadas nas paredes do silo durante a descarga (LOBATO, 2013).

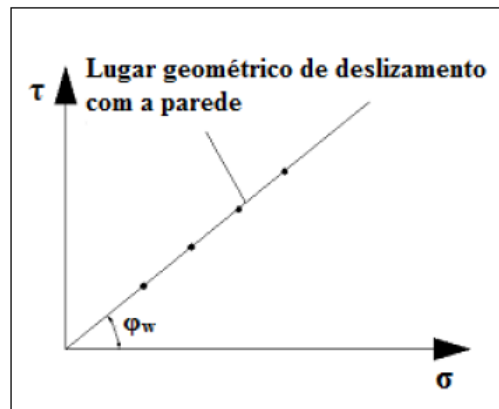
Antes do cálculo de dimensionamento do silo, é necessário determinar as propriedades do material que será armazenado, pois as forças atuantes dentro do silo serão decorrentes de parâmetros como densidade, compressibilidade, etc. Além disso, as propriedades do material irão influenciar no fluxo do produto dentro do silo, devido a relação com o tamanho da partícula, grau de umidificação e coesão, por exemplo (LEITE, 2008).

As principais propriedades que devem ser determinadas para o dimensionamento são: ângulo de atrito interno, ângulo de atrito interno efetivo, ângulo de atrito com a parede do silo, ângulo de repouso do material e função fluxo do material.

#### 2.4.2.1. Ângulo de atrito com a parede e ângulo de repouso

O ângulo de atrito com a parede,  $\phi_w$ , diz respeito ao atrito existente entre as partículas do produto e a parede do compartimento de armazenamento. Esse parâmetro é necessário pois com ele será possível determinar o ângulo de inclinação da tremonha cônica com a vertical, para que ocorra o estado de fluxo mássico. Para determiná-lo é necessário construir a reta que determina o lugar geométrico de deslizamento com a parede, a partir da pressão normal ( $\sigma$ ) aplicada ao material em função da medida de cisalhamento ( $\tau$ ) da tensão necessária para superar o atrito entre a amostra e a parede do silo, como apresentado na Figura 11 (LOBATO, 2013).

**Figura 11:** Representação gráfica da obtenção do ângulo de atrito entre produto e material da parede do silo.



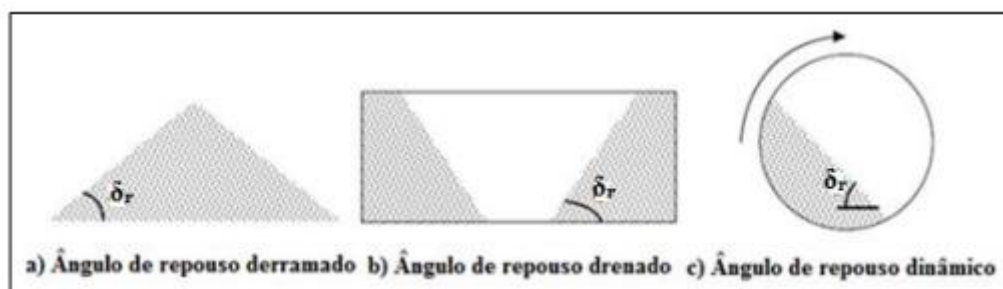
**Fonte:** LOBATO, 2013.

$$\phi_w = \tan^{-1} \left( \frac{\tau_w}{\sigma_w} \right) \quad (01)$$

$$\mu_w = \tan \phi_w \quad (02)$$

O ângulo de repouso,  $\phi_r$ , é o ângulo que a superfície livre inclinada de uma pilha de material granulado em relação a horizontal da ase na qual a pilha se encontra. Esse valor não é constante pois depende da forma que a pilha de material foi formada. Existem três maneiras de quantificar esse ângulo (Figura 12), sendo: ângulo de repouso ‘derramado’, ângulo de repouso ‘drenado’ e ângulo de repouso dinâmico (LOBATO, 2013).

**Figura 12:** Representação da obtenção dos diferentes ângulos de repouso.



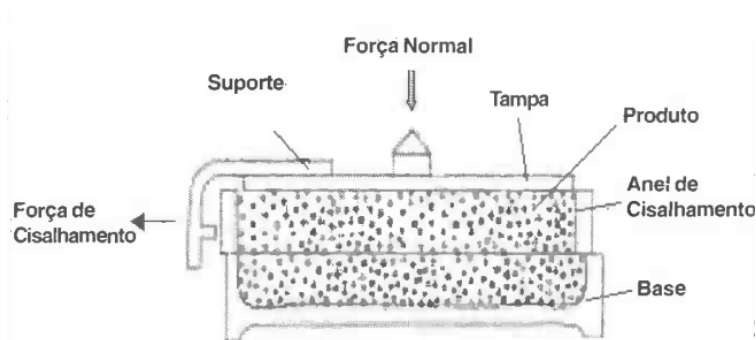
**Fonte:** LOBATO, 2013.

O ângulo de repouso derramado é obtido a partir do derramamento do produto granulado em uma superfície plana e horizontal. O ângulo de repouso drenado é obtido ao medir o ângulo na face cônica interna de uma pilha de material em um container. Essa pilha deve ser formada a partir da drenagem do material do container por um orifício. E o ângulo de repouso dinâmico é aquele formado, em relação a horizontal, por uma pilha de material dentro de um cilindro girando vagarosamente (LOBATO, 2013).

#### 2.4.2.2. Célula de cisalhamento de Jenike

Uma das maneiras de obter as propriedades anteriormente mencionadas é fazendo uso da Célula de Cisalhamento de Jenike, apresentada na Figura 13. O aparato de cisalhamento é composto por uma célula de cisalhamento cilíndrica, posicionada sobre a base da máquina. Contém um pendural, responsável por aplicar carga à célula verticalmente por ação da gravidade; um suporte eletromecânico, que produz movimento horizontal que provoca o cisalhamento; e uma célula de carga e um registrador, que mede a força de cisalhamento e faz o registro da mesma (PALMA; CALIL, 2005).

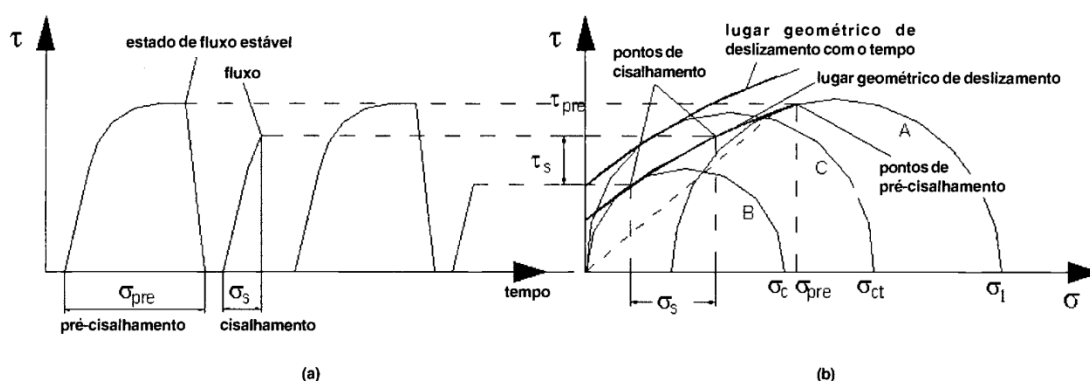
**Figura 13:** Representação da Célula de Cisalhamento de Jenike



**Fonte:** PALMA; CALIL, 2005.

No início do cisalhamento, o valor da tensão de cisalhamento e a densidade do produto aumentam com o passar do tempo. Após certo tempo de ensaio, os valores tornam-se constantes, como pode-se ver na Figura 14(a). No pré-cisalhamento o produto encontra-se em estado de consolidação definido, e quando os parâmetros estabilizam o produto passa para o estado de fluxo estável, no qual a amostra está consolidada criticamente (círculo de tensão A na Figura 14(b)). Gráficamente, o ponto de estado de fluxo estável é determinado a partir da tensão normal  $\sigma_{pre}$  e da tensão de cisalhamento  $\tau_{pre}$  (Figura 14(b)) (PALMA; CALIL, 2005).

**Figura 14:** Gráficos obtidos ao realizar o experimento com célula de cisalhamento.



**Fonte:** PALMA; CALIL, 2005.

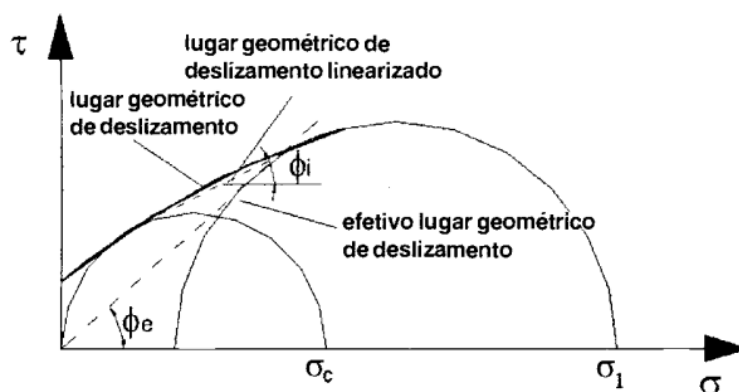
Em seguida, diminui-se a tensão normal  $\sigma_{pre}$  para  $\sigma_s$  ( $\sigma_s < \sigma_{pre}$ ) para que ocorra o cisalhamento, fazendo com que a força de cisalhamento aumente rapidamente atingindo um valor máximo, que será determinado como a tensão de cisalhamento. O produto inicia o fluxo ao ser submetido a tensões representadas pelo círculo B, no qual alcança o ponto de ruptura (PALMA; CALIL, 2005).

As tensões normais e as tensões de cisalhamento correspondentes fornecem um ponto sobre o lugar geométrico de deslizamento. Assim, ao pré-cisalhar diversas amostras diferentes valores de tensão normal  $\sigma_{pre}$  é possível obter pontos no gráfico que irão representar a reta do lugar geométrico de deslizamento. O lugar geométrico de deslizamento é um conjunto de ponto que representam os estados de tensões nas quais o produto entra em fluxo (PALMA; CALIL, 2005).

Determinados o lugar geométrico de deslizamento e a tensão de consolidação  $\sigma_1$ , que equivalente a tensão principal do maior Círculo de Mohr obtido no final do procedimento de consolidação, é possível obter a tensão confinada  $\sigma_c$  traçando um

círculo que passa pela origem e é tangente a reta do lugar geométrico linearizado. A partir destas informações pode-se obter o ângulo de atrito interno  $\phi_i$ , que equivale a inclinação da reta do lugar geométrico linearizado e o ângulo de atrito interno efetivo  $\phi_e$  equivalente a inclinação da reta que passa pela origem e pelo ponto do lugar geométrico tangente ao maior Círculo de Mohr, como apresentado na Figura 15 (PALMA; CALIL, 2005).

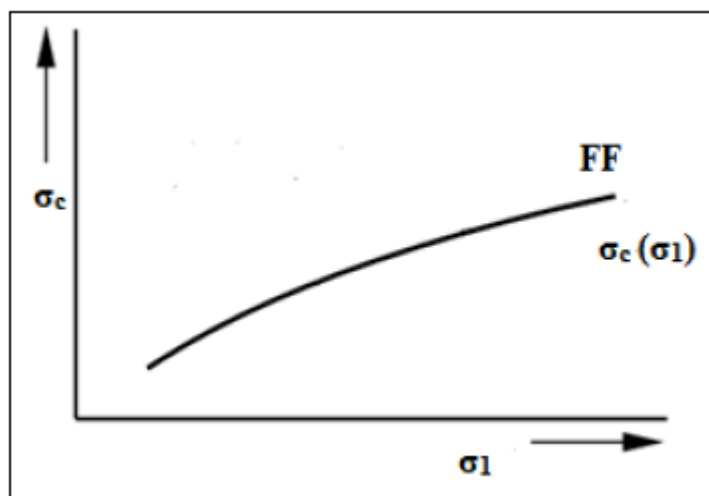
**Figura 15:** Curva característica de YL e EYL



**Fonte:** PALMA; CALIL, 2005.

Em seguida, pode-se obter a Função Fluxo ( $FF$ ) (Figura 16) pela relação entre a tensão não confinada  $\sigma_c$  em função da maior tensão principal de consolidação  $\sigma_1$ , ou seja, à medida que o esforço de consolidação varia ocorre a modificação do resultado da tensão não confinada, gerando diferentes  $FF$  (SCHULZE, 2021).

**Figura 16:** Representação gráfica da obtenção da Função de Fluxo.



**Fonte:** LOBATO, 2013.

#### 2.4.2.3. Demais propriedades importantes

Além das propriedades anteriormente descritas, também se faz necessário determina o índice de escoabilidade e o fator de fluxo da tremonha para que a tremonha seja dimensionada.

O índice de escoabilidade,  $ff$ , representa a fluidez de sólidos a granel, e é calculado com uma relação direta entre a pressão de consolidação e a resistência não confinada (Equação 03) (SCHULZE, 2021).

$$ff = \frac{\sigma_1}{\sigma_c} \quad (03)$$

A partir do valor do índice de escoabilidade, pode-se classificar o produto de acordo com os parâmetros apresentado na Tabela 2.

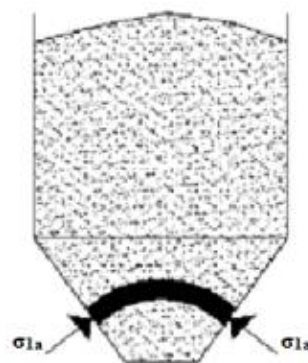
**Tabela 2:** Classificação dos produtos de acordo com o valor do Índice de Escoabilidade

| Valor do Índice de Escoabilidade ( $ff$ ) | Classificação do Produto        |
|-------------------------------------------|---------------------------------|
| $ff < 2$                                  | Produto muito coesivo           |
| $2 < ff < 4$                              | Produto coesivo                 |
| $4 < ff < 10$                             | Produto que esco com facilidade |
| $ff < 10$                                 | Produto de escoamento livre     |

**Fonte:** LOBATO, 2013.

Já o fator de fluxo da tremonha é um parâmetro utilizado para indicar a fluidez do produto armazenado, relacionando  $\sigma_1$  com a tensão atuando em um arco estável imaginário ( $\sigma_{1a}$ ), mostrado na Figura 17. A Equação 04 apresenta o cálculo do fator de fluxo da tremonha. Quanto mais baixo o valor de  $ff_c$ , melhor será a fluidez do produto pela tremonha do silo (SCHULZE, 2021).

**Figura 17:** Representação de um arco estável em uma tremonha.



**Fonte:** LOBATO, 2013.

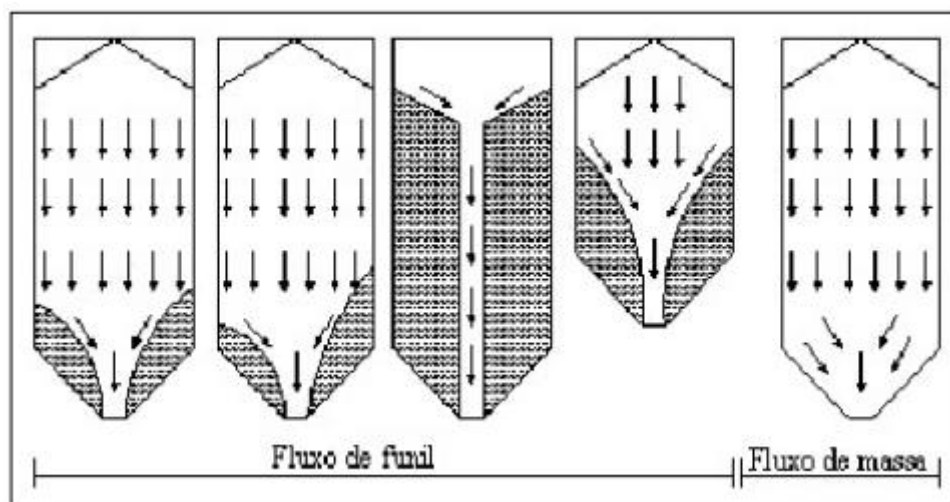
$$ff_c = \frac{\sigma_1}{\sigma_{1a}} \quad (04)$$

### 2.4.3. Dimensionamento de tremonhas cônicas em fluxo mássico

Para dimensionamento da tremonha do silo é necessário conhecer as propriedades de fluxo do produto a ser armazenado, escolher a forma da tremonha e o tipo de fluxo que será desenvolvido na tremonha. Existem dois tipos de fluxo em silos: fluxo de massa e fluxo de funil.

No escoamento com fluxo de massa, toda a massa de material contida no silo se movimenta de maneira homogênea ao realizar descarga de material. Nessa configuração o peso específico do produto mantém-se constante e a altura do silo não exerce influência no escoamento. Já o fluxo em funil ocorre quando a parede do silo não apresenta angulação suficiente para promover a descarga, e a superfície do silo não é lisa o bastante para o deslocamento. O movimento de produto no fluxo de funil ocorre das bordas do silo para dentro, em direção a abertura de descarga, e uma vez determinado o canal de escoamento, todo o deslocamento de produto ocorrerá por ele. A Figura 18 apresenta de maneira esquemática os dois tipos de fluxo em funil (SCHULZE, 2021).

**Figura 18:** Representação dos tipos de fluxo em tremonhas.



**Fonte:** LOBATO, 2013.

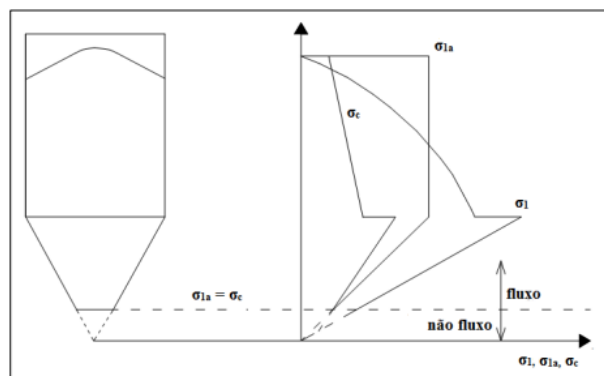
Para a ocorrência do fluxo de massa, é necessário que algumas condições sejam atendidas. É diretamente ligado com o ângulo de atrito entre o produto e a parede do silo, que varia de acordo com:

- a) Material escolhido para a construção do silo: quanto mais lisa for a superfície do material, menor será o ângulo de atrito com a parede;
- b) Temperatura de armazenamento do produto e temperatura das paredes do silo;
- c) Umidade proveniente das paredes do silo, nos casos em que o produto armazenado está a uma temperatura maior em relação a temperatura do silo;
- d) Corrosão decorrente da oxidação do material utilizado na construção do silo;
- e
- e) Tempo de armazenamento, devido a aderência do produto à parede do silo quando armazenado por um período sob pressão, resultando em maiores ângulos de atrito e consequentemente tremonhas com inclinações maiores (LOBATO, 2013).

Em primeira instância, faz-se necessário analisar o comportamento de uma partícula durante o processo de descarga do silo. A tensão de consolidação  $\sigma_1$  aumenta com o aumento da profundidade da partícula, até atingir um valor constante. No momento de transição entre a parede vertical do silo e a tremonha ocorre um pico de tensão, e em seguida a pressão diminui conforme o produto é descarregado (LOBATO, 2013).

Caso  $\sigma_{1a} > \sigma_c$ , não há a formação de arcos no momento de descarga, mas se  $\sigma_{1a} < \sigma_c$ , ocorre a formação de arco, como esquematizado na Figura 19. Entretanto, ao diminuir a abertura de descarga e manter as demais variáveis constantes, a tensão não confinada irá superar a tensão atuante no arco, levando a formação de arco na tremonha (LOBATO, 2013).

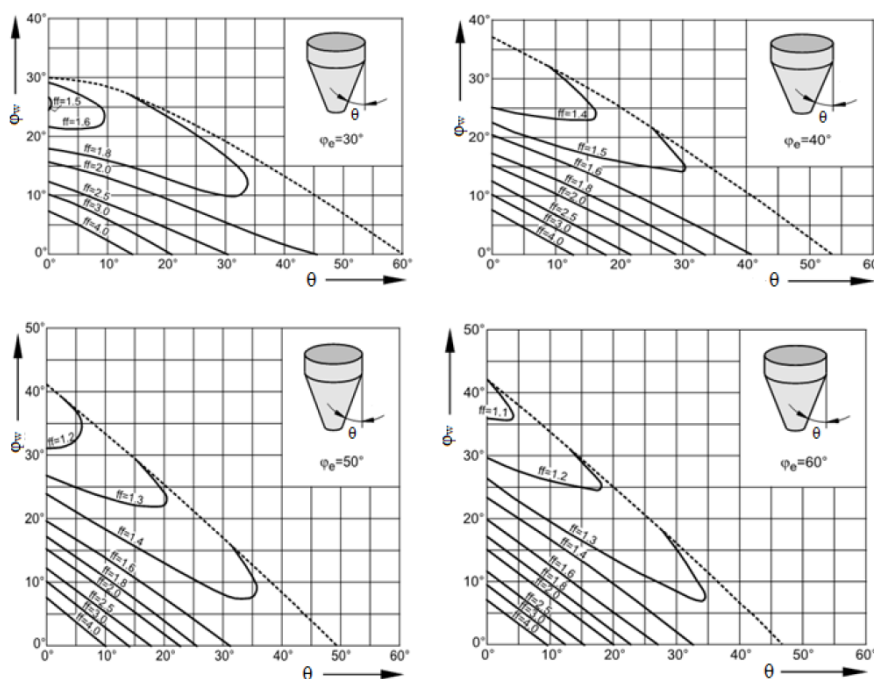
**Figura 19:** Análise de tensões para a não formação de arcos.



**Fonte:** LOBATO, 2013.

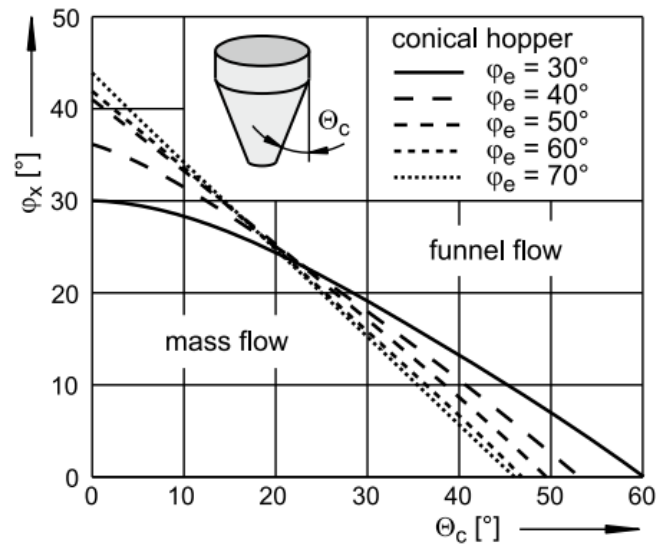
O dimensionamento da tremonha parte com os ângulos de atrito com a parede e ângulo de atrito interno efetivo definidos para o produto armazenado e material de construção do silo. Propõe-se o uso da abordagem de Jenike, explicada anteriormente, para obtenção dos ângulos de atrito interno e atrito interno efetivo. Com essas informações é possível obter o ângulo de inclinação máximo da tremonha em relação ao eixo vertical a partir dos diagramas da Figura 20. O ângulo de atrito interno efetivo determina a linha limite que separa o fluxo de massa do fluxo de funil, como demonstrado na Figura 21 (SCHULZE, 2021).

**Figura 20:** Diagramas para a determinação de fatores de fluxo para tremonhas cônicas com ângulo interno efetivo de 30°, 40°, 50° e 60°.



Fonte: SCHULZE, 2021.

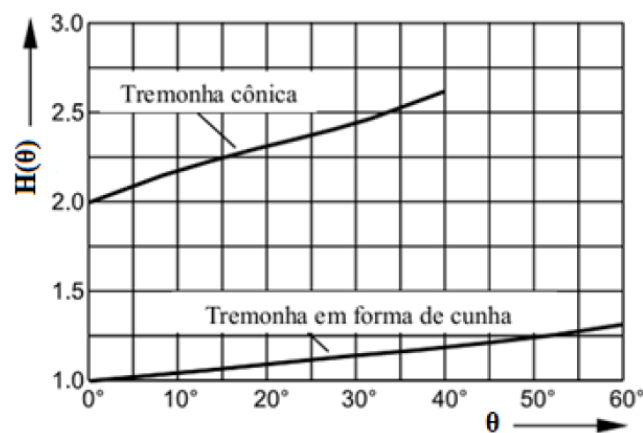
**Figura 21:** Diagrama de fluxo de massa em tremonha cônica.



**Fonte:** SCHULZE, 2021.

Para determinar o diâmetro do orifício de descarga da tremonha,  $b$ , leva-se em consideração que tanto  $\sigma_{1a}$  quanto  $\sigma_1$  são proporcionais ao valor do diâmetro, e que o diâmetro de descarga é uma função do valor de  $r$  (raio do vértice virtual até  $\sigma_{1a}$ ), e do ângulo de inclinação da tremonha. Com a forma geométrica definida e o ângulo de inclinação calculado, é necessário determinar o valor da função  $H(\theta)$ , com auxílio do gráfico presente na Figura 22, que é utilizada para calcular o diâmetro de descarga da tremonha, segundo a Equação 05, na qual  $\sigma_{cri}$  é a tensão crítica e  $\gamma$  é o peso específico do material (SCHULZE, 2021).

**Figura 22:** Determinação da função  $H(\theta)$  para tremonhas cônicas e em cunha.

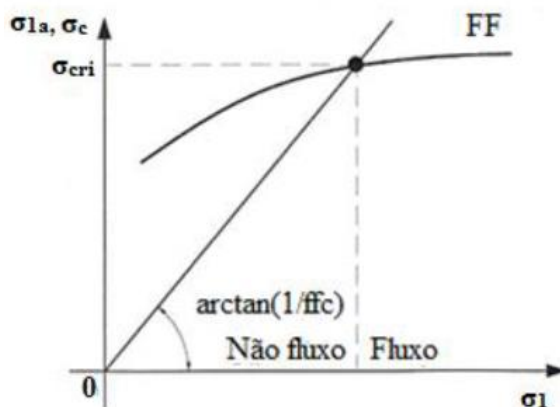


**Fonte:** LOBATO, 2013.

$$b = \frac{H(\theta) \sigma_{cri}}{\gamma} \quad (05)$$

A tensão crítica é aquela a partir da qual ocorre o fluxo de material na tremonha. Seu valor iguala-se a  $\sigma_{1a}$  e  $\sigma_c$ , e pode ser determinada no ponto de intersecção da reta que parte da origem e tem inclinação igual a  $\arctan(1/ff_c)$  e da função de fluxo, como mostra a Figura 23 (SCHULZE, 2021).

**Figura 23:** Representação gráfica do critério de fluxo e não fluxo, ou seja, não formação ou formação de arco coesivo.



Fonte: LOBATO, 2013.

## 2.5. Impactos ambientais e riscos à saúde do trabalhador

A atividade de extração de minérios está entre aquelas de maior impacto socioambiental negativo, desde contaminação do meio ambiente até danos à saúde do trabalhador.

Pode-se citar como os principais impactos ambientais: remoção da vegetação nativa e consequente afugentamento da fauna nas áreas de exploração; poluição sonora e atmosférica em torno das instalações dos empreendimentos mineradores; contaminação do solo e recursos hídricos presentes no local (SILVA, 2021).

Os impactos têm início antes da exploração do solo, com a retirada da vegetação, que traz impactos à biodiversidade do local e agrava fatores como erosão, risco de desabamentos e retirada da camada superficial do solo que apresenta maior concentração de nutrientes necessários ao desenvolvimento da flora. Como o minério não está distribuído uniformemente no solo, o processo de exploração gera resíduos,

denominado estéril; que ao ser depositado de maneira incorreta leva ao agravamento da contaminação do solo e de recursos hídricos. A alocação inadequada de rejeitos apresenta-se como um fator importante em relação à impactos ambientais, tendo em vista o potencial de geração de catástrofes regionais, como os casos em Mariana e Brumadinho no estado de Minas Gerais. Também pode-se citar emissão de gases de efeito estufa como um impacto ambiental gerado pelo processo de mineração; em especial o dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), que contribui com 7% das emissões do país (SILVA, 2021).

As principais fontes geradoras de impactos são o uso de explosivos e caminhões fora de estrada, que trafegam nas encostas da cava da mina. As explosões, além de provocarem a poluição sonora, também podem gerar danos às construções em torno das empresas, devido à vibração, afetando residências e comércios locais. Outro fator decorrente do uso de explosivos é a geração de poeira, que ao ser transportada pelo vento pode atingir a comunidade próxima e provocar danos à saúde pulmonar, oftalmológica e dermatológica dos moradores. A depender do minério explorado, a poeira gerada pode causar desde bronquite até doenças mais graves (SILVA, 2021).

Assim como a população local está exposta aos impactos ambientais decorrentes da explosão mineral, os trabalhadores dos empreendimentos também estão, mas em uma intensidade maior. Pode-se citar doenças ocupacionais decorrentes da exposição intermitente à agentes de risco (poeiras e poluição sonora) como agravamentos na performance respiratória, com o desenvolvimento de bronquite e pneumoconiose, e perda auditiva. Além disso, irritação dos olhos e dores de cabeça. Nesse cenário, faz-se necessário o uso correto e obrigatório de equipamentos de proteção individual (EPI) para a minimização do grau de exposição (SILVA, 2021).

### 3. Avaliação de riscos, perigos e medidas de controle no processo de extração e beneficiamento de minério

#### 3.1. Perigos, riscos e danos à saúde

O trabalho realizado em empresas de extração e beneficiamento de calcário apresenta diversos riscos e perigos, a depender da atividade exercida. Entende-se por perigo o potencial de um processo, produto ou situação gerar danos à saúde ou danos materiais. O perigo surge a partir de propriedade físico-químicas de produtos químicos utilizados no processo produtivo ou exposição a condições de trabalho perigosas, como o contato com eletricidade, fontes de incêndio ou cilindros de gás comprimido, por exemplo. Por outro lado, o risco caracteriza a possibilidade ou probabilidade de danos, de saúde ou materiais, quando a pessoa ou insumos é exposto aos riscos (SILVA, 2023).

Os processos de extração e beneficiamento de minério apresentam diversos perigos e riscos aos trabalhadores durante todo o processo, além de expor às pessoas a condições extremas e contato com substâncias tóxicas (SOUSA, 2015). Avaliando o processo produtivo, podem-se elencar os seguintes riscos:

- **Trabalho realizado nas bancadas da cava:** os maciços de rocha apresentam instabilidades devido ao processo extrativo, e essa característica gera riscos como: materiais soltos nas áreas de deslocamento dificultando a condução de veículos, queda de blocos de pedra podendo atingir veículos e pessoas, ausência de proteção contra queda nas bancadas, erro humano (direção do veículo, carregamento do veículo) que pode causar acidentes, ou problemas técnicos no veículo;
- **Operações com veículos:** capotamento, colisão com outros veículos, esmagamento ou atropelamento de trabalhadores;
- **Pavimento e solo:** risco de tropeções, quedas e escorregamentos;
- **Manutenção e reparação de máquinas:** possíveis quedas de veículos, compressão ou esmagamento nas máquinas, esforço físico intenso, exposição a corrente elétrica com isolamento ineficiente;
- **Equipamentos de soldagem:** promove exposição à projeção de material incandescente e a fumos metálicos que podem conter partículas de manganês, chumbo, níquel; substâncias nocivas à saúde;

- **Equipamentos de alta pressão:** riscos associados ao trabalho em ambientes hiperbáricos;
- Riscos atrelados a situações de emergência, como explosões, incêndios, desmoronamentos e inundações (SOUSA, 2015).

Além dos perigos presentes no processo produtivo, também está presente no dia a dia dos trabalhadores a exposição à agentes nocivos (físicos, químicos, biológico e ergonômicos) e condições ambientais desfavoráveis, tais como:

- **Agentes físicos:** exposição a vibrações (máquinas e veículos) transmitidas ao corpo todo ou a mãos e braços, ruído e poeiras;
- **Agentes químicos:** exposição à sílica e/ou asbesto, substâncias inflamáveis, explosivos, graxas e solventes orgânicos;
- **Agentes biológicos:** presentes no trabalho de limpeza dos banheiros;
- **Riscos ergonômicos:** longas jornada de trabalho com intenso esforço físico ou na mesma posição (postura incorrera),
- **Agentes ambientais adversos:** funções externas com exposição a temperaturas extremas, radiação UV, chuva e umidade (SOUSA, 2015).

Os perigos ocupacionais, sejam eles relacionados as funções exercidas, maquinário ou agentes nocivos, geram riscos à saúde dos colaboradores, desde incômodos musculares até doença graves, como insuficiência respiratória. Analisando os agentes nocivos pode-se elencar duas principais doença ocupacionais frequentes em atividades mineradoras: a silicose e a perda auditiva.

A sílica (quartzo, sílica livre, sílica livre cristalizada ou sílica cristalina),  $\text{SiO}_2$ , é uma substância quimicamente inerte, e é amplamente utilizada como aditivo na indústria alimentícia. No setor mineral, a principal fonte de sílica cristalina é o quartzo (GRUENZNER, 2003).

Apesar de ausência de reatividade no trato digestivo, o mesmo não ocorre nas vias respiratórias. A sílica cristalina apresenta toxicidade ao ser inalada, pois as partículas respiráveis depositam-se na região alveolar, levando à um processo fibrótico no pulmão, conhecido como silicose; no qual a sílica provoca danos na membrana celular do macrófago alveolar (lise celular). Ressalta-se que a silicose é uma doença

irreversível, que não apresenta quadros de estabilização, ou seja, a doença continua progredindo após a exposição ao agente de risco ser cessada (GRUENZNER, 2003).

Segundo Gerrit Gruenzner (2003) a silicose pode se manifestar de três maneiras:

- Silicose aguda: desenvolve-se com a exposição a altas concentrações e manifesta-se no período de até 5 anos.
- Silicose acelerada ou sub-aguda: desenvolve-se com a exposição a altas concentrações de sílica e manifesta-se entre 5 a 10 anos de exposição.
- Silicose crônica: caso no qual há evolução lenta e progressiva, levando a caso de insuficiência pulmonar. Os sintomas são notados após um tempo de latência de 10 ou mais anos, e quando são identificados o dano pulmonar já está presente.

Ademais, o momento no qual a exposição ocorre interfere na toxicidade da partícula. Segundo Castranova et al. (1996), o processo de trituração da sílica cristalina forma radicais livres sílico-oxigênio na superfície da partícula. Por serem biologicamente mais reativos, o contato com os radicais eleva a citotoxicidade da partícula, comprovada pelo aumento de células vermelhas, e causa lesões e inflamações pulmonares mais graves, verificada pela maior solicitação de leucócitos e ocorrência de peroxidação lipídica. De acordo com pesquisas desenvolvidas, a sílica é classificada pela Agência Internacional para Pesquisa em Câncer (IARC) como substância do grupo 1, ou seja, carcinogênica para humanos.

Outra doença ocupacional comum dentre os trabalhadores do setor de mineração é a Perda Auditiva Induzida por Níveis de Pressão Sonora Elevados (PAINPSE), decorrente da exposição intermitente que provoca alterações estruturais no ouvido interno. O ruído é um risco que causa incomodo aos trabalhadores em decorrência de suas características, como nível sonoro e timbre. As plantas industriais de extração de minério e beneficiamento apresentam máquinas e equipamentos que durante sua operação produzem ruídos contínuos, além das explosões ocasionais que produzem ruídos de impacto (CASTRO; FREIRE, 2016). Segundo a Norma Regulamentadora N° 15 (NR 15), ruído de impacto é “aquele que apresenta picos de energia acústica de curta duração inferior a 1 (um) segundo, a intervalos superiores a 1 (um) segundo”; e ruído contínuo ou intermitente é todo ruído que não classificado como ruído de impacto.

A exposição prolongada a ruídos intermitentes, além de promover a perda lenta e gradual da audição, também pode ocasionar episódios de dores de cabeça, cansaço, aumento da pressão arterial, taquicardia, perigo de infarto e problemas no aparelho digestivo (JUNIOR, *et al.*, 2018). Configura-se suspeita de PAINPSE quando os “audiogramas, nas frequências de 3 kHz, 4 kHz e/ou 6 kHz, apresentem limiares auditivos acima de 25 (vinte e cinco) dB (A) e mais elevados do que nas outras frequências testadas, estando estas comprometidas ou não, tanto no teste da via aérea quanto da via óssea, em um ou em ambos os lados”, segundo a Norma Regulamentadora N° 07 (NR 07).

A perda auditiva por PAINPSE é irreversível e de caráter progressivo. Dessa maneira, é fundamental que a exposição ao risco seja controlada e se possível extinguida, a partir do uso de equipamento de proteção individual ou ação na fonte geradora do risco (CASTRO; FREIRE, 2016).

### **3.2. Medidas de controle e prevenção de riscos**

Observando os perigos e risco presentes em mineradoras, é imprescindível que as empresas adotem medidas de controle e prevenção de riscos. Segundo a Norma Regulamentadora N° 01 – Disposições Gerais (NR 01), as empresas devem identificar os perigos e possíveis lesões ou agravos a saúde e implementar medidas de prevenção com a seguinte prioridade:

- I. eliminação dos fatores de risco;
- II. minimização e controle dos fatores de risco, com a adoção de medidas de proteção coletiva (equipamentos de proteção coletiva – EPC);
- III. minimização e controle dos fatores de risco, com a adoção de medidas administrativas ou de organização do trabalho; e
- IV. adoção de medidas de proteção individual (equipamentos de proteção individual – EPI).

Cabe ressaltar que o desenvolvimento e implantação das medidas de prevenção de riscos está sujeita às limitações do empreendimento. A eliminação dos fatores de risco demanda ação de mão de obra especializada em processos e metodologias de estudo de riscos, o que pode acarretar à empresa um custo inacessível. Por outro lado, a

implementação de EPCs e EPIs, ou adoção de medidas administrativas, apresenta-se como uma solução mais baratas e de fácil adequação às rotinas de trabalho.

Observando os perigos e riscos, pode-se citar medidas gerais de prevenção, que se adequam a empreendimentos de diferentes portes:

- Perigos relacionados ao processo produtivo:
  - Quedas:
    - EPC: construção de muretas ou obstáculos que evitem queda nas bancadas;
    - EPI: uso de cinto de segurança ou talabarte em trabalho nos quais haja risco de queda;
  - Acidentes:
    - Eliminação da fonte de risco: automação de processos, substituição de produtos nocivos por produtos similares mais seguros, isolamento ou proteção de partes rodantes (polia, roletes e correias);
    - EPC: instalação de câmeras de segurança em locais estratégicos;
    - Medidas administrativas: programas de manutenção preventiva e preditiva em veículos e equipamentos;
    - EPI: uso de equipamentos que evitem esmagamento, acidentes com produtos químicos e cortes;
  - Incêndio:
    - EPC: sistema de combate ao incêndio;
    - Medidas administrativas: terceirização no manuseio e operação de explosivos para mão de obra especializada;
- Agentes Físicos:
  - Poeira de sílica:
    - Eliminação da fonte de risco: instalação de coletores de poeira nas máquinas perfuratrizes, enclausuramento das fontes emissoras ou implementação de processo umidificado;
    - EPI: uso de protetor respiratório;
  - Ruído:

- Eliminação da fonte de risco: automação de processos para evitar o contato com funcionário com a fonte, uso de máquinas com cabines fechadas, enclausuramento das fontes geradoras ou construção de cabines para operação do processo de beneficiamento;
  - EPI: uso de protetor auricular;
- Vibração:
  - Eliminação da fonte de risco: não utilização de martelos pneumáticos, mudanças ou adaptações nos veículos para diminuição da intensidade de vibração, e manutenção nas pistas;
  - Medidas administrativas: diminuição do tempo de exposição com turnos de trabalho;
- Agentes químicos:
  - Eliminação da fonte de risco: substituição por produtos similares mais seguros;
  - EPI: equipamentos para manuseio seguro dos produtos químicos;
- Agentes biológicos:
  - EPI: equipamentos para contato seguro com agentes biológicos;
- Condições ambientais adversas:
  - Calor:
    - Medidas administrativas: períodos de descanso em ambientes com temperaturas amenas, turnos de trabalho;
    - EPI: uso de roupas adequadas, uso de guarda-sol ou guarda-chuva;
- Riscos ergonômicos:
  - Medidas administrativas: elaboração de procedimentos evitando má postura em longas jornadas de trabalho, pausas na jornada para alongamentos, movimentação de pés e pernas e mudança de posição (IRAMINA, et al., 2009).

### 3.3. Equipamentos de proteção individual - EPI

Como averiguou-se nas medidas de controle e prevenção de risco, os equipamentos de proteção individual são de grande importância na rotina dos trabalhadores. Dessa forma, cabe ressaltar qual tipo de EPI é o correto para cada situação e como o uso dos mesmos minimiza a exposição aos riscos ocupacionais.

Muitos equipamentos são entregues aos trabalhadores para a proteção dos mesmos durante o turno de trabalho, mas nem todos os equipamentos são considerados EPI. Segundo a Norma Regulamentadora N° 06 (NR 06), para um equipamento de proteção individual ser caracterizado como tal, é necessário ter um Certificado de Aprovação (CA). O CA é um documento emitido pelo órgão nacional que autoriza a empresa fabricante do equipamento a realizar a comercialização e utilização do EPI em território nacional. O certificado apresenta prazo de validade, e caso o EPI esteja com CA vencido não deverá ser utilizado.

No setor de mineração, muitos EPIs são utilizados para diferentes objetivos de proteção do trabalhador. A escolha do EPI para o risco presente deve ser baseada no Anexo I da NR 06, que apresenta uma lista de equipamentos de proteção individual que são reconhecidos como atenuantes de fatores de risco e são elencados de acordo com a proteção que oferecem. Além disso, a norma cita que a escolha do EPI deve estar em conformidade com a função exercida pelo trabalhador e os riscos aos quais está exposto.

Para a proteção respiratória, são elencados na NR 06 cinco tipos de proteção: a) respirador purificador de ar não motorizado; b) respirador purificador de ar motorizado; c) respirador de adução de ar tipo linha de ar comprimido; d) respirador de adução de ar tipo máscara autônoma; e e) respirador de fuga. No setor da mineração é predominante o uso de respiradores purificadores de ar não motorizados; classe composta por máscaras PFF2 (Figura 24 a), que detém proteção contra poeiras, névoas e fumos; e máscaras semifaciais filtrantes (Figura 24 b) que possuem filtros para proteção contra poeira, névoas e fumos ou filtros para proteção contra gases e vapores.

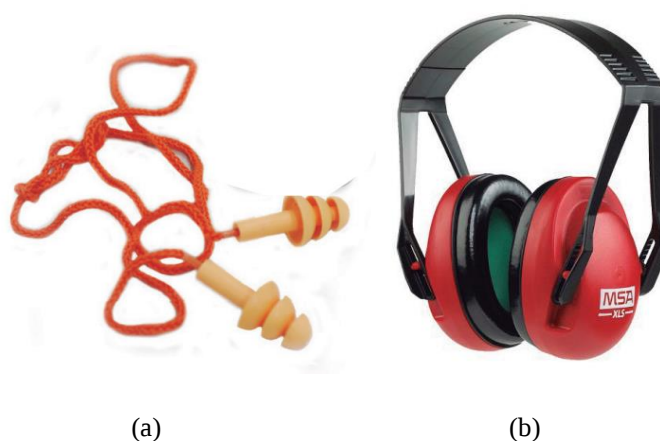
**Figura 24:** a) Máscara PFF2, b) Máscara semifacial filtrante.



**Fonte:** Neobetel, 2024.

Já para a proteção auricular são citados três tipos de protetor auditivo: circum-auricular, de inserção e semiauricular. Na mineração é comum o uso do protetor auditivo tipo plug (Figura 25 a) para os ambientes nos quais o ruído intermitente não apresente intensidades muito elevadas ou o tempo de exposição seja menor. Conforme a intensidade de decibéis do ruído aumenta, se faz necessário o uso do protetor auditivo tipo concha (Figura 25 b), que promove proteção contra exposições mais graves (Dimensional, 2022).

**Figura 25:** a) Protetor auditivo tipo plug, b) Protetor auditivo tipo concha.



**Fonte:** Dimensional, 2022.

No setor de mineração e beneficiamento também é necessário fornecer EPIs para o deslocamento seguro e correto dos trabalhadores nas dependências da empresa. A NR 06 apresenta diversas classificações de calçados, mas em resumo eles devem: promover proteção contra agentes abrasivos, escoriantes, térmicos, cortantes e perfurantes, além

de proteção contra choques elétricos, contra umidade proveniente de atividades com utilização de água e proteção contra agentes químicos. Pode-se citar botinas com ou sem biqueira (Figura 26 a), que pode ser de borracha, couro ou aço, e a escolha irá depender do trabalho a ser realizado. Também são utilizadas as botas de borracha (Figura 26 b), conhecidas comumente como galochas, comuns nas atividades que pressupõem contato com água, como limpeza de ambiente, ou usadas em dias chuvosos.

**Figura 26:** a) Botina de couro com biqueira de plástico, b) Bota de PVC.



**Fonte:** Neobetel, 2024.

A proteção dos membros superiores e inferiores pode ser realizada como uniformes ou com EPIs específicos, de acordo com a norma. As vestimentas (camisas, blusas, calças, etc.) devem promover proteção contra agentes abrasivos, escoriantes, cortantes e perfurantes, contra agentes químicos, contra agentes térmicos e contra umidade proveniente de operações com utilização de água e de precipitação pluviométrica. Ademais, a Norma Regulamentadora N° 10 apresenta especificações para vestimentas com proteção contra choques elétricos (Figura 27), que devem ser utilizadas em atividades com contato com rede elétrica energizada. Como a mineração e beneficiamento apresenta funções que exercem atividades pesadas e de esforço intenso, é necessário que o material de confecção das vestimentas seja resistente e adequado a trabalho em condições ambientais extremas, como calor excessivo.

**Figura 27:** Vestimenta com proteção contra choques elétricos



**Fonte:** Neobetel, 2024.

Dentre os EPIs específicos pode-se citar as luvas, cremes, braçadeiras e mangas. O tipo de luva a ser utilizado é escolhido de acordo com a atividade que o funcionário irá desempenhar. Para a proteção contra materiais abrasivos, como calor, respingos incandescentes no trabalho com solda, trabalhos pesados ou radiação ultravioleta, recomenda-se as luvas de raspa de couro (Figura 28 a). Já para a proteção contra ácidos, cetonas e detergentes, recomenda-se a luva de Neoprene (Figura 28 b); enquanto as luvas nitrílicas (Figura 28 c) são indicadas para o manuseio de solventes alifáticos, resinas epóxi e álcool isopropílico. Por outro lado, caso a atividade tenha contato com produtos corrosivos como hidróxido de amônio, hidróxido de potássio ou hidróxido de sódio, deve-se usar as luvas de polivinila (PVC) (Figura 28 d). Também existem as luvas específicas para trabalho em contato com alta tensão, que são usadas por eletricitistas. São confeccionadas em material de borracha com textura e apresentam espessura adequada para a proteção contra choques elétricos (Figura 28 e) (MIRANDA, 2011).

**Figura 28:** a) Luva de raspa, b) Luva de Neoprene, c) Luva nitrílica, d) Luva de polivinila (PVC), e) Luva para proteção contra choques elétricos.



**Fonte:** MIRANDA, 2011.

De acordo com a NR 06, os cremes (Figura 29) promovem a proteção contra agentes químicos. Na indústria de mineração e britagem são usados na manutenção de máquinas e equipamentos. As braçadeiras conferem proteção contra agentes cortantes e escoriantes. Já as mangas (Figura 30), que são uma extensão das luvas, promovem proteções variadas, como contra chiques elétricos, agentes abrasivos e escoriantes, e agentes químicos. O tipo de manga deve ser escolhido de acordo com o tipo de luva que será usado e a atividade a ser desenvolvida.

**Figura 29:** Creme protetor para atividades com contato com graxa, óleo, solvente, querosene, gasolina, tinta à óleo, cola, cola instantânea, cera, verniz, cal, cimento seco, negro de fumo, pó e terra.



**Fonte:** Neobetel, 2024.

**Figura 30:** Mangote de segurança confeccionado em grafatex de algodão e poliéster.



**Fonte:** Neobetel, 2024.

Ainda na NR 06 é citado o trabalho com risco de queda com diferença de nível, no qual é necessário utilizar cinturão de segurança com dispositivo trava-queda (Figura 31 a) para proteção do trabalhador contra quedas em operações com movimentação

vertical ou horizontal. Já o cinturão com talabarte (Figura 31 b) é usado para risco de queda em trabalhos em altura ou no posicionamento em trabalhos em altura.

**Figura 31:** a) Cinturão de segurança, b) Talabarte.



**Fonte:** Neobetel, 2024.

#### **4. Objetivo**

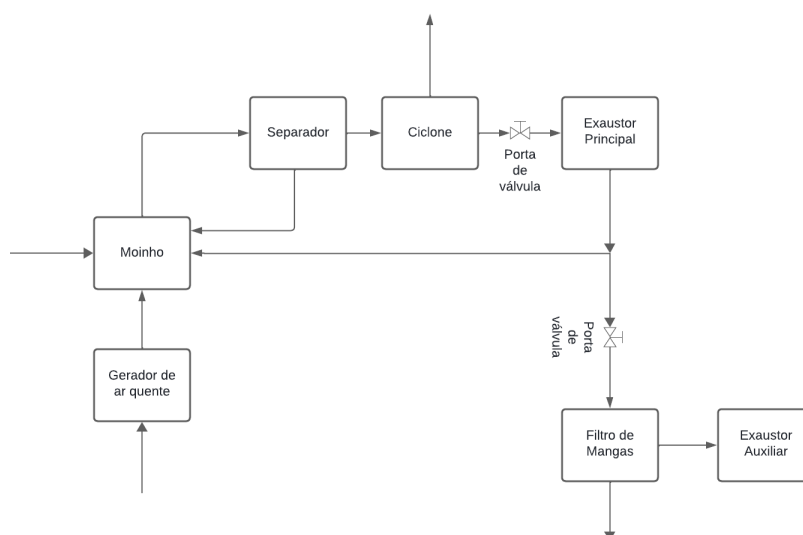
Este trabalho tem por objetivo estudar uma planta de beneficiamento de calcário, situada na região metropolitana de São Paulo, a fim de analisar a emissão de partículas na atmosfera e propor alternativas para a eliminação de agentes de risco à saúde do trabalhador.

## 5. Estudo de Caso

O processo de obtenção de calcário dolomítico analisado é composto por uma planta de britagem e uma de moagem, logo após a extração mineral. O estudo apresentado neste trabalho foi focado na planta de moagem, a qual apresenta os maiores níveis de riscos ocupacionais e por produzir o produto mais nocivo à saúde do colaborador na planta.

A planta de moagem é composta por um moinho pendular, um separador, ciclone, exaustor principal e auxiliar, filtro de mangas e um gerador de gás quente. A Figura 32 apresenta o fluxograma do processo.

**Figura 32:** Fluxograma de blocos do processo de moagem de calcário.



**Fonte:** Elaborado pela autora.

A alimentação ocorre no moinho, através de um alimentador obturador, que controla o fluxo de matéria-prima que será destinada ao moinho e realiza a lavagem do material. O moinho pendular é responsável pela fragmentação da matéria-prima, que entra no processo com partículas de 10 mm de diâmetro e é fragmentada até 0,3 mm. Para que ocorra a movimentação de partículas dentro do moinho e arraste de pó para as demais etapas do processo, há a presença de um gerador de gás quente. O gerador é responsável por adicionar ao processo uma corrente de gás quente que irá fazer o controle de umidade do produto e proporcionar uma corrente de fluido no sistema.

Após fragmentado, o produto segue para o separador que irá direcionar as partículas que já estão na granulometria correta para a próxima etapa do processo,

enquanto aquelas que ainda não atingiram a granulometria correta retornam ao moinho. A corrente que sai do separador é composta por sólido fragmentado e uma corrente de ar responsável pelo arraste das partículas no processo. Ao chegar no ciclone, o produto é separado da corrente de fluido e segue para o armazenamento. Já a corrente de ar segue no processo, passando por um exaustor que tem a finalidade de manter o fluxo de ar no sistema. Parte da corrente de ar é direcionada ao filtro de mangas, responsável por filtrar pequenas partículas ainda presentes na corrente, e devolver ar limpo para a atmosfera. O exaustor auxiliar tem função de auxiliar na manutenção da corrente de fluido no sistema.

Ao final do processo de moagem, o produto tem como local de armazenamento o pátio ao lado da planta (Figura 33). Esse tipo de armazenamento dificulta o carregamento de caminhões posteriormente e possibilita a perda de produto decorrente de condições atmosféricas, como chuva e vento. Em dias chuvosos, é notável a perda de produto pela formação de lama decorrente do acúmulo de água ao redor da pilha de produto, em dias com presença vento, é possível observar a porção mais fina do produto ser carregada pelas correntes de ar (Figura 34), provocando perda do produto final e expondo funcionários de outros setores à sílica.

**Figura 33:** Imagem do armazenamento da produção de calcário.



**Fonte:** Registro pela autora.

**Figura 34:** Imagem da dispersão de partículas por ação do vento no momento de descarregamento da planta.



**Fonte:** Registro pela autora.

Em relação a exposição às partículas de sílica cristalina livre, os setores de britagem e moagem são aqueles com maior concentração do composto no ar. Os setores de britagem e de moagem apresentam a concentração de sílica cristalina em  $0,043 \text{ mg/m}^3$ . De acordo com a NR 15 – Atividades e Operações Insalubres, o limite de tolerância para poeiras minerais de sílica se dá pela Equação 06, na qual  $LT$  é o limite de tolerância e a %quartzo é a porcentagem de sílica livre em relação a poeira respirável da amostra analisada.

$$LT = \frac{8}{\% \text{quartzo} + 2} \text{ mg/m}^3 \quad (06)$$

$$\% \text{quartzo} = \frac{\text{Concentração de sílica} \times 100}{\text{Concentração de poeira respirável}} \quad (07)$$

No laudo de análise de ar dos setores, obteve-se  $15,746 \text{ mg/m}^3$  de concentração de poeira respirável e  $0,0426 \text{ mg/m}^3$  de sílica. Isso significa que 0,2705% da poeira respirável é formada por sílica livre cristalina. Assim, o limite de tolerância será:

$$LT = \frac{8}{0,2705+2} = 3,52 \text{ mg/m}^3 \quad (08)$$

Entretando, a American Conference of Governamental Industrial Hygienists (ACGIH), organização que tem por objetivo fornecer orientações e informações a respeito de higiene industrial e saúde ocupacional; estabelece que o limite de tolerância para a sílica livre cristalina é 0,025 mg/m<sup>3</sup>. Visando o objetivo da proposta do estudo, será utilizado o parâmetro fornecido pela ACGHI como limite de tolerância.

Dessa forma, este trabalho tem como proposta o dimensionamento de equipamentos industriais para sanar os problemas elencados acima. Para efetuar a concentração do produto, propõe-se a implantação de um silo ao final da linha de produção realizando o armazenamento correto de calcário.

## **6. Métodos utilizados**

### **6.1. Cálculo aproximado da perda de produto**

O cálculo de perda de produto decorrente da dispersão de partículas pelo vento mostra-se complexo ao ser necessário analisar o perfil de escoamento do vento, a variação da velocidade do vento no decorrer do dia, as forças atuantes nas partículas de produto, e a variação da altura da pilha decorrente da movimentação de produto pelos funcionários da empresa.

Dessa forma, a perda de calcário dolomítico será comparada a perda de outros processos desenvolvidos na empresa que possuem perda de produção mensurada. Em uma outra planta de beneficiamento, voltada a produção de agregados para a indústria da construção civil, o controle de perdas mostra-se eficiente, pela produção de produtos com maior granulometria e consequente redução de dispersão de partículas por ação do vento. O produto de menor granulometria produzido nessa planta é a areia, que possui diâmetro entre 0,5mm e 4,8mm; e o processo como um todo apresenta 3% de perda de material.

Na planta do calcário dolomítico também há produção de outros materiais, sendo que a parcela de menor granulometria segue para a moagem. Sabe-se que a perda de produção do processo de britagem e moagem do calcário é maior que a planta de beneficiamento de agregados, pois a ação do vento é mais significativa por conta do menor diâmetro do produto ( $297\ \mu\text{m}$ ) e as instalações não são projetadas para minimizar a perda na linha de produção. Entretanto, não há levantamento de dados suficiente para que essa perda seja calculada, dificultando que uma porcentagem exata seja definida.

Dessa maneira, para o cálculo da perda de produção do calcário será utilizada a perda definida para a planta de beneficiamento de agregados, ou seja, 3% da produção total é perdida.

### **6.2. Dimensionamento do silo de armazenamento**

#### **6.2.1. Propriedades do produto**

Para obter os ângulos referentes ao material estudado, foram utilizados ensaios de cisalhamento realizados por A. Serkan Cagli et al. (2007). Em seus estudos foram avaliados nove materiais diferentes, um dos quais apresentava propriedades muito

semelhantes ao calcário dolomítico estudado, denominado *Dolomite*. A Tabela 3 apresenta a comparação entre as propriedades dos dois materiais.

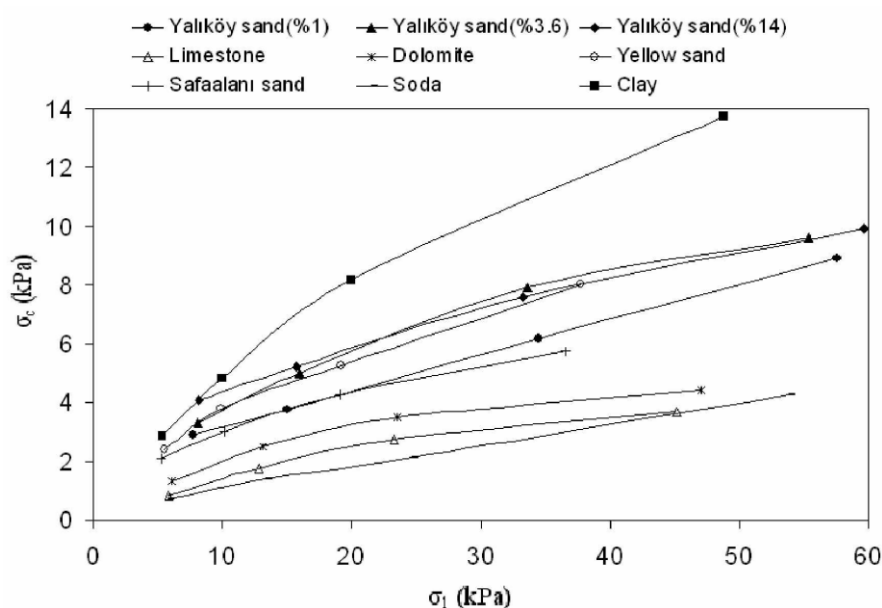
**Tabela 3:** Comparação de propriedades do material estudado com dados da literatura.

| Material                    | Granulometria | % <i>CaO</i> | % <i>MgO</i> |
|-----------------------------|---------------|--------------|--------------|
| Calcário Dolomítico         | 297 $\mu m$   | 33,53        | 17,01        |
| <i>Dolomite</i> (A. Serkan) | 335 $\mu m^*$ | 31,96*       | 20,50*       |

**Fonte:** Dados fornecidos pela empresa; \* A. Serkan Cagli et al. (2007).

Cada ensaio desenvolvido por A. Serkan (2007) foi realizado com iguais tensões de pré-cisalhamento e tensão de cisalhamento inicial ( $\sigma$ ) diferentes, resultando em diferentes valores de tensão na célula ( $\tau$ ). Com essa relação foi possível obter o Diagrama de Mohr e locais geométricos de deslizamento para cada ensaio. Em cada ensaio obteve-se valores de tensão não confinada  $\sigma_c$  e valores de maior tensão de cisalhamento  $\sigma_1$  correspondente, possibilitando que a Função Fluxo (*FF*) fosse obtida. A Figura 35 apresenta os resultados obtidos para cada um dos nove produtos diferentes.

**Figura 35:** Curvas de Função Fluxo obtidas por A. Serkan Cagli.



**Fonte:** A. Serkan Cagli et al. (2007).

Nos ensaios realizados por A. Serkan (2007) não foram especificados os valores das tensões normais e das tensões de cisalhamento obtidas, impossibilitando que os diferentes diagramas de Mohr fossem aqui representados. Dessa forma, para obter-se as demais propriedades do produto, como ângulo de atrito interno efetivo e ângulo de

atrito com a parede, recorreu-se a normas internacionais a respeito da dimensão de silos e características de materiais.

Dentre as normas internacionais estudadas, como ISO 11697, AS 3774, EN 1991-4, DIN-1987; a norma australiana AS 3774 de 1996 foi aquela que apresentou os parâmetros necessários, assim como instruções para o dimensionamento do silo. Assim, a Tabela 4 apresenta os valores de propriedades para o calcário dolomítico obtidos pela norma.

**Tabela 4:** Valores de propriedades do material estudado.

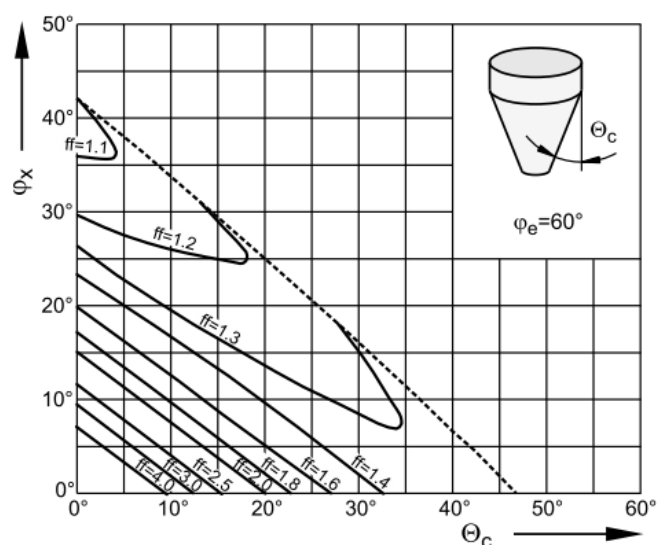
| Propriedade                               | Valor (AS 3774)        |
|-------------------------------------------|------------------------|
| Massa específica do produto $\gamma$      | 11,0 kN/m <sup>3</sup> |
| Ângulo de atrito interno efetivo $\phi_e$ | 60°                    |
| Ângulo de atrito com a parede $\phi_w$    | 15°                    |
| Ângulo de repouso $\phi_r$                | 30°                    |

**Fonte:** AS 3774.

### 6.2.2. Dimensionamento da tremonha e do silo

Com os dados apresentados na Tabela 4, foi possível determinar o fator de fluxo  $ff$  a partir do diagrama da Figura 36. Na imagem,  $\Theta_c$  é o ângulo de inclinação da tremonha em relação à vertical, como segue na representação no canto direito superior do diagrama, e  $\phi_x$  é o ângulo de atrito com a parede (SCHULZE, 2021).

**Figura 36:** Fator de fluxo para materiais com ângulo de atrito interno efetivo igual a 60°.

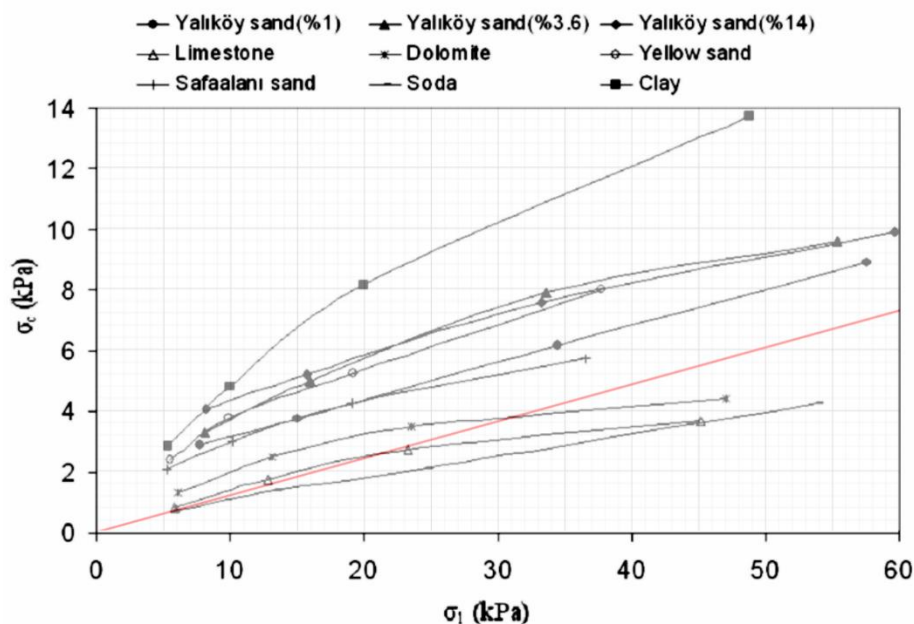


**Fonte:** SCHULZE, 2021.

O ângulo de inclinação da tremonha será o maior ângulo no qual ocorre o fluxo de massa, ou seja, o ponto no qual a linha pontilhada cruza com a horizontal referente ao ângulo de atrito com a parede igual a  $15^\circ$ . Assim, tem-se que o maior ângulo de inclinação da tremonha pode ser  $31^\circ$ . Reduzindo o valor ao considerar a margem de segurança, o ângulo de inclinação da tremonha será de  $28^\circ$ . Dessa forma, tem-se que o fator de fluxo é 1,3. Para obter o fator de fluxo da tremonha, retomou-se os estudos de A. Serkan Cagli et al. (2007), no qual foi obtido o valor de 8,2 para esse fluxo.

O próximo passo foi determinar o diâmetro da abertura de descarga da tremonha  $b$ . Para isso determinou-se o valor da função  $H(\theta)$ , utilizando a Figura 22, e a tensão crítica a partir da função fluxo e o fator de fluxo da tremonha obtido por A. Serkan (2007). Com o valor do fator de fluxo da tremonha, foi possível traçar a reta segundo a Figura 23, para obter a tensão crítica. A Figura 37 representa o ponto de intersecção obtido.

**Figura 37:** Curvas de Funções Fluxo e a reta de inclinação  $\arctan(1/ff_c)$

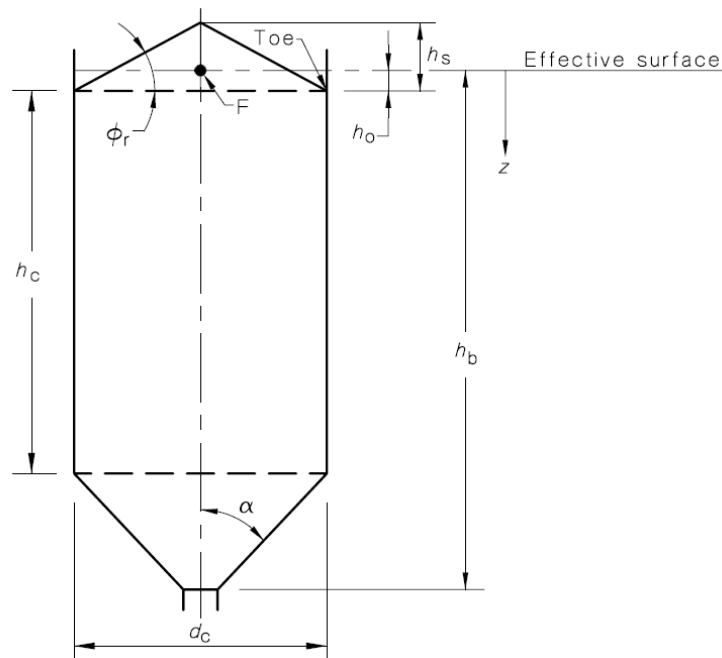


**Fonte:** Adaptado de A. Serkan (2007).

Para o dimensionamento do silo, foi considerado uma proporção entre a altura total do silo, considerando a parte cilíndrica e a tremonha, e o diâmetro do silo. Considerando que o volume de material a ser armazenado é elevado, optou-se por usar a relação  $h_c/d_c \geq 3,0$  apresentada pela norma AS 3774 como um silo esbelto. A Figura 38 demonstra os parâmetros para cada dimensão do silo, segundo a norma internacional,

em que  $\phi_r$  representa o ângulo de repouso do material e  $\alpha$  o ângulo de inclinação da tremonha com o eixo vertical.

**Figura 38:** Relação de parâmetro do silo definida pela Norma AS 3774



**Fonte:** AS 3774.

Nos cálculos considerou-se  $h_b/d_c = 3,0$ , e o volume total do silo equivalente a 25% da produção diária de calcário dolomítico, para que o silo não se apresenta dimensões muito grandes e que haja possibilidade de carregamento de quatro caminhões simultaneamente.

### 6.3. Especificação do material utilizado para construção do silo

A estrutura do silo deverá ser capaz de suportar as pressões exercidas nas paredes e no fundo do silo pelo produto armazenado. Existem diversas teorias, com a Teoria de Jenike e a Teoria de Janssen, a respeito do cálculo das pressões envolvidas considerando os diferentes tipos de fluxo e geometrias dos silos. Essas teorias também consideram pressões de carregamento/descarregamento e a cargas de vento atuantes no equipamento.

Para aplicação dos cálculos de pressões é necessário analisar todos os possíveis cenários que o produto assume dentro do silo, juntamente com as características do material determinado para a construção do silo.

Na análise proposta esses valores não serão calculados e será usado como base de dados o estudo realizado por Scalabrin (2008), no qual são apresentados os materiais adequados para silos de acordo com a altura dos mesmos e pressões de compressão.

## 7. Resultados

### 7.1. Dispersão de partículas – perda de produto

A planta de calcário dolomítico estudada apresenta produção mensal de 110 mil toneladas de produto. Considerando uma perda de 3% e que uma tonelada de calcário é vendida a R\$150,00; pode-se concluir que a perda mensal de faturamento é de R\$ 495.000,00 reais e a perda anual de 5,94 milhões de reais.

### 7.2. Dimensionamentos e material escolhido

Com os dados anteriormente apresentados, nos tópicos 5.2.1 e 5.2.2, e com as equações abaixo, obteve-se o diâmetro de abertura da tremonha:

$$\theta = 28^\circ, \text{tremonha cônica}$$

$$H(\theta) = 2,45$$

$$\alpha = \arctan\left(\frac{1}{ff_c}\right) = \arctan(0,769) = 37,57^\circ$$

$$\sigma_{cri} = 3,6 \text{ kPa}$$

$$b = \frac{H(\theta) \sigma_{cri}}{\gamma} = \frac{2,45 \times 3,6 \text{ kPa}}{11,0}$$

$$b = 0,802 \text{ m} = 80,2 \text{ cm}$$

O volume do silo será equivalente a 25% da produção diária. Considerando a produção mensal de 110 mil toneladas e um mês com 30 dias, tem-se que:

$$P_1 = \frac{P_{30}}{30} = \frac{110.000}{30} = 3.666,67 \text{ ton}$$

Para facilitação dos cálculos, a produção diária será arredondada para 3.700 toneladas. Assim, 25% da produção diária equivale a 925 toneladas. Com a relação entre  $h_b/d_c = 3,0$ , a partir de relações trigonométricas, todas as variáveis apresentadas na Figura 38 foram determinadas a partir da relação delas com o diâmetro do silo. As Equações 09 a 11 explicitam as alturas  $h_b$ ,  $h_c$ ,  $h_s$  e  $h_0$  em função do diâmetro  $d_c$ .

$$\phi_r = 30^\circ$$

$$\alpha = 28^\circ$$

$$h_b = 3 \times d_c \quad (09)$$

$$h_s = \frac{\tan 30^\circ \times d_c}{2} \quad (10)$$

$$h_0 = \frac{h_s}{3} = \frac{\tan 30^\circ \times d_c}{6} \quad (11)$$

Dividiu-se em 3 volumes: a tremonha cônica ( $V_1$ ), o corpo cilíndrico do silo ( $V_2$ ) e o tronco de cone superior ( $V_3$ ). As Equações 12 a 18 explicitam o cálculo dos volumes, nas quais  $h_{t1}$  é a altura do cone completo da tremonha e  $a$  é o raio superior do tronco de cone acima do corpo cilíndrico.

$$V_1 = \frac{1}{3} \pi h_{t1} \left[ \left( \frac{d_c}{2} \right)^2 + b^2 + \frac{d_c}{2} b \right] \quad (12)$$

$$V_2 = \pi \left( \frac{d_c}{2} \right)^2 h_c \quad (13)$$

$$V_3 = \frac{1}{3} \pi h_0 \left[ \left( \frac{d_c}{2} \right)^2 + a^2 + \frac{d_c}{2} a \right] \quad (14)$$

$$h_{t1} = \frac{d_c - 1,5 \tan 28^\circ}{2 \tan 28^\circ} \quad (15)$$

$$a = \frac{h_s - h_0}{\tan 30^\circ} \quad (16)$$

$$h_c = 3d_c - h_0 - h_1 \quad (17)$$

$$V_T = V_1 + V_2 + V_3 \quad (18)$$

$$V_T = \frac{925000 \text{ kg}}{1795,1 \text{ kg/m}^3} = 515,3 \text{ m}^3$$

Utilizando a ferramenta Solver do Microsoft Excel na equação 18, foi possível determinar o valor do diâmetro  $d_c$  fixando o volume total em 515,3 m<sup>3</sup>. Assim, obteve-se um silo com 6,48 m de diâmetro, altura total de 19,44 m e corpo cilíndrico com altura de 13,68 m.

$$d_c = 6,48 \text{ m}$$

$$h_c = 13,06 \text{ m}$$

$$h_b = 19,44 \text{ m}$$

$$h_0 = 0,62 \text{ m}$$

Segundo SCALABRIN, L. A., 2008; para silos com corpo cilíndrico com altura de até 13,29 m, é necessário utilizar o aço ZAR 345 com espessura de 3,0 mm.

### 7.3. Readequação da planta industrial e custo envolvidos

Com o dimensionamento realizado, serão necessários 4 silos para o armazenamento da produção diária. A proposta conta com silos de expedição, nos quais são necessários 4,5 metros de altura livre entre o chão e o bocal de descarga, para que seja possível realizar o carregamento de caminhões. Os silos seriam dispostos lado a lado, com distância adequada pra manutenção e deslocamento de pessoas, e também contariam com um sistema de balança para o controle de carregamento de produto.

Os custos envolvidos na elaboração do projeto estão relacionados a diversos fatores, dentre eles o custo com material. Para estimar a quantidade de material necessário para o silo é preciso calcular a área do equipamento. As Equações 19 a 25 representam o cálculo das áreas nas quais  $A_{M_{cilin}}$  é a área de material necessário para construir o corpo cilíndrico,  $A_{M_{trem}}$ , a área de material para a tremonha,  $A_{M_{cone}}$  a área de material para o cone superior do silo (tampa superior do equipamento),  $g_{trem}$  a geratriz do cone completo representativo da tremonha,  $g_b$  a geratriz do cone abaixo da tremonha e  $g_{cone}$  a geratriz do cone superior do silo.

$$A_{M_{cilin}} = 2\pi \left(\frac{d_c}{2}\right) h_c = 266,01 \text{ m}^2 \quad (19)$$

$$A_{M_{trem}} = \pi \left(\frac{d_c}{2}\right) g_{trem} - \pi \left(\frac{b}{2}\right) g_b \quad (20)$$

$$g_{trem} = \left(\frac{d_c}{2}\right) \left(\frac{1}{\cos 62^\circ}\right) \quad (21)$$

$$g_b = \left(\frac{b}{2}\right) \left(\frac{1}{\cos 62^\circ}\right) \quad (22)$$

$$A_{M_{trem}} = 69,19 \text{ m}^2$$

$$A_{M_{cone}} = \pi \left(\frac{d_c}{2}\right) g_{cone} \quad (23)$$

$$g_{cone} = \left(\frac{d_c}{2}\right) \left(\frac{1}{\cos 30^\circ}\right) \quad (24)$$

$$A_{M_{cone}} = 38,09 \text{ m}^2$$

$$A_{M_T} = A_{M_{cilin}} + A_{M_{trem}} + A_{M_{cone}} \quad (25)$$

$$\therefore A_{M_T} = 373,30 \text{ m}^2$$

Segundo Sartori & Bressan (2022), o aço ZAR 345 de 3 mm apresenta valor de R\$9,27. Considerando uma densidade média de 7860 kg/m<sup>3</sup>, tem-se que o metro quadrado do material, com espessura de 3 mm, custa R\$ 218,58. Considerando 373,30 m<sup>2</sup>, o material referente a cada silo ficará R\$81.598,40.

Para a empresa estudada, um investimento com retorno em 12 meses seria ideal para o cenário atual no qual a organização se encontra. Tendo em vista que a instalação das quatro unidades armazenadoras proporcionariam um retorno financeiro de R\$ 5.940.000,00 por ano; propõe-se que o investimento para essa solução seja de 5,94 milhões. Assim, cada unidade armazenadora poderia ser avaliada em até 1,5 milhões de reais, aproximadamente, que confere à empresa uma margem considerável para a busca de diferentes fornecedores e projetos. Cabe ressaltar que unidades armazenadoras não são equipamento de custo muito elevado, principalmente ao considerar as dimensões obtidas nos cálculos realizados. Dessa forma, com o investimento em unidades armazenadora, a empresa poderia garantir um lucro anual de no mínimo 6 milhões de reais, que atualmente corresponde a 4% do faturamento anual.

## 8. Discussão

Para a discussão dos resultados obtidos, é necessário avaliar as aproximações que foram consideradas ao longo do projeto.

Na planta de produção de calcário observa-se diversos pontos de perda de produto. Desde a pilha pulmão formada para alimentar a planta, até o uso incorreto dos equipamentos. Ao percorrer a planta é visível que há perda significativa no ponto de descarga do ciclone. O material sólido que é separado no ciclone é despejado diretamente em uma correia transportadora, e parte desse material fica disperso tanto nos roletes da correia quanto no chão em volta do equipamento. Ademais, é possível identificar diversos pontos de acúmulo de produto ao longo da linha de produção, principalmente ao lado de britadores e moinhos. Outra fonte de perda é a formação de lama a partir da umidificação de produto exposto a condições atmosféricas. Em dias chuvosos, há formação de bolsões de lama em torno do galpão que contém os equipamentos. Além disso, durante o carregamento de caminhões por pá carregadeiras, também é possível identificar dispersão de partículas finas na atmosfera.

Para mensurar a perda de produto ao longo de todo o processo e das etapas de carregamento, é necessário um controle de vazão de entrada de matéria-prima por batelada e quanto dessa batelada está sendo carregada nos caminhões. Atualmente, o processo não apresenta esse tipo de controle, pois os caminhões vindos da lavra descarregam diretamente na planta e as cargas não são padronizadas; além disso há acúmulo de produção de diversas bateladas em uma única pilha pulmão. Medidas de engenharia que poderiam ser tomadas, além de unidades de armazenamento de produto, consistem em: espaço apropriado para armazenamento de matéria-prima e consequente controle adequado da vazão que entra na planta; inclusão de tubulações para transporte pneumático dos sólidos, fazendo com que não existisse a possibilidade de perda de produção por despejo de produto no chão; e sistemas de exaustão, para captura de partículas finas que porventura saíssem do processo.

A readequação do projeto da planta com uso de informações obtidas por testes no produto também é um fator que precisa ser considerado na aplicação prática. As limitações da proposta elaborada consistem principalmente em dados obtidos pela literatura e normas internacionais de dimensionamento. Ao realizar os testes com o produto específico e em concordância com o material utilizado para a construção do

silo, os resultados poderão divergir dos anteriormente expostos, alterando dimensões do silo calculado.

Outro ponto importante a se considerar é que o valor obtido para cada silo não considera as etapas de processamento do material e construção do equipamento, custos com estruturas de apoio, análise do solo e topografia no qual o silo será construído, custos de transporte e instalação, custos correspondentes a controles elétricos de enchimento e esvaziamento do silo, e custo de mão de obra envolvidos no processo. Os valores desse serviço irão depender da empresa responsável pela produção do equipamento e fornecimento de serviços de instalações. Dessa forma, torna-se inviável estimar o valor de cada silo partindo apenas dos custos atrelados ao material utilizado.

Quanto aos riscos ocupacionais decorrentes da dispersão de calcário na atmosfera, o armazenamento correto do produto acarretaria a diminuição da exposição ocupacional à fatores de risco. Nesse cenário, com exposições abaixo do nível de tolerância, não haveria necessidade do uso de EPIs e a empresa não precisaria pagar adicionais de insalubridade.

A situação atual da empresa conta com exposições a riscos ocupacionais desnecessárias e perda de faturamento considerável, fatores que justificam investimentos para melhoria de uma planta industrial que está em operação a 30 anos. Essas melhorias, além de retorno financeiro, também iriam melhorar a qualidade de vida dos funcionários que estão na produção, minimizando a ocorrência de doenças ocupacionais pela inalação de calcário dolomítico; e diminuir os impactos ambientais decorrentes da dispersão de calcário.

## 9. Conclusão

O objetivo deste trabalho consistia em analisar a emissão de particulado na atmosfera e propor medidas para eliminar esse agente de risco.

A principal fonte de dispersão é a ação do vento, que atua tanto no momento de descarga do produto no solo, como nas pilhas pulmões formadas e durante o carregamento de caminhões. Essa dispersão faz com que diversos setores recebam a poeira, aumentando o índice de particulado no ar e consequentemente tornando-o insalubre. Com o armazenamento em unidades confinadas, o fator de dispersão por ação do vento seria eliminado. Dessa forma, foi escolhido o dimensionamento de silos, como unidades armazenadoras de produto acabado, para conter as dispersões decorrentes de ação do vento.

Utilizando a metodologia da Célula de Cisalhamento de Jenike e normas internacionais de dimensionamento de silos (AS 3774), foi possível obter as dimensões de um silo que comportasse 25% da produção diária de calcário dolomítico, equivalente a 925 toneladas, com diâmetro de 6,48 metros e altura total de 19,44 metros. Dessa maneira, seriam necessários quatro silos para que toda a produção do dia fosse devidamente armazenada. Com as dimensões determinadas e o material de construção escolhido, foi possível determinar o custo envolvido com material para a produção de cada silo.

Como projetos de unidades armazenadoras dependem de diversos fatores como custo de mão de obra, transporte, instalação e custos na transformação do material em equipamento, considerou-se que o valor de investimento para o projeto seria aquele com retorno em um ano. Assim, com uma perda de produção estimada em 3%, produção mensal de 110 mil toneladas e o valor da tonelada de calcário a R\$ 150,00; tem-se que esse investimento poderia ser de até 5,94 milhões de reais, valor equivalente a perda anual de produção da planta. Esse valor apresentou-se adequado ao projeto, tendo em vista que cada unidade armazenadora pode custar até 1,5 milhões de reais, aproximadamente, e que silos não são equipamentos com custos tão elevados, fazendo com que seja possível elaborar o projeto dentro do investimento proposto.

Com isso, conclui-se que a proposta elaborada é viável para a empresa e que com a aplicação de unidades armazenadoras haveria diversos retornos. Pode-se citar o retorno financeiro com a mitigação da perda de produto, que corresponde a 4% do

faturamento anual; como também a melhora nas condições de trabalho dos colaboradores e reputação da empresa por proporcionar condições salubres de trabalho.

Cabe ressaltar que também existem outras fontes de perda de produto, como na linha de produção no momento que o calcário sai do silo e é direcionado a transportadores de correia, e na formação de lamas com ação das chuvas sob as pilhas pulmão. Assim, tem-se conhecimento de que a perda de produção é maior do que aquela que foi considerada para os cálculos, o que resulta em uma margem maior de investimento com retorno em 12 meses, ou um investimento com retorno em menor tempo. A possibilidade de maior investimento também abre leque para que outros projetos de melhoria possam ser elaborados na linha de produção, como inclusão de transporte pneumático de sólidos e desenvolvimento de exaustores para recuperação de material.

## 10. Referências

A importância da mineração no Brasil. Verum Partners, 2020. Disponível em: <<https://verumpartners.com.br/a-importancia-da-mineracao-no-brasil/>>. Acesso em: 15 de jan. de 2024.

ALVES, L. P. Simulação dinâmica de processos em projetos de usinas de beneficiamento de minérios. 2012. Tese (Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Minerais, ênfase em Processamento Mineral) – Departamento de Engenharia de Minas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2012.

AS 3774. Loads on bulk containers. Sydney: Australian Standard, 1996. 76p.

BOTELHO, A. H. Influência Da Operação De Desmonte De Rochas No Carregamento De Material Fragmentado. 2014. Tese (Mestrado em Engenharia de Minas, Materiais e Metalúrgica) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014.

Calcário. Inducal, [s.d.]. Disponível em: <<https://www.inducal.com.br/calcario>>. Acesso em: 10 de out. de 2023.

CASTRANOVA, V. et al. Enhanced pulmonary response to the inhalation of freshly fractured silica as compared with aged dust exposure. Applied and Occupational Environmental Hygiene, New York, v. 7, n. 11, p. 937-941, July 1996.

CASTRO, N. F.; FREIRE, L. C. Segurança e saúde na produção de rochas ornamentais. Em: IX SIMPÓSIO DE ROCHAS ORNAMENTAIS DO NORDESTE. 10 a 13 abril de 2016, João Pessoa – PB7. Disponível em: <<https://www.cetem.gov.br/antigo/images/congressos/2016/STRO202.pdf>>. Acesso em: 11 de out de 2023.

COLLIERE, A. L. Análise operacional do britador primário a partir da alteração de variáveis do plano de fogo em uma mina de calcário em Xambioá-TO. 2020. Tese (Bacharel em Engenharia de Minas) - Universidade Federal de Catalão – UFCAT, Catalão, 2020.

Cristal Jr. Tratamento de minérios: descubra como funciona todo o processo de beneficiamento. 2020. Disponível em: <<https://cristaljr.com/tratamento-de-minerio/>>. Acesso em: 8 de mar de 2024.

Dimensional. Protetor auditivo concha e plug: por que usar um e não o outro? 2022. Disponível em: <[Protetor auditivo concha e plug: por que usar um e não o outro? \(dimensional.com.br\)](https://dimensional.com.br/protetor-auditivo-concha-e-plug-por-que-usar-um-e-nao-o-outro/)>. Acesso em: 10 de fev. de 2024.

DIN 1055. Design loads for buildings: loads in silo bins. Berlin: Deutsche Norm, 1987. 6p.

EN 1991-4. Eurocode 1 Part 4. Actions on silos and tanks. Bruxelas: European Standard, 2006. 122p.

EZEQUIAS, N. G. Método de lavra a céu aberto. 2020. Boa Vista, 2020.

FERREIRA, D. L. Dimensionamento de frota utilizando indicadores operacionais de uma mina a céu-aberto no alto Paranaíba. 2021. Tese (Bacharel em Engenharia de Minas) – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, CEFET/MG, Araxá, 2021.

FORNARI, M. Produção cresce 15% em 2021. Brasil Mineral, nº 417, pág. 44-48, Jan/fev. de 2022.

Gestão ambiental: desafios e possibilidades na contemporaneidade: anais do 5º Fórum Nacional de Ensino em Gestão Ambiental, 16 a 18 de julho de 2014 / Organização de Robson Garcia da Silva [et al], Natal, RN, 2014.

PALMA, G.; CALIL JUNIOR, C. Propriedades físicas de alguns produtos armazenados. Revista Brasileira de Armazenamento, 2005, Vol. 30, No. 1, 65-72 ref. 7.

GRUENZNER, G. Avaliação da poeira de sílica: um estudo de caso em uma pedreira na região metropolitana de São Paulo. Tese (Mestrado em Engenharia Mineral) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2003.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Sistema de Contas Nacionais: Brasil. 2023. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/contas-nacionais/9052-sistema-de-contas-nacionais-brasil.html?=&t=o-que-e>>. Acesso em: 24 de jan. de 2024.

IRAMINA, W. S. et al. Identificação e controle de riscos ocupacionais em pedreira da região metropolitana de São Paulo. REM: R. Esc. Minas, Ouro Preto, 62(4): 503-509, out/dez. 2009

ISO 11697. Bases for design of structures: loads due to bulk materials. Switzerland: International Standard, 1995. 18p.

JUNIOR, C. L. S. et al. Avaliação de riscos ambientais no processo produtivo de uma mineradora no estado de Sergipe. Em: XXXVIII Encontro Nacional de Engenharia De Produção. Maceió, Alagoas, Brasil, 16 a 19 de outubro de 2018. Disponível em: <[https://abepro.org.br/biblioteca/TN\\_STP\\_261\\_501\\_35483.pdf](https://abepro.org.br/biblioteca/TN_STP_261_501_35483.pdf)>. Acesso em: 17 de jan. de 2024.

Lavra na Mineração: uma abordagem sobre métodos e regulamentação. Jazida, 2023. Disponível em: <<https://blog.jazida.com/lavra-na-mineracao-uma-abordagem-sobre-metodos-e-regulamentacao/>>. Acesso em: 10 de out de 2023.

LEITE, L. M. de O. Silos Metálicos. Tese (Mestrado em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2008.

LOBATO, J. C. M. Caracterização das propriedades de fluxo da lama vermelha para fins de dimensionamento de silos – aplicação para tremonhas cônicas. Tese (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia Mecânica do Instituto de Tecnologia, Universidade Federal do Pará, Belém, 2013.

LUZ, A. B. da.; SAMPAIO, J. A.; FRANÇA, S. C. A. Tratamento de Minérios. 5ª Edição. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2010.

Mineração no Brasil. Jazida, 2023. Disponível em: <<https://blog.jazida.com/mineracao-no-brasil/>>. Acesso em: 13 de junho de 2024.

Ministério do Trabalho e Emprego. NR 01 – Disposições Gerais e Gerenciamento de Riscos Ocupacionais. Brasília: Ministério do Trabalho e Emprego, 2020.

Ministério do Trabalho e Emprego. NR 06 – Equipamento de Proteção Individual – EPI. Brasília: Ministério do Trabalho e Emprego, 2022.

Ministério do Trabalho e Emprego. NR 07 – Programa de Controle Médico de Saúde Ocupacional. Brasília: Ministério do Trabalho e Emprego, 2020.

Ministério do Trabalho e Emprego. NR 15 – Atividades e Operações Insalubres. Brasília: Ministério do Trabalho e Emprego, 2021.

MIRANDA, D. B. de. Luvas como proteção ao trabalhador, 2011. Tese (Especialização em Engenharia de Segurança do Trabalho) – Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Taubaté, Taubaté, 2011.

MORAES, M. “O que é calcário no solo: conheça 5 tipos!”. AgroPós, c2022. Disponível em: <<https://agropos.com.br/o-que-e-calcario/>>. Acesso em: 10 de out. de 2023.

Mordor Intelligence. Tamanho do mercado de calcário e análise de ações – Tendências e previsões de crescimento (2024 – 2029). 2023. Disponível em: <https://www.mordorintelligence.com/pt/industry-reports/limestone-market>. Acesso em: 24 de jan. de 2024.

Neobetel. Guia técnico de produtos. 2024. Disponível em: <https://www.neobetel.com.br/produtos>. Acesso em: 15 de abr. de 2024.

OCDE. Governança regulatória no setor de mineração no Brasil. OECD Publishing, Paris, 2022.

OLIVEIRA, M. L. M. de; LUZ, J. A. M. da; LACERDA, C. M. M. Espessamento e Filtragem. Departamento de Engenharia de Minas, Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2004. Disponível em: <[https://files.cercomp.ufg.br/weby/up/596/o/apostila\\_ufop.pdf](https://files.cercomp.ufg.br/weby/up/596/o/apostila_ufop.pdf)>. Acesso em: 9 de mar de 2024.

SALAZAR, J. S. Comparação de rotas de cominuição de minério de ferro itabirítico usando conceitos de sustentabilidade e eficiência energética. 2014. Tese (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais) – Instituto Alberto Luiz Coimbra, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2014.

Sansuy. Tipos de silo: saiba mais sobre o assunto. 2024. Disponível em: <<https://blog.sansuy.com.br/tipos-de-silo-saiba-mais-sobre-o-assunto/>>. Acesso em: 13 de maio de 2024.

SARTORI, G. B.; BRESSAN, R. T. Análise em fatores técnicos financeiros quanto à utilização do aço ZAR 345 e ZAR 450 em silos armazenadores metálicos. Anais do 20º Encontro Científico Cultural Interinstitucional – 2022. ISSN 1980-7406.

SCALABRIN, L. A. Dimensionamento de silos metálicos para armazenagem de grãos. 2008. Tese (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008.

SCHULZE, Dietmar. Powders and Bulk Solids: Behavior, Characterization, Storage and Flow. 2ª Edição. Wolfsburg: Springer, 2021.

SILVA, J. L. Calcário: Veja como ele pode ser aplicado em diversas soluções para o agro, indústria e construção. Gecal, 2023. Disponível em: <<https://www.gecal.com.br/calcario-veja-como-ele-pode-aplicado-em-diversas-solucoes>>. Acesso em: 10 de out. de 2023.

SILVA, R. L. da. Impactos socioambientais na extração de calcário em assentamento rural, Upanema/RN. Tese (Mestrado em Cognição, Tecnologias e Instituições) – Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Mossoró, 2021.

SILVA, R. P. Identificação de riscos ocupacionais em pedreira localizada na região metropolitana do Recife (RMR). Tese (Bacharel em Engenharia de Minas) – Centro de Tecnologia e Geociências, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2023.

SOUSA, I. de. Aplicação da metodologia integrada de avaliação de risco na indústria extrativa a céu aberto. Tese (Mestrado em Engenharia de Segurança e Higiene Ocupacional) – Faculdade de Engenharia, Faculdade do Porto, Porto, 2015.