

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA

NATASHA BRUNA ALVES BARROS

**ESTUDO DO SISTEMA DE ALIMENTAÇÃO DE MATÉRIA-PRIMA EM UMA
INDÚSTRIA DE FÓRMULAS INFANTIS E SUPLEMENTOS EM PÓ**

São Carlos – SP

2023

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA

NATASHA BRUNA ALVES BARROS

**ESTUDO DO SISTEMA DE ALIMENTAÇÃO DE MATÉRIA-PRIMA EM UMA
INDÚSTRIA DE FÓRMULAS INFANTIS E SUPLEMENTOS EM PÓ**

Trabalho de Graduação apresentado ao
Departamento de Engenharia Química da
Universidade Federal de São Carlos para
obtenção do título de bacharel em
engenharia química

Orientador: Prof. Dr. João Paulo Silva Queiroz

São Carlos – SP

2023

Barros, Natasha Bruna Alves

Estudo do sistema de alimentação de matéria-prima em uma indústria de fórmulas infantis e suplementos em pó / Natasha Bruna Alves Barros -- 2023.
54f.

TCC (Graduação) - Universidade Federal de São Carlos, campus São Carlos, São Carlos

Orientador (a): João Paulo Silva Queiroz

Banca Examinadora: João Paulo Silva Queiroz, Rosineide Gomes da Silva Cruz, Vádila Giovana Guerra Béttega

Bibliografia

1. Dimensionamento de silos. 2. Classificação de silos. 3. Fator de fluxo. I. Barros, Natasha Bruna Alves. II. Título.

Ficha catalográfica desenvolvida pela Secretaria Geral de Informática(SIn)

DADOS FORNECIDOS PELO AUTOR

Bibliotecário responsável: Ronildo Santos Prado - CRB/8 7325

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA

FOLHA DE APROVAÇÃO

Prof. Dr. João Paulo Silva Queiroz
Departamento de Engenharia Química, UFSCar.

Profa. Dra. Rosineide Gomes da Silva Cruz
Departamento de Engenharia Química, UFSCar.

Profa. Dra. Vádila Giovana Guerra Béttega
Departamento de Engenharia Química, UFSCar.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, pela oportunidade de crescer e aprender tanto nessa jornada.

Agradeço a minha família, pela confiança que sempre tiveram em mim.

Agradeço aos meus amigos, por me ensinarem e apoiarem tanto, por todas as risadas compartilhadas ao longo dessa trajetória.

Agradeço aos parceiros das atividades extracurriculares, em especial a Physis Jr., pelos ensinamentos e amadurecimento que vieram de vivenciar essa experiência.

RESUMO

Com o crescimento populacional e modernização da sociedade, a indústria alimentícia adaptou-se a demandas cada vez maiores e personalizadas. Um dos segmentos que caracterizam esta modernização são os suplementos em pó, criados para fornecer a combinação desejada de nutrientes em um único produto. Neste cenário, um dos ramos de compostos em pó com maior popularidade são as fórmulas infantis, destinadas a complementação ou substituição da amamentação materna. As fórmulas infantis são uma versão sintética do leite materno, logo são combinados vitaminas, carboidratos e proteínas para nutrição adequada da criança. Neste contexto, uma indústria de fórmulas e suplementos em pó realizou uma modificação no sistema de alimentação de matéria-prima visando aumentar a eficiência produtiva e manter a competitividade no mercado. Nesta mudança, foi instalado um novo silo com maior capacidade, sendo possível abastecer o equipamento com sacarias de maior tamanho, agilizando a produção. Desta maneira, este trabalho consiste em um estudo de caso no qual foram avaliados parâmetros como pressão, vazão e velocidade e realizada a comparação de cenários no abastecimento de uma fonte de carboidratos. Além disso, conceitos como fator de fluxo foram empregados para avaliação do sistema de alimentação. Por fim, concluiu-se que com a permanência de características estruturais em ambos os silos, apenas a pressão vertical sofreu alteração. No entanto, foram discutidos ganhos na qualidade do processo, devido a minimização da interferência humana, assim como otimização da rotina dos trabalhadores e aumento da eficiência operacional, devido ao aumento no pulmão de matéria-prima.

Palavras-chave: Silo, funil, fluxo mássico, fluxo de funil, pó, material particulado, fator de fluxo, função de falha.

ABSTRACT

With population growth and modernization of society, the food industry has adapted to ever-increasing and personalized demands. One of the segments that characterize this modernization is powdered supplements, created to provide a desired combination of nutrients in a single product. In this scenario, one of the most popular branches of powdered compounds are infant formulas, designed to complement or replace breastfeeding. Infant formulas are a synthetic version of breast milk, so vitamins, carbohydrates and proteins are combined for proper nutrition of the child. In this context, an industry of formulas and powdered supplements made a change in the raw material supply system in order to increase production efficiency and maintain competitiveness in the market. In this change, a new silo with greater capacity was installed, making it possible to supply the equipment with larger bags, speeding up production. In this way, this work consists of a case study in which parameters such as pressure, flow and velocity were evaluated, and a comparison of scenarios was carried out in the supply of a source of carbohydrates. In addition, concepts such as flow factor were used to evaluate the feeding system. Finally, it was concluded that with the permanence of structural characteristics in both silos, only the vertical pressure changed. However, gains in process quality were discussed, due to the minimization of human interference, as well as optimization of the workers' routine and increased operational efficiency, due to the increase in the raw material buffer.

Keywords: Silo, funnel, mass flow, funnel flow, powder, particulate matter, flow factor, failure function.

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 – Célula de cisalhamento de Jenike.....	16
Figura 3.2 – Tensão de cisalhamento em função da tensão normal.....	17
Figura 3.3 – Determinação do ângulo efetivo de atrito interno.....	18
Figura 3.4 – Determinação do ângulo de atrito com a parede.....	18
Figura 3.5 – Silo de Fluxo Mássico.....	20
Figura 3.6 – Silo de Fluxo de Funil.....	21
Figura 3.7 – Silo de Fluxo Expandido.....	23
Figura 3.8 – Funis (a) cônico, (b) em forma de cunha e (c) em formato de cinzel.....	24
Figura 3.9 – Distribuição de estresse na parede do silo.....	25
Figura 3.10 – Limites entre fluxo mássico e fluxo de funil.....	27
Figura 3.11 – Padrão de fluxo no silo.....	28
Figura 3.12 – Equilíbrio de forças na saída do funil.....	29
Figura 3.13 – Curva de design da função fluxo para $\delta = 40^\circ$	31
Figura 3.14 – Funções para análise do silo.....	32
Figura 3.15 – Dispositivo de Aeração.....	34
Figura 3.16 – Dispositivo do tipo parafuso.....	36
Figura 3.17 – Problemas no escoamento de pós (a) arqueamento, (b) caminhos preferenciais e (c) segregação.....	37
Figura 4.1 – Diagrama de blocos do processo.....	38
Figura 4.2 – Sistema de alimentação de matéria-prima e misturador.....	39
Figura 4.3 – Dimensões de SL-01 e SL-02.....	40
Figura 4.4 – Dimensões de SL-03.....	40

Figura 4.5 – Válvula Borboleta.....	41
Figura 4.6 – Calha Vibratória.....	41
Figura 5.1 – Determinação do padrão de fluxo no silo.....	45
Figura 5.2 – Fator de fluxo para funil cônico e $\delta = 30^\circ$	46
Figura 5.3 – Tensão não confinada em função da tensão de consolidação.....	48
Figura 5.4 – Função de Falha (FF).....	49
Figura 5.5 – Determinação da tensão crítica.....	49

LISTA DE QUADROS E TABELAS

Tabela 3.1 – Classificação dos pós.....	30
Tabela 3.2 – Correlações para obtenção do fator de fluxo para funis cônicos.....	32
Quadro 4.1 – Características dos materiais.....	42
Quadro 4.2 – Dados empregados nos cálculos.....	43
Tabela 5.1 – Pressão vertical no silo.....	44
Tabela 5.2 – Compilado dos resultados.....	51

LISTA DE SÍMBOLOS

δ – Ângulo efetivo de atrito interno dos sólidos

ϕ – Ângulo de atrito com a parede

D – Diâmetro do silo

H – Altura média do material na parte cilíndrica

H_{cr} – Altura crítica para início do fluxo mássico

θ – Meio ângulo do funil

B – Abertura de saída do funil

H_D – Profundidade de fluxo dinâmico em fluxo de funil

p_v – Pressão vertical

g – Aceleração da gravidade

μ' – Coeficiente de fricção

h – Altura abaixo do topo dos sólidos

K' – Fração entre a pressão horizontal e vertical

$\bar{\sigma}_1$ – Tensão crítica

σ_1 – Tensão de consolidação

σ_c – Tensão não confinada

ρ_b – Densidade aparente

a – Aceleração de descarga do material

L – Abertura retangular de funis de fluxo plano

m – Constante

LISTA DE SIGLAS

ff – Fator de fluxo

ff_a – Fator de fluxo real

FF – Função de Falha

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
2	OBJETIVOS	15
2.1	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	15
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
3.1	CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL SÓLIDO	16
3.2	CLASSIFICAÇÃO DOS SILOS	19
3.2.1	Fluxo Mássico	19
3.2.2	Fluxo de Funil	21
3.2.3	Fluxo Expandido	22
3.3	TIPOS DE FUNIS	23
3.4	PRESSÃO NA PAREDE DE SILOS AXISSIMÉTRICOS	24
3.5	CONDIÇÕES DE FLUXO	26
3.6	ABERTURA DO SILO	28
3.7	FATOR DE FLUXO DE JENIKE	30
3.8	VELOCIDADE E VAZÃO DO ESCOAMENTO	33
3.9	DISPOSITIVOS DE AUXÍLIO NO ESCOAMENTO	33
3.9.1	Dispositivos Pneumáticos	34
3.9.2	Dispositivos Vibracionais	35
3.9.3	Dispositivos Mecânicos	35
3.10	PROBLEMAS NO ESCOAMENTO	36
4	MATERIAIS E MÉTODOS	38
4.1	PROCESSO	38
4.2	MATERIAL	42
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	44
5.1	PRESSÃO NO SILO	44
5.2	PADRÃO DE FLUXO	45
5.3	FATOR DE FLUXO	46
5.4	FATOR DE FLUXO REAL	47
5.5	FUNÇÃO DE FALHA	47
5.6	ABERTURA MÍNIMA DO FUNIL	50
5.7	VELOCIDADE E VAZÃO DO ESCOAMENTO	50
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	52
	REFERÊNCIAS	53

1 INTRODUÇÃO

Os pós ou materiais sólidos particulados podem ser chamados por diversas terminologias, como grânulos, farinha ou poeira, e são divididos baseados no tamanho da partícula. Os grânulos possuem dimensão na ordem dos milímetros enquanto os pós finos usualmente possuem um tamanho médio de 100 μm . No entanto, todos esses materiais são tratados na categoria de pó (BHANDARI et al., 2013).

A tecnologia de materiais em pó ou tecnologia de partículas é um ramo da engenharia caracterizado pelo estudo sistemático de materiais particulados, sendo que as partículas podem ser secas ou suspensas em um fluido. Apesar de sua importância e abrangência, somente durante os anos de 1960 que a tecnologia de partículas passou a ser estudada como disciplina acadêmica na Alemanha. Os interesses de estudo desta disciplina são diversos e compreendem desde a caracterização do sólido, aglomeração, mistura, armazenamento e fluidização (ORTEGA-RIVAS, 2012).

Os materiais particulados utilizados na indústria são armazenados de diferentes formas, a depender de sua finalidade. Os materiais podem ser abrigados ao ar livre, sem proteção das condições ambientais, mas em sua maioria são armazenados em silos ou galpões para garantir sua integridade. Ainda há casos em que os silos são conectados diretamente ao sistema de abastecimento da linha de produção por meio de um sistema de transporte (ORTEGA-RIVAS, 2012).

Neste trabalho será estudado o caso de uma indústria de fórmulas infantis e suplementos em pó, no qual instalou-se um silo de maior capacidade para abastecer o processo produtivo. O silo foi projetado por uma empresa especializada, com o objetivo de aumentar a eficiência operacional da linha de produção. O silo utilizado anteriormente possuía 300 L, sendo agora utilizado um silo de 930 L, desta forma, podem ser abastecidas sacarias de tamanho maior e estabelece-se um pulmão de matéria-prima. Após passar pelo misturador, o material é destinado a envasadora. Neste contexto, será avaliado os impactos no escoamento devido a variação de volume do silo.

2 OBJETIVOS

O objetivo geral deste trabalho é avaliar os impactos causados no processo produtivo de uma indústria de fórmulas infantis e suplementos em pó devido a instalação de um silo de maior capacidade no sistema produtivo. Os impactos serão avaliados no que tange ao escoamento do material e desgaste do silo.

2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Para atingir o objetivo geral, tem-se os seguintes objetivos específicos:

- Determinação do tipo de fluxo no silo para a matéria-prima estudada;
- Cálculo da pressão vertical na parede do silo;
- Determinação da abertura mínima do funil;
- Determinação do fator de fluxo crítico e real;
- Determinação da tensão crítica;
- Cálculo da velocidade e vazão de escoamento;
- Comparação e discussão dos ganhos na mudança no sistema de alimentação.

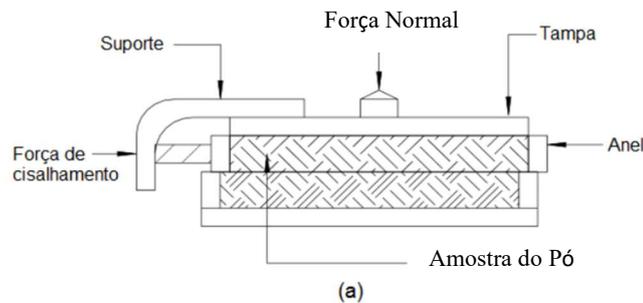
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL SÓLIDO

Para que os materiais sólidos escoem, é necessário que a força aplicada no material seja superior a interação entre as partículas, ou seja, é necessário que o material quebre ou falhe. Neste contexto, cinco propriedades são consideradas para descrever o comportamento de falha, sendo elas a o ângulo efetivo de atrito interno, o ângulo de atrito com a parede, a função de falha, a coesão e a máxima tração. Para garantir um fluxo constante e confiável, é crucial caracterizar com precisão o comportamento do fluxo de pó (ORTEGA-RIVAS, 2012).

As cinco propriedades de falha do material podem ser caracterizadas utilizando a célula de cisalhamento de Jenike. O aparato utilizado possui uma seção transversal circular de 95 mm e consiste em uma base, um anel capaz de deslizar horizontalmente sobre a base e uma tampa, conforme a Figura 3.1

Figura 3.1 – Célula de cisalhamento de Jenike



Fonte: Adaptado de Mascarenhas et al. (2017).

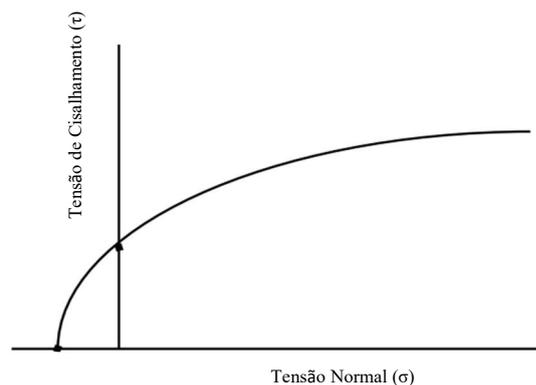
De acordo com Ortega-Rivas (2012), a realização do teste pode ser dividida em três etapas:

- a) Pré-consolidação: esta etapa consiste no abastecimento do anel com uma amostra do pó. Em seguida, uma tampa onde aplica-se torção é posicionada sobre a amostra. Após

- aplicar uma série de torções na tampa, retira-se o topo e nivela-se o material com a parte superior da célula. Desta forma, garante-se a uniformidade das amostras;
- b) Consolidação: nesta etapa é posicionado uma tampa sobre o material e em seguida é aplicada um determinado valor de força normal sobre ele. Em seguida, uma força de cisalhamento é continuamente aplicada até que seja obtido um valor de estado estacionário, indicando escoamento plástico. Então, a força de cisalhamento é cessada;
 - c) Cisalhamento: Esta etapa consiste na substituição da força normal de consolidação por uma força menor, enquanto aplica-se a força de cisalhamento até pontos de deformação do material. Nesta etapa, aplica-se entre cinco e seis cargas progressivamente menores de carga vertical na amostra de pó e determina-se a força de cisalhamento necessária para iniciar o fluxo em cada uma das cargas.

Desta forma, dividindo as forças obtidas durante o experimento pela área da seção transversal da célula, obtém-se as tensões de cisalhamento e normal, que são plotadas em um gráfico conforme a Figura 3.2.

Figura 3.2 – Tensão de cisalhamento em função da tensão normal

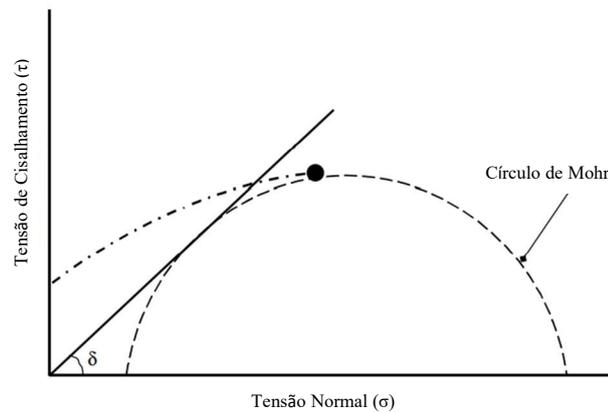


Fonte: Ortega-Rivas (2012), usada sob licença CC BY-NC-ND 4.0.

A partir dos resultados obtidos, é possível determinar duas propriedades importantes para o desenvolvimento deste trabalho: o ângulo efetivo de atrito interno (δ) e o ângulo de atrito com a parede (ϕ).

O ângulo efetivo de atrito interno (δ) é definido como a medida de fricção entre as partículas. Esta propriedade é dependente da rugosidade, forma e tamanho das partículas. (CAMPOS, 2012). Esta propriedade corresponde ao ângulo obtido ao traçar uma reta tangente ao círculo de Mohr inscrito na curva limite de escoamento e passando pela origem, conforme a Figura 3.3.

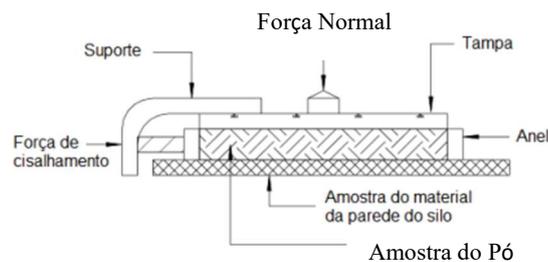
Figura 3.3 – Determinação do ângulo efetivo de atrito interno



Fonte: Ortega-Rivas (2012), usada sob licença CC BY-NC-ND 4.0.

O ângulo de atrito com a parede (ϕ) é a medida da fricção entre a parede do equipamento de armazenamento e o material sólido (CAMPOS, 2012). Para obter-se esta propriedade, substitui-se a base da célula de cisalhamento de Jenike por uma placa do material que constitui o equipamento, conforme a Figura 3.4.

Figura 3.4 – Determinação do ângulo de atrito com a parede



Fonte: Adaptado de Mascarenhas et al. (2017).

Em seguida, o anel é abastecido com uma amostra do sólido e determina-se a força de cisalhamento necessária para manter o deslocamento uniforme do anel para diferentes cargas normais aplicadas. Por fim, plota-se um gráfico da força de cisalhamento em função da função normal, sendo que a inclinação da curva corresponde ao ângulo de atrito com a parede (ORTEGA-RIVAS, 2012).

Apesar da existência de outros métodos para determinação das características do fluxo dos sólidos, como a célula de cisalhamento anular e a célula de cisalhamento rotacional, o método de Jenike permanece a abordagem mais utilizada. Isto acontece porque o método foi sendo aperfeiçoado ao longo dos anos, além de fornecer informações relevantes em relação ao comportamento do pó e a interação com a parede. No entanto, uma das desvantagens da utilização da célula de cisalhamento de Jenike consiste na aplicação não uniforme da força de cisalhamento, assim como a força vertical. Em ambos os casos, a força concentra-se em determinada parte da amostra de material. Apesar disso, é possível estimar-se as condições médias de tensão, variando do zero a tensão máxima aplicada (ORTEGA-RIVAS, 2012).

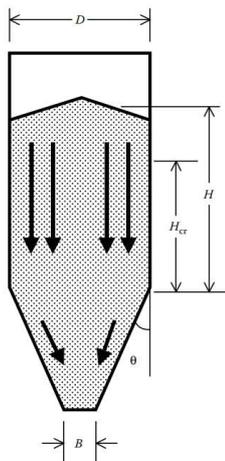
3.2 CLASSIFICAÇÃO DOS SILOS

De acordo com os trabalhos de Jenike (1964), os silos são classificados de acordo padrão de fluxo, sendo divididos em fluxo mássico e fluxo de funil. No entanto, de acordo com trabalhos mais recentes, como o de Ortega-Rivas (2012) existe uma terceira categoria de silo denominada fluxo expandido.

3.2.1 Fluxo Mássico

A principal característica de um silo de fluxo mássico é o escoamento uniforme. O funil é suficientemente íngreme e suave para garantir o fluxo dos sólidos, sem causar regiões inativas e caminhos preferenciais, conforme representado na Figura 3.5 (ORTEGA-RIVAS, 2012).

Figura 3.5 – Silo de Fluxo Mássico



Fonte: Ortega-Rivas (2012), usada sob licença CC BY-NC-ND 4.0.

Na Figura 3.5 estão apresentadas as dimensões do silo, sendo D o diâmetro do silo; H a altura média do material na parte cilíndrica; H_{cr} a altura crítica para início do fluxo mássico; θ a inclinação do funil e B a abertura de saída.

Os silos de fluxo mássico podem ser construídos em diversos formatos, no entanto todos são caracterizados por possuir funil íngreme e transições suaves (JENIKE, 1964). Os silos de fluxo de massa são indicados para materiais particulados finos, materiais que degradam com o tempo e materiais coesivos (ORTEGA-RIVAS, 2012). Os materiais coesivos são caracterizados por não escoar livremente, pois as interações entre as partículas são mais fortes do que força da gravidade agindo sobre estas (CAMPOS, 2012).

A partir do trabalho de Jenike (1964), é possível determinar que as principais características do silo de fluxo mássico são:

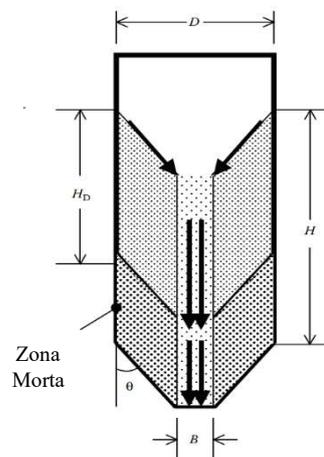
- a) O fluxo de material é uniforme, sendo possível considerar fluxo constante como uma aproximação com alto grau de confiança nas realizações dos cálculos;
- b) A densidade aparente do sólido é constante e praticamente independente da quantidade de sólidos no silo. A principal vantagem desta característica é o controle da vazão, e se trata de um ponto indispensável quando a vazão é controlada volumetricamente. No entanto, é válido ressaltar que em casos de materiais particulados altamente aerados é

- necessário um tempo de residência maior, para que seja possível formar um leito de contato;
- c) Em um silo de fluxo mássico projetado adequadamente, a mistura é remixada na saída do funil, mesmo que haja segregação dos materiais durante a etapa de abastecimento;
 - d) Obtém-se um padrão *first-in first-out*, no qual o primeiro material abastecido é o primeiro a ser descarregado. Esta característica é principalmente interessante em casos em que o material se deteriora com o tempo;
 - e) Em qualquer seção horizontal transversal do funil pode-se considerar as pressões como sendo uniformes. Desta maneira, obtém-se consolidação e permeabilidade uniformes;
 - f) A consolidação dos sólidos e o atrito entre os sólidos e a parede, e conseqüentemente o desgaste da parede do silo, são baixos devido as pressões em todo o material e nas paredes serem relativamente baixas.

3.2.2 Fluxo de Funil

O silo de fluxo de funil é caracterizado pela formação de canais preferenciais em torno de material estagnado no armazenamento do silo. Este fenômeno ocorre por dois motivos: o funil não é suficientemente íngreme e suave para que o material escoe adequadamente e a abertura do funil não foi projetada corretamente, não sendo efetiva (ORTEGA-RIVAS, 2012). Na Figura 3.6 tem-se a representação de um silo do tipo fluxo de funil.

Figura 3.6 – Silo de Fluxo de Funil



Fonte: Adaptado de Ortega-Rivas (2012), usada sob licença CC BY-NC-ND 4.0.

Na Figura 3.6 estão apresentadas as dimensões do silo, sendo D o diâmetro do silo; H a altura média do material na parte cilíndrica; H_D a profundidade de fluxo dinâmico em fluxo de funil; θ a inclinação do funil e B a abertura de saída.

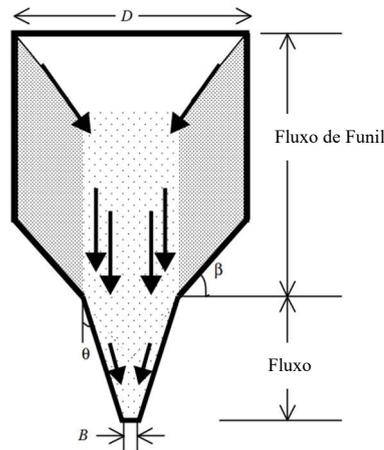
O padrão de fluxo do silo de funil favorece a segregação dos materiais, pois as partículas mais finas se concentram na região de fluxo do canal preferencial, enquanto as partículas maiores são segregadas nas laterais, conforme representado na Figura 3.3. Desta maneira, quando o nível de sólidos no silo é maior, há uma preponderância no escoamento de partículas finas e conforme o nível de sólidos decresce, aumenta-se o fluxo de partículas maiores. Portanto, quando a taxa de descarga é igual a de alimentação obtém-se um padrão de fluxo denominado *first-in last-out*, ou seja, o primeiro material abastecido é o último a ser descarregado (JENIKE, 1964).

Devido as características do padrão de fluxo citadas anteriormente, o fluxo de descarga no silo de funil se torna de difícil controle e previsibilidade. No entanto, uma das vantagens da utilização deste tipo de silo é a proteção fornecida pelo material estagnado nas paredes do silo (ORTEGA-RIVAS, 2012). Desta maneira, visando a conservação do equipamento, os silos do tipo fluxo de funil são boas alternativas no armazenamento de materiais corrosivos e grumosos (JENIKE, 1964).

3.2.3 Fluxo Expandido

O funil de fluxo expandido combina características dos silos de fluxo mássico e de funil. Neste tipo de silo, obtém-se a descarga controlável do silo de fluxo de massa, assim como a proteção das paredes do silo de fluxo de funil. Este fenômeno ocorre porque o funil do silo de fluxo expandido assemelha-se ao do funil de fluxo mássico, fazendo com que o diâmetro ou diagonal do fluxo de massa seja igual ou maior do que o diâmetro crítico para formação de caminhos preferenciais, observados no silo do tipo funil. A Figura 3.7 consiste em uma representação do silo de fluxo expandido.

Figura 3.7 – Silo de Fluxo Expandido



Fonte: Adaptado de Ortega-Rivas (2012), usada sob licença CC BY-NC-ND 4.0.

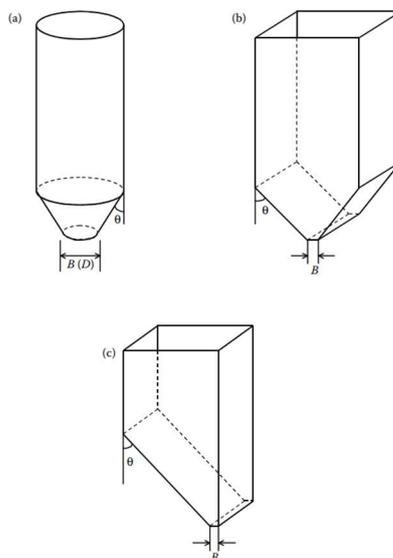
Na Figura 3.7 estão apresentadas as dimensões do silo, sendo D o diâmetro do silo; θ a inclinação do funil e B a abertura de saída. Na imagem observa-se a divisão entre as características de fluxo de funil e fluxo mássico.

Os silos de fluxo expandido são usualmente utilizados em caso de múltiplas saídas e para armazenar grandes quantidades de sólidos sem que seja necessário utilizar silos com alturas exorbitantes (ORTEGA-RIVAS, 2012).

3.3 TIPOS DE FUNIS

Os principais tipos funis são utilizados nos silos são funil cônico, funil em cunha e funil em formato de cinzel, representados na Figura 3.8.

Figura 3.8 – Funis (a) cônico, (b) em forma de cunha e (c) em formato de cinzel



Fonte: Ortega-Rivas (2012), usada sob licença CC BY-NC-ND 4.0.

Em relação ao padrão de fluxo obtido em cada formato de funil, apenas o funil cônico fornece um padrão de fluxo axissimétrico. Nos demais modelos, o fluxo obtido é plano. Os silos de fluxo plano oferecem maior capacidade de armazenamento para o mesmo espaço cilíndrico, pois a inclinação vertical do funil é cerca de 8 a 10° maior quando comparada com os silos de fluxo axissimétrico. No entanto, esta vantagem pode ser compensada pela desvantagem da longa abertura em forma de fenda, que pode gerar problemas no descarregamento (ORTEGA-RIVAS, 2012).

3.4 PRESSÃO NA PAREDE DE SILOS AXISSIMÉTRICOS

A pressão gerada na parede dos silos é um dos parâmetros utilizados para que o equipamento seja projetado de forma eficiente e econômica. As formas de avaliação do estresse do silo são variadas, no entanto todas as abordagens convergem para que o tipo de fluxo de massa observado no silo seja o fator de maior impacto (ORTEGA-RIVAS, 2012).

A teoria mais difundida no cálculo da pressão em silos foi criada por Janssen (1985). Apesar de muitas teorias terem sido discutidas desde então, a maioria dos autores concordam que o impacto gerado no silo varia nos estágios de alimentação e descarga. Durante a

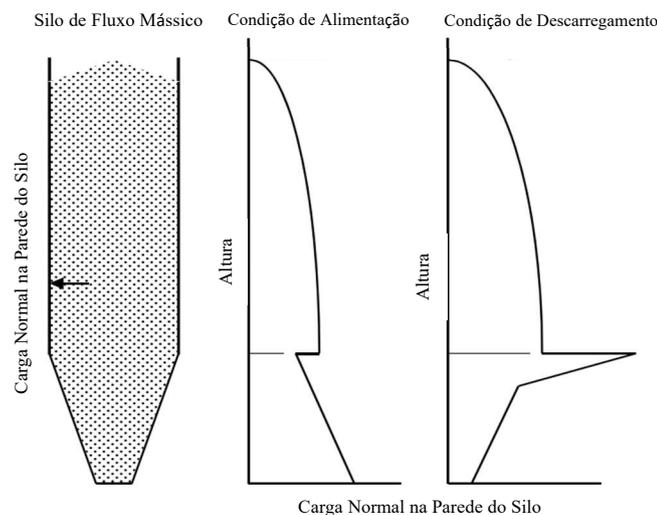
alimentação do silo, há contração vertical dos sólidos, gerada pelo peso exercido pelo material e neste caso o estresse é denominado ativo ou de pico. Durante a descarga, há contração lateral devido a abertura da funil que proporciona a saída dos materiais, gerando estresse passivo ou arqueado (ORTEGA-RIVAS, 2012).

Para um silo que consiste em uma seção cilíndrica e um funil, pode ser considerado cinco faixas de pressão:

- a) Pressão ativa na seção cilíndrica durante a alimentação dos sólidos;
- b) Na seção cilíndrica durante o esvaziamento. Neste caso o estresse pode ser ativo ou passivo, dependendo da faixa de transição;
- c) Pressão ativa na seção convergente do funil durante a alimentação;
- d) Pressão passiva na seção convergente do funil durante o esvaziamento;
- e) Região de transição, onde a pressão ativa gerada durante a alimentação é convertida em pressão passiva.

A Figura 3.9 apresenta o perfil de estresse observado nos silos durante os diferentes estágios.

Figura 3.9 – Distribuição de estresse na parede do silo



Fonte: Ortega-Rivas (2012), usada sob licença CC BY-NC-ND 4.0.

A equação de Janssen (3.1) é a mais difundida para cálculo da pressão em silos devido a sua boa aproximação para o estado de alimentação, além da simplicidade de uma equação analítica.

$$p_v = \frac{gp_bD}{4\mu'K'} \left[1 - e^{-\left(\frac{4\mu'K'h}{D}\right)} \right] \quad (3.1)$$

Na qual p_v é a pressão vertical, g a aceleração da gravidade, D o diâmetro do silo, μ' o coeficiente de fricção, h a profundidade abaixo do topo dos sólidos e K' é a fração entre a pressão horizontal e vertical. O fator K' pode ser obtido através da equação (3.2).

$$K' = \frac{1 - \text{seno } \delta}{1 + \text{seno } \delta} \quad (3.2)$$

Sendo que δ é denominado ângulo efetivo de atrito interno dos sólidos.

A equação de Janssen foi obtida através da consideração de que existe um equilíbrio de força vertical em uma seção transversal que abrange todo o silo. Além disso, foi determinado o atrito da parede e fração da pressão horizontal a partir de um silo modelo. Por fim, assumiu-se que a pressão vertical é constante através da seção transversal (BARBOSA-CÁNOVAS et al., 2005).

3.5 CONDIÇÕES DE FLUXO

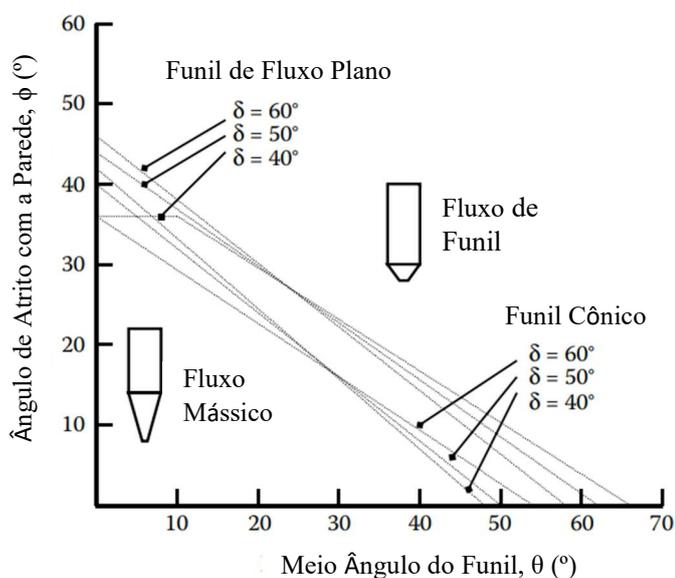
O atrito entre a parede do silo e as partículas do material gera um efeito de atrito em toda a massa de sólido. O efeito gerado é de tal forma que o atrito na parede tende a compensar o impacto causado pelo peso de sólidos no fundo do silo. Em casos extremos, observa-se que os sólidos não fluiriam pelo silo mesmo se o material estivesse sendo descarregado, pois a força de atrito gera um arco ou ponte no material. Observa-se que quando a altura do leito de sólidos atinge três vezes o diâmetro do silo, o peso adicional de material sendo abastecido não gera

nenhuma pressão no fundo do equipamento, em caso de sólidos muito granulares (ORTEGA-RIVAS, 2012).

Os limites entre silo de fluxo mássico ou de funil são baseados no meio ângulo do funil (θ), ângulo efetivo de atrito interno (δ) e ângulo de atrito com a parede (ϕ). Desta forma, conclui-se que o impacto no escoamento depende tanto de características estruturais do silo, como design e localização da abertura do funil, quanto das propriedades do material. Dessa maneira, pode-se obter padrões de fluxo diferentes no mesmo silo variando apenas o material (ORTEGA-RIVAS, 2012).

Na Figura 3.10 é possível determinar o meio ângulo do funil a partir de três valores de ângulo efetivo de atrito interno.

Figura 3.10 – Limites entre fluxo mássico e fluxo de funil

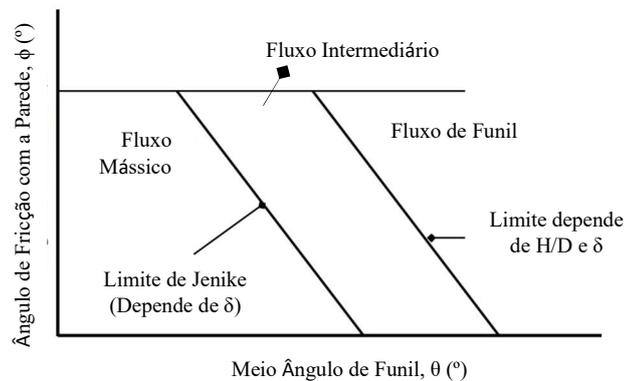


Fonte: Ortega-Rivas (2012), usada sob licença CC BY-NC-ND 4.0.

Para funis cônicos, recomenda-se que o meio ângulo do funil seja 3° menor do que o limite. Para funis planos, é possível projetar meio ângulo maiores, pois os limites entre fluxo mássico e de funil são mais sutis (BARBOSA-CÁNOVAS et al., 2005).

Além do meio ângulo do funil, autores como Benink (1989 apud ORTEGA-RIVAS, 2012) também consideram o impacto da altura do leito de sólidos no fluxo do material. A altura crítica (H_{cr}) em silos de fluxo mássico é considerada de $0,75D$ a $1,0D$. De acordo com Benink (1989), há uma terceira região de fluxo, denominada fluxo intermediário, conforme exemplificado na Figura 3.11.

Figura 3.11 – Padrão de fluxo no silo

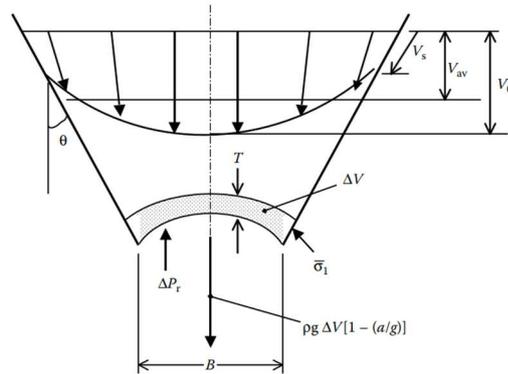


Fonte: Adaptado de Ortega-Rivas (2012), usada sob licença CC BY-NC-ND 4.0.

3.6 ABERTURA DO SILO

De acordo com ORTEGA-RIVAS (2012), considera-se o seguinte balanço de forças no arco formado na saída do funil, representado na Figura 3.12.

Figura 3.12 – Equilíbrio de forças na saída do funil



Fonte: Ortega-Rivas (2012), usada sob licença CC BY-NC-ND 4.0.

Para uma determinada massa de sólidos onde o ar é capaz de permear as partículas facilmente, quando o gradiente de pressão ΔP_r é igual a zero obtém-se o fluxo acelerado das partículas na saída do funil. Analisando as forças do diagrama da Figura 3.12, obtém-se a Equação 3.3.

$$\bar{\sigma}_1 = \frac{\rho_b g B}{H(\theta)} \left[1 - \frac{a}{g} \right] \quad (3.3)$$

Sendo que na Equação 3.3, $\bar{\sigma}_1$ é a tensão atuando no arco a 45° , ρ_b é a densidade *bulk*, ou densidade aparente, dos sólidos, g a aceleração da gravidade, B a abertura do funil, a a aceleração de descarga do bulk de sólidos. $H(\theta)$ é uma função do ângulo e do tipo do funil, sendo comumente adotado o valor de 2,2 para funil de fluxo plano e 2,4 para funil cônico.

Adotando $a = 0$, é possível calcular por meio da Equação 3.4 a abertura mínima do funil para prevenir a formação de um arco coesivo de material sólido.

$$B_{min} = \frac{\bar{\sigma}_1 H(\theta)}{\rho_b g} \quad (3.4)$$

3.7 FATOR DE FLUXO DE JENIKE

O fator de fluxo quantifica a força de coesão do pó consolidado, sendo de grande valia para indicar a força necessária para que aconteça o escoamento devido a ação da gravidade ou outra força externa (CAMPOS, 2012). O fator de fluxo poder ser obtido através da Equação 3.5.

$$ff = \frac{\bar{\sigma}_1}{\sigma_c} \quad (3.5)$$

Sendo que $\bar{\sigma}_1$ é a tensão atuando no arco a 45° e σ_c é a tensão não confinada de deslizamento.

A tensão não confinada de deslizamento (σ_c) é a tensão que provoca o escoamento do material quando ele se encontra inconfinado, isto é, livre. Para estabelecer a relação entre a tensão não confinada de deslizamento e a tensão de consolidação (σ_1), usualmente conduz-se um experimento no qual uma amostra é alojada dentro de um cilindro oco e considera-se o atrito das paredes desprezível. O material é submetido a uma tensão normal que gera a consolidação do material. Na sequência, o cilindro é removido e a amostra é submetida a uma tensão normal crescente até onde ocorre o ponto de ruptura da amostra. Então, repete-se o procedimento diversas vezes, para vários valores de σ_1 (FILHO, 2008).

A partir da determinação do fator de fluxo, é possível caracterizar o escoamento do material, conforme proposto por Jenike e apresentado na Tabela 3.1

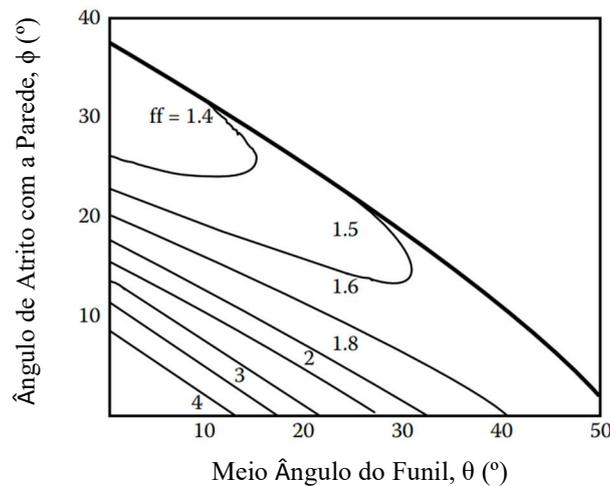
Tabela 3.1 – Classificação dos pós

Fator de Fluxo	Escoabilidade
$ff < 2$	Não escoa
$2 < ff < 4$	Coesivo
$4 < ff < 10$	Escoamento fácil
$ff > 10$	Escoamento livre

Fonte: Adaptado de Campos (2012).

O fator de fluxo também pode ser apresentado em função do ângulo de atrito com a parede e o meio ângulo de funil. É válido ressaltar que a curva de design também varia com o ângulo efetivo de atrito interno (δ) e está sendo exemplificado para $\delta = 40^\circ$ na Figura 3.13 (ORTEGA-RIVAS, 2012).

Figura 3.13 – Curva de design da função fluxo para $\delta = 40^\circ$



Fonte: Ortega-Rivas (2012), usada sob licença CC BY-NC-ND 4.0.

A partir das curvas de design, Oko et al. (2010) obteve correlações, possibilitando a determinação de ff com maior precisão. A Tabela 3.2 resume as correlações para determinação do fator de fluxo a partir do ângulo de atrito com a parede para funis cônicos.

Tabela 3.2 – Correlações para obtenção do fator de fluxo para funis cônicos

Correlação	δ ($^\circ$)	R^2
$-0,00031\phi^2 - 0,0065\phi + 2,0707$	30	0,9960
$-0,0001\phi^2 - 0,005\phi + 1,6251$	40	0,9984
$-0,0004\phi^2 - 0,0065\phi + 1,4573$	50	0,9975
$-0,00003\phi^2 - 0,0056\phi + 1,3474$	60	0,9989

Fonte: Adaptado de Oko et al. (2010)

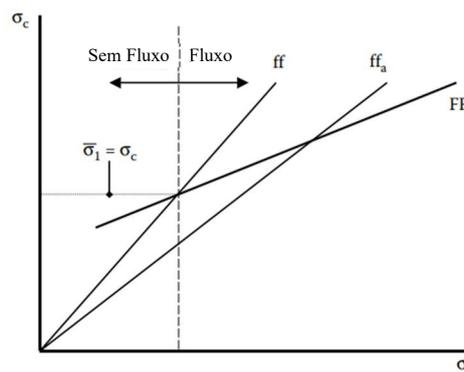
O fator de fluxo (ff) é baseado na mínima abertura do funil, portanto pode ser considerado o fator de fluxo crítico. Para avaliar o escoamento em relação a dimensão real de abertura do silo, calcula-se o fator de fluxo real (ff_a), dada pela Equação 3.6.

$$ff_a = \frac{\sigma_1}{\sigma_c} \quad (3.6)$$

Em que σ_1 é a tensão de consolidação correspondente a abertura B (ORTEGA-RIVAS, 2012).

Além disso, outra reta importante é a Função de Falha (FF), na qual o grau de inclinação corresponde ao inverso da tangente do fator de fluxo (ff). A partir da intersecção da função de falha e fator de fluxo, determina-se o valor da tensão que atua sobre o arco imaginário ($\bar{\sigma}_1$). Este valor corresponde ao valor mínimo de tensão para obter a ocorrência do fluxo, sendo nomeada tensão crítica por diversos autores. Para que o fluxo ocorra por força da gravidade, é necessário que a tensão adquirida para formação do arco seja superior do que a tensão não confinada, conforme exemplificado graficamente na Figura 3.14 (LOBATO, 2012).

Figura 3.14 – Funções para análise do silo



Fonte: Adaptado de Ortega-Rivas (2012), usada sob licença CC BY-NC-ND 4.0.

3.8 VELOCIDADE E VAZÃO DO ESCOAMENTO

De acordo com Ortega-Rivas (2012), a velocidade média de saída do material (V_a) pode ser calculada a partir da Equação (3.7).

$$V_a = \sqrt{\frac{Bg}{2(m+1)\tan\theta} \left[1 - \frac{ff}{ffa}\right]} \quad (3.7)$$

Em que m é uma constante, sendo utilizado o valor de 0 para funis de fluxo plano e 1 para funis cônicos ou axissimétricos.

A partir da velocidade, é possível determinar a vazão de acordo com a Equação 3.8

$$Q_0 = \rho_b B^{(1+m)} L^{(1-m)} \left(\frac{\pi}{4}\right)^m V_a \quad (3.8)$$

Em que L é a abertura retangular para funis de fluxo plano. Para funis cônicos, B representa o diâmetro da saída. Desta maneira, a Equação 3.8 é aplicável para ambos os tipos de funis (ORTEGA-RIVAS, 2012).

Nota-se que a vazão calculada usualmente é superior a demanda das fábricas. Neste contexto, o uso de alimentadores é indicado para controle da vazão e ajuste necessário (ORTEGA-RIVAS, 2012).

3.9 DISPOSITIVOS DE AUXÍLIO NO ESCOAMENTO

Apesar dos esforços para determinação da abertura de saída do funil, muitas vezes para garantir o funcionamento adequado do sistema de transporte de material é necessário combinar dispositivos que auxiliem no escoamento. Além disso, é comum o emprego de alimentadores, que também atuam no controle do fluxo de saída do silo (ORTEGA-RIVAS, 2012).

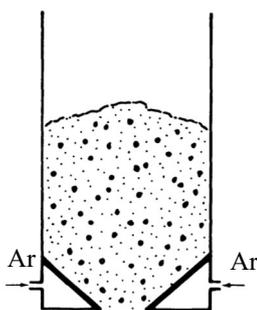
Os dispositivos utilizados atualmente são aprimoramentos tecnológicos de práticas como bater nas paredes dos silos ou liberar o material com algum tipo de haste. A classificação destes dispositivos varia entre os autores, sendo divididos entre passivos e ativos, a depender do emprego de energia, por Ortega-Rivas (2012). Já para Woodcock e Mason (1987), os dispositivos são classificados de acordo com a tecnologia empregada, sendo elas pneumática, vibracional ou mecânica.

Neste trabalho será empregada a divisão realizada por Woodcock e Mason (1987).

3.9.1 Dispositivos Pneumáticos

Os dispositivos pneumáticos atuam de duas formas diferentes. A primeira delas é realizar a aeração do material na saída do silo, reduzindo a fricção das partículas e parede do funil, conforme exemplificado na Figura 3.15. A outra maneira é manter um fluxo constante de ar passando pelo produto, minimizando os efeitos que o tempo de armazenamento pode gerar na compactação do pó (WOODCOCK & MASON, 1987).

Figura 3.15 – Dispositivo de Aeração



Fonte: Adaptado de Woodcock e Mason (1987).

Além disso, podem ser combinadas duas categorias de dispositivos para auxiliar no fluxo de saída do material. Tais aparatos consistem em almofadas infláveis, que agem mecanicamente no favorecimento do escoamento do material (WOODCOCK & MASON, 1987).

3.9.2 Dispositivos Vibracionais

São diversos os tipos de dispositivos vibracionais que constam no mercado, assim como a amplitude dos parâmetros a serem empregados, a depender das características do processo e dos resultados almejados. A frequência vibracional pode variar de 14 Hz a 1300 Hz e a amplitude de 0 a 60 mm (WOOCOCK & MASON, 1987).

A utilização de mecanismos vibracionais pode variar em sua aplicação. Alguns dispositivos causam vibração na parede do silo, enquanto outros tem o efeito direcionado diretamente para o material armazenado. É válido ressaltar que com o silo fechado, não é recomendado a aplicação de vibração e sim utilizar este mecanismo como auxílio no escoamento do material. Esta recomendação é devido aos efeitos observados no sólido, que tende a compactar com frequências muito baixas. Para frequências mais altas, o material pode dilatar ou compactar, variando de acordo com as características das partículas e amplitude empregada (WOODCOCK & MASON, 1987).

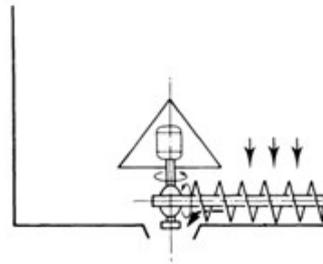
A redução do ângulo de fricção entre o sólido e a parede silo é um dos parâmetros mais importantes para garantir o escoamento adequado do material. Neste contexto, a aplicação de vibração no silo ajuda a reduzir a fricção com a parede, podendo alterar o padrão de fluxo de funil para fluxo mássico, reduzindo a ocorrência de caminhos preferenciais (ORTEGA-RIVAS, 2012).

3.9.3 Dispositivos Mecânicos

Os dispositivos mecânicos surgem do aprimoramento e minimização da intervenção humana nos silos, como a inserção de hastes no equipamento para reestabelecer o fluxo. Uma solução simples e utilizada para partículas maiores e materiais grosseiros, é a instalação de uma corrente que passa por dentro do silo. Dessa forma, quando o fluxo é interrompido pela ocorrência de arqueamento da massa de sólidos, por exemplo, a corrente é puxada para cima e o fluxo é reestabelecido.

O dispositivo parafuso exemplificado na Figura 3.16 é um exemplo de dispositivo mecânico amplamente utilizado.

Figura 3.16 – Dispositivo do tipo parafuso



Fonte: Adaptado de Woodcock e Mason (1987).

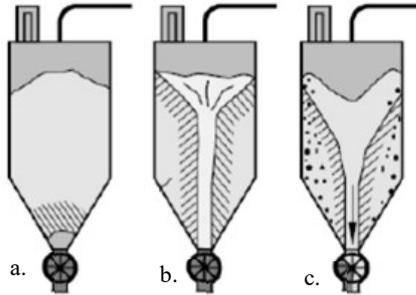
3.10 PROBLEMAS NO ESCOAMENTO

De acordo com Barbosa-Cánovas et al. (2005), existem quatro principais tipos de problemas observados no escoamento dos materiais. São eles:

- a) Caminhos Preferenciais ou “Buracos de Rato”: Neste fenômeno, observa-se que apenas o material acima da abertura do funil escoam, enquanto há formação de áreas mortas onde o material permanece estagnado;
- b) Arqueamento: O arqueamento consiste na formação de um arco estável de material que obstrui a saída do equipamento, impedindo a descarga de material. Para reestabelecer o fluxo, um aerador ou dispositivo vibracional pode ser necessário.
- c) Fluxo Errático: Este fenômeno consiste na combinação da formação de caminhos preferenciais e arqueamento. Isto pode acontecer quando se tenta eliminar os caminhos preferenciais e o material armazenado nas zonas mortas forma um arco de obstrução na saída do silo.
- d) Segregação: Em alguns materiais observa-se a segregação de partículas, principalmente entre partículas finas e grosseiras. Este fenômeno pode impactar na qualidade do produto e eficiência do processo.

A Figura 3.17 consiste em um resumo dos principais problemas observados no escoamento de pós.

Figura 3.17 – Problemas no escoamento de pós (a) arqueamento, (b) caminhos preferenciais e (c) segregação



Fonte: Adaptado de Lobato et al. (2014).

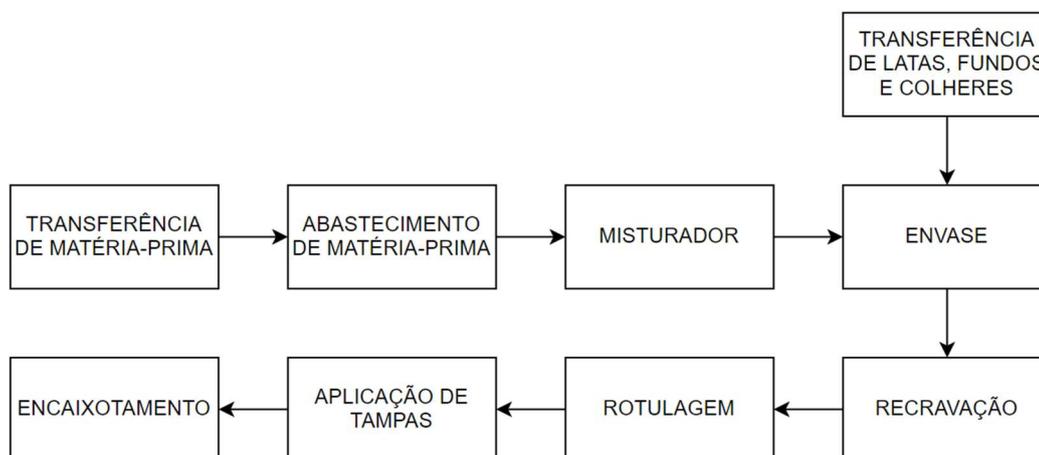
4 MATERIAIS E MÉTODOS

Este trabalho trata-se de um estudo de caso, baseado no processo de uma indústria de fórmulas infantis e suplementos em pó. A partir dos dados obtidos na indústria, realizou-se a aplicação da revisão teórica realizada a fim de analisar as condições do sistema de alimentação utilizado. Para fins de confidencialidade, a matéria-prima que será analisada o escoamento é denominada “A” neste trabalho.

4.1 PROCESSO

O processo estudado está descrito de forma simplificada no diagrama de blocos apresentado na Figura 4.1

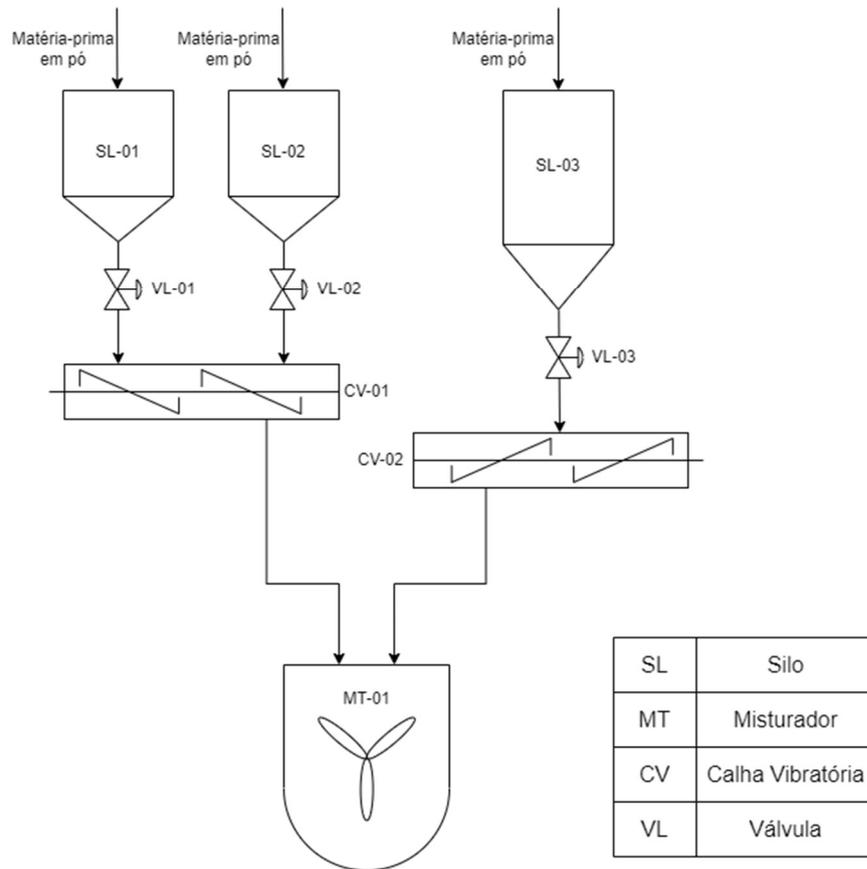
Figura 4.1 – Diagrama de blocos do processo



Fonte: Elaborado pelo autora.

Recentemente, o sistema abastecimento de matéria-prima foi modificado, com o objetivo de aumentar a eficiência operacional e a rotina dos membros da Operação. O sistema de alimentação do processo está descrito na Figura 4.2

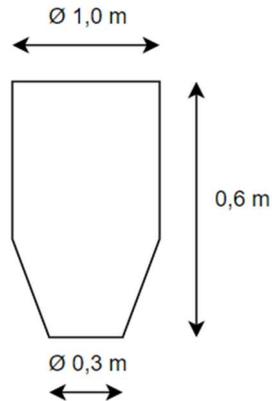
Figura 4.2 – Sistema de alimentação de matéria-prima e misturador



Fonte: Elaborado pelo autora.

Na condição primária, a matéria-prima denominada como A neste estudo era abastecida em um silo cilíndrico com funil cônico de 300 litros de capacidade (SL-01 e SL-02), construído em aço inoxidável. O silo possui 1,0 metro de diâmetro, 0,3 metros de abertura do funil, 0,6 metros de altura e 21° de meio ângulo do funil. Após o silo, o material era encaminhado para uma válvula de dosagem, conforme exemplificado na Figura 4.3. Em seguida, o material era destinado para uma calha vibratória, juntamente com o material dosado no SL-02.

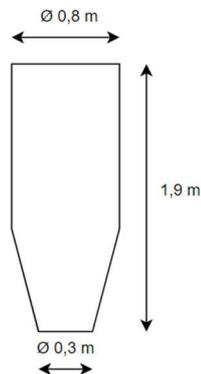
Figura 4.3 – Dimensões de SL-01 e SL-02.



Fonte: Elaborado pelo autora.

Na nova configuração, instalou-se uma nova estação para abastecimento da matéria-prima A (SL-03), também projetado em aço inoxidável. O novo silo também é cilíndrico e possui funil cônico, mas a capacidade ampliou-se para 930 litros. As dimensões do silo são 0,8 metros de diâmetro, 0,3 metros de abertura do funil, 1,9 metros de altura e 21° de meio ângulo do funil, conforme a Figura 4.4. Da mesma maneira que a configuração anterior, após a abertura do silo, o material é direcionado para uma válvula de dosagem e posteriormente a uma calha vibratória.

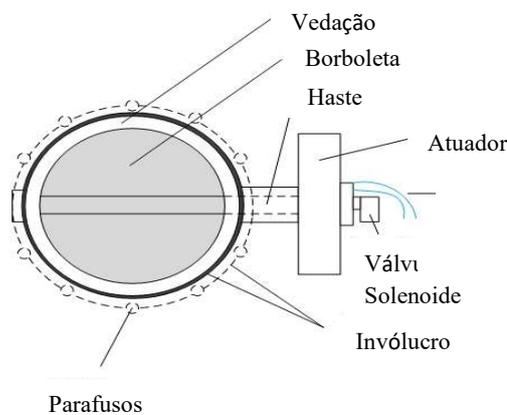
Figura 4.4 – Dimensões de SL-03



Fonte: Elaborado pelo autora.

Ambas as válvulas de dosagem utilizadas no processo são do tipo borboleta. As válvulas borboleta são amplamente utilizadas na indústria para controle de fluxo de materiais. As válvulas constituem de uma aba em forma de disco (borboleta) que gira para abrir e liberar a quantidade desejada de material. Desta forma, garante-se que a vazão adequada de matéria-prima seja encaminhada para o misturador. A Figura 4.5 constitui um exemplo de válvula borboleta.

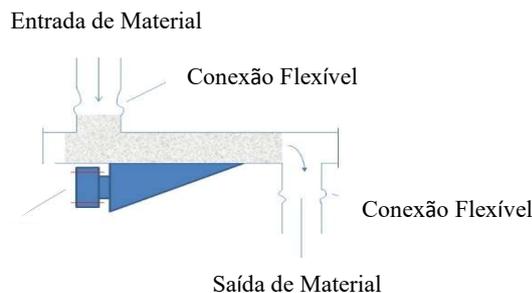
Figura 4.5 – Válvula Borboleta



Fonte: Adaptado de PowderProcess.net.

A calha vibratória consiste em um tubo fechado de aço inoxidável, que transporta o material particulado do silo até o misturador por meio da vibração, conforme exemplificado na Figura 4.6.

Figura 4.6 – Calha Vibratória



Fonte: Adaptado de PowderProcess.net

4.2 MATERIAL

A matéria-prima A consiste em um pó de coloração branca e densidade aparente de 850 kg/m³, de acordo com as especificações do fabricante. Este material é amplamente empregado em diversos setores e na indústria estudada atua como fonte de carboidratos nas fórmulas infantis e suplementos em pó.

De acordo com o fabricante, os silos foram projetados para materiais com as características sintetizadas no Quadro 4.1

Quadro 4.1 – Características dos materiais

Razão da pressão lateral (K')	0,45 – 0,60
Coefficiente de fricção da parede (μ')	0,25 – 0,40
Ângulo de Repouso	30° (para a horizontal)

Fonte: Dados obtidos do fornecedor.

Conforme o trabalho de Trpělková et al. (2019), para a matéria-prima A, o valor obtido para o ângulo efetivo de atrito interno foi de 20,3° e será utilizado neste trabalho para determinação de K'. Em relação ao coeficiente de fricção da parede, será utilizado nos cálculos o valor médio dos limites estipulados pelo fornecedor, isto é, 0,325.

Além disso, conforme Ketterhagen et al. (2009), é possível estimar o ângulo de atrito com a parede, de acordo com a Equação 4.1

$$\phi = \tan^{-1} \mu' \quad (4.1)$$

De acordo com os experimentos realizados por Leaper (2021), foi determinado a relação da tensão não confinada e a tensão máxima de consolidação do material de acordo com a Equação 4.2.

$$\sigma_c = 0,56\sigma_1^{0,7} \quad (4.2)$$

O Quadro 4.2 consiste no resumo das propriedades utilizadas para os cálculos.

Quadro 4.2 – Dados empregados nos cálculos

Densidade Aparente (ρ_b)	850 kg/m ³
Ângulo Efetivo de Atrito Interno (δ)	20,3 °
Coefficiente de fricção da parede (μ')	0,325

Fonte: Dados obtidos do fornecedor.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 PRESSÃO NO SILO

A pressão nos silos foi calculada de acordo com a Equação 3.1. Para isto, foram utilizadas as dimensões do silo e as propriedades do material, conforme descrito na seção 4.

Inicialmente, calculou-se a razão da pressão lateral (K'), a partir da Equação 3.2, obtendo-se o valor de 0,48. O valor condiz com os limites determinados pelo fornecedor, que não devem ultrapassar a faixa de 0,45 – 0,60. Além disso, como K' é o quociente entre a pressão vertical e horizontal, o valor próximo de 0,50 indica que a pressão é distribuída de maneira uniforme em ambos os sentidos.

Em seguida, utilizando-se o valor de K' , é possível calcular a pressão vertical em ambos os silos. A Tabela 5.1 contém os resultados obtidos. Para o silo de 300L será adotada a nomenclatura SL-01 e para o silo de 930L, SL-03.

Tabela 5.1 – Pressão vertical no silo

SILO	PRESSÃO VERTICAL
SL-01	4,17 kPa
SL-03	8,16 kPa

Fonte: Elaborado pelo autora.

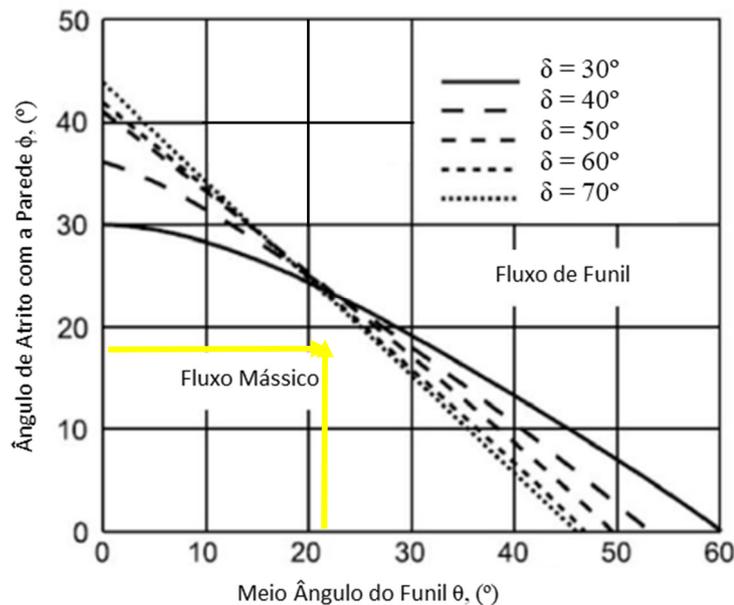
Nota-se que com o aumento do silo, a pressão vertical quase duplicou em comparação com a configuração anterior. Esta variação ocorre principalmente devido ao aumento da massa de sólidos proporcionada pela ampliação da altura do silo, exercendo pressão na abertura do funil.

5.2 PADRÃO DE FLUXO

Com o intuito de aferir o padrão de fluxo no silo, será utilizado os dados reais do silo. Desta forma, considerou-se o meio ângulo do funil (θ) como 21 °C e calculou-se o ângulo de atrito com a parede (ϕ) conforme a Equação 4.1, obtendo-se o valor de 18°.

Desta forma, conforme a Figura 5.1, determina-se o valor do ângulo de atrito com a parede.

Figura 5.1 – Determinação do padrão de fluxo no silo



Fonte: Adaptado de Safranyik (2013)

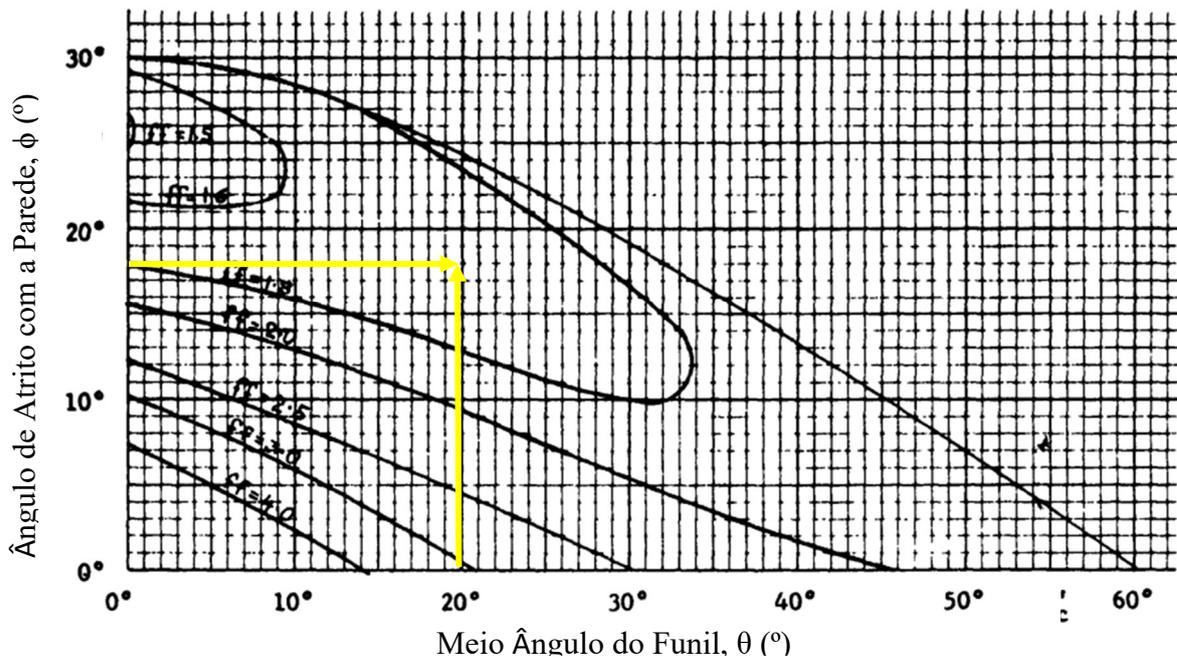
Desta forma, conclui-se que o padrão de fluxo obtido no silo para o material A será do tipo fluxo mássico. Como ambos os silos possuem o mesmo valor de meio ângulo do funil, o resultado é o mesmo para ambos os casos. Sendo assim, espera-se um fluxo uniforme e de fácil controle no escoamento deste material.

5.3 FATOR DE FLUXO

Utilizando o valor do ângulo de atrito com a parede e meio ângulo de funil, é possível determinar o fator de fluxo (ff) utilizando a Figura 5.2, que fornece valores de ff para $\delta = 30^\circ$.

Conforme discutido na seção anterior, o ângulo efetivo de atrito interno do material A é $20,3^\circ$. No entanto, não há registros de curvas para determinação do padrão de fluxo para este valor. Dessa forma, utilizou-se as curvas para $\delta = 30^\circ$. A aproximação dos dados é satisfatória com a finalidade de obter-se uma percepção inicial do comportamento do fluxo.

Figura 5.2 – Fator de fluxo para funil cônico e $\delta = 30^\circ$



Fonte: Adaptado de Jenike (1964).

Dessa forma, conclui-se que $ff = 1,8$ para ambos os silos analisados, devido a permanência do meio ângulo de funil. Além disso, utilizou-se a correlação apresentada na Tabela 3.2 para averiguar a acuracidade do resultado obtido graficamente. Para $\delta = 30^\circ$, obteve-se que $ff = 1,85$.

Comparando o resultado obtido com a Tabela 3.1, conclui-se que o material não esco sem força externa, pois $ff < 2,0$ e, portanto, o comportamento é coesivo. Neste contexto, na

indústria estudada observa-se a presença de aeradores instalados na parede dos silos, que injetam ar comprimido diretamente no material, possibilitando que o fluxo seja estabelecido.

5.4 FATOR DE FLUXO REAL

Para o cálculo do fator de fluxo real (ff_a) é necessário determinar o valor da tensão de consolidação para o valor real da abertura do silo. Desta forma, a partir da Equação (3.3) e considerando a aceleração como zero, obtém-se a Equação 5.1

$$\sigma_1 = \frac{\rho_b g B}{H(\theta)} \quad (5.1)$$

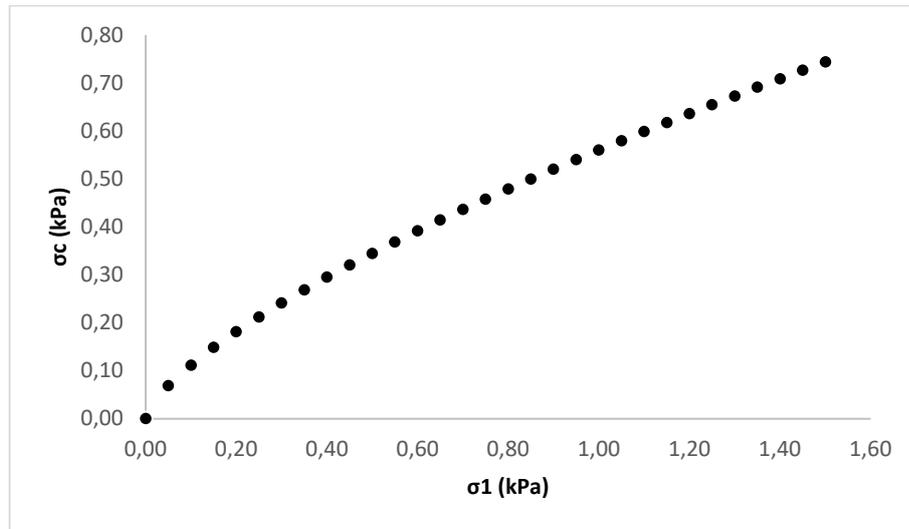
Desta forma, determina-se σ_1 igual a 1,042 kPa para ρ_b de 850 kg/m³, g igual a 9,81 m/s², B igual a 0,30 m e H(θ) de 2,4 por se tratar de funil cônico.

Então, utilizando a Equação 4.1 é possível determinar a tensão não confinada, obtendo-se o resultado de 0,576 kPa. Sendo assim, calcula-se ff_a aplicando a Equação 3.6 e conclui-se que ff_a igual a 1,81. A proximidade nos valores de ff e ff_a indica que o valor da abertura real do silo é similar a abertura mínima.

5.5 FUNÇÃO DE FALHA

Para determinação da função de falha (FF), inicialmente plotou-se um gráfico entre tensão não confinada e tensão de consolidação do material a partir da Equação 4.1. O resultado obtido está apresentado Figura 5.3, utilizando-se valores arbitrários de tensão principal de consolidação, variando de 0 a 1,5 kPa.

Figura 5.3 – Tensão não confinada em função da tensão de consolidação



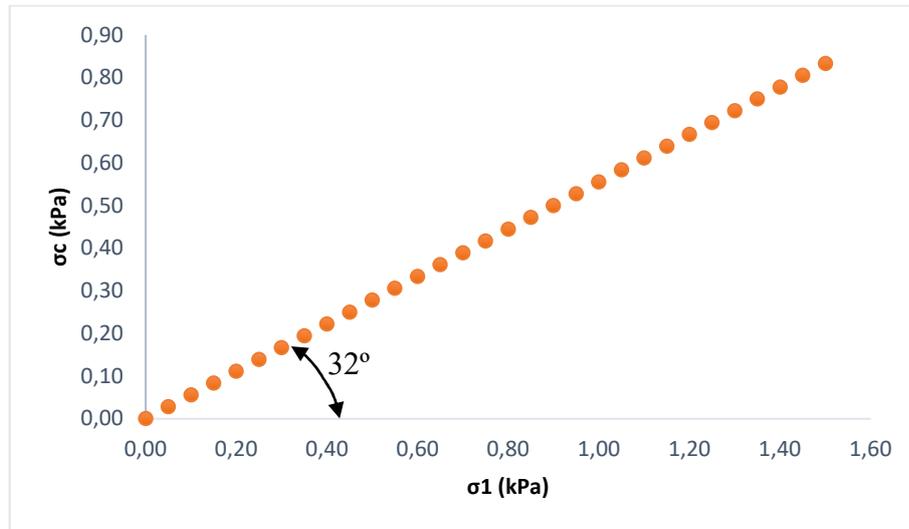
Fonte: Elaborado pelo autora.

Além disso, conforme determinado na sessão anterior, o fator de fluxo (ff) possui valor de 1,8. O inverso do fator de fluxo corresponde a 0,56 radianos ou 32°. Esta é a inclinação correspondente da reta a ser traçada para determinação da Função de Falha (FF). Desta forma, estabeleceu-se a Equação 5.2.

$$\sigma_c = 0,56\sigma_1 \quad (5.2)$$

Desta maneira, para os mesmos valores de tensão máxima de consolidação utilizados no gráfico da Figura 5.3, plotou-se a reta da Função de Falha conforme exposto na Figura 5.3.

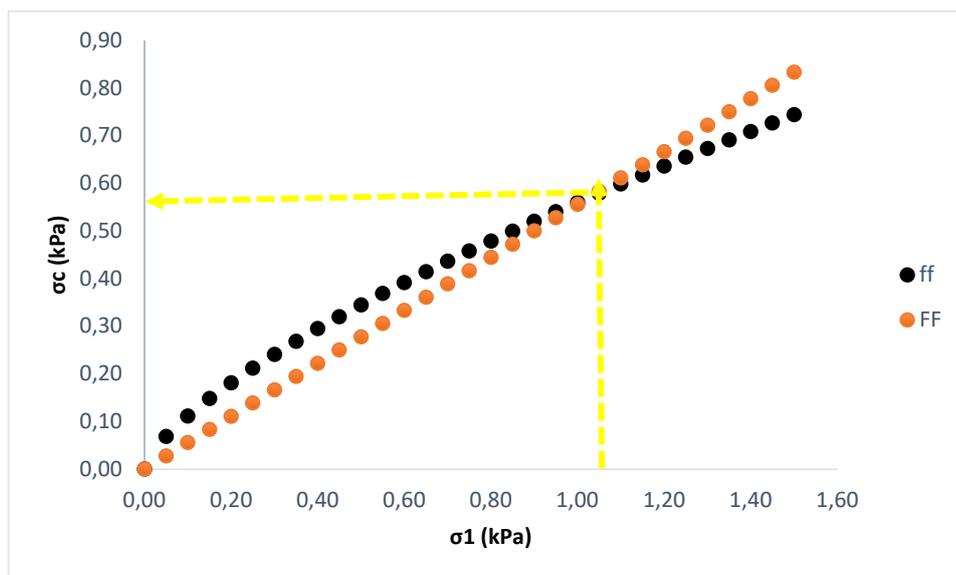
Figura 5.3 – Função de Falha (FF)



Fonte: Elaborado pelo autora.

Então, é possível plotar ambas as funções em um único gráfico, com o intuito de determinar $\bar{\sigma}_1$, a tensão crítica. Esta tensão é obtida ao determinar o local de interseção das funções, conforme indicado na Figura 5.4.

Figura 5.4 – Determinação da tensão crítica



Fonte: Elaborado pelo autora.

Desta maneira, conclui-se que a tensão crítica ($\overline{\sigma}_1$) é aproximadamente 0,58 kPa, ou seja, esta é a tensão mínima necessária para que o material escoe.

5.6 ABERTURA MÍNIMA DO FUNIL

Para determinar a abertura mínima do funil para que não haja formação de arco no material, utilizou-se a Equação 3.4. Como ambos os silos analisados possuem o mesmo perfil de funil cônico, utilizou-se o valor de $H(\theta)$ igual a 2,4 conforme recomendado na literatura. Para a densidade aparente, utilizou-se o valor fornecido pelo fornecedor de 850 kg/m^3 e para a aceleração da gravidade adotou-se o valor de $9,81 \text{ m/s}^2$.

Desta maneira, foi possível calcular a abertura mínima do funil (B_{\min}) como 16,7 cm. Como fisicamente os silos instalados na indústria possuem 30 cm, conclui-se que não haverá arqueamento do material A em ambos os silos.

5.7 VELOCIDADE E VAZÃO DO ESCOAMENTO

A velocidade de escoamento do material é calculada a partir da Equação 3.7 e está diretamente relacionada com a vazão. Como a abertura de ambos os silos são iguais, conclui-se que será observado a mesma velocidade no escoamento. Além disso, a constante m possui o valor de 1 devido ao formato cônico dos funis. Neste contexto, substitui-se os valores de B igual a 30 cm, θ igual a 21° , ff igual a 1,8 e ff_a igual a 1,81 e determina-se que a velocidade de escoamento (V_a) é de 0,103 m/s.

Na sequência, calculou-se a vazão de escoamento (Q_0) de acordo com a Equação 3.8. Manteve-se o valor de m igual a 1, a densidade aparente de 850 kg/m^3 e o resultado obtido foi de 6,18 kg/s. A vazão obtida é superior a requerida nas demandas da indústria, variando de acordo com o produto. Isto justifica a utilização de válvulas de dosagem para garantir que a quantidade adequada de material chegue até o misturador. Além disso, são utilizados outros materiais no sistema de alimentação estudado, que podem requerer a vazão calculada.

Conclui-se que apesar do aumento no volume do silo, estruturalmente a principal mudança realizada foi na altura, mantendo-se o diâmetro de saída do funil. Desta forma, parâmetros como velocidade e vazão de escoamento não sofrem alterações.

Na Tabela 5.2 estão dispostos os resultados numéricos obtidos durante este trabalho.

Tabela 5.2 – Compilado dos resultados

PARÂMETRO	VALOR
Razão da Pressão Lateral (K')	0,48
Pressão Vertical – SL-01	4,17 kPa
Pressão Vertical – SL-03	8,16 kPa
Ângulo de Fricção com a Parede (ϕ)	18°
Fator de Fluxo (ff)	1,8
Fator de Fluxo Real (ff_a)	1,81
Tensão Crítica ($\overline{\sigma_1}$)	0,58 kPa
Abertura mínima do funil (B_{min})	16,7 cm
Velocidade de escoamento (V_a)	0,103 m/s
Vazão (Q_0)	6,18 kg/s

Fonte: Elaborado pela autora.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir dos resultados obtidos, é possível concluir que a principal mudança observada nos parâmetros com a mudança da capacidade do silo está relacionada a pressão vertical. Isto ocorre devido a alteração na altura do silo, que impacta diretamente na quantidade de material que pode ser armazenado e conseqüentemente exercer pressão na saída do funil.

A permanência das demais características está relacionada ao fato de o novo silo instalado manter as principais características estruturais do silo anterior, como a abertura e meio ângulo do funil. Desta forma, características como vazão e velocidade de escoamento permanecem inalteradas.

No entanto, é válido ressaltar a importância no aumento da capacidade do silo no que tange ao aumento no pulmão de matéria-prima na linha de produção. Com a maior capacidade de armazenagem, estabelece-se um tempo de resposta maior no caso de falhas no abastecimento de matéria-prima, evitando paradas de linha e aumentando a eficiência operacional. Além disso, com o aumento da capacidade do silo, é possível utilizar sacarias de maior tamanho do que as utilizadas atualmente, que variam entre 20 e 25 kg. Dessa forma, otimiza-se a rotina do Operador, pois sacarias maiores são abastecidas mecanicamente via talha elétricas, sem a necessidade do abastecimento manual. Além disso, com a menor interferência humana no processo de abastecimento de matéria-prima, são reduzidas as chances de contaminação no produto. Devido ao caso estudado tratar-se de uma fábrica de fórmulas infantis, a qualidade do produto é de alta criticidade e os riscos de contaminação devem ser reduzidos ou eliminados.

Além disso, é válido ressaltar que a matéria-prima utilizada para este trabalho é obtida de diferentes fornecedores. Neste contexto, as especificações exigidas pela indústria obedecem a limites pré-determinados e então podem variar entre diferentes lotes. Além disso, são abastecidas outras matérias-primas no sistema de alimentação, com diferentes propriedades. Desta forma, para futuros trabalhos, o estudo da impacto das características dos diferentes materiais e capacidade de sistema de alimentação de suportar as diferentes condições podem trazer conclusões de grande valia.

Dessa forma, conclui-se que o novo silo instalado está corretamente dimensionado perante os parâmetros analisados e sua operação deve seguir sem desvios.

REFERÊNCIAS

- BARBOSA-CÁNOVAS, Gustavo V. et al. Food Powders: Physical Properties, Processing and Functionality. New York. Kluwer Academic/Plenum Publishers, 2005.
- BHANDARI, Bhesh et al. Handbook of Food Powders: Processes and Properties. Cambridge. Woodhead Publishing Limited, 2013.
- CAMPOS, Milene M. Análise da Escoabilidade de Pós. Tese (Mestrado em Engenharia Química) – Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal de São Carlos. São Carlos, p. 129. 2012.
- FILHO, Amilton B. S. Efeito da Rugosidade no Escoamento em Passagem de Minério. Tese (Mestrado em Engenharia Mineral) – Departamento de Engenharia de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, p. 139. 2008.
- JENIKE, Andrew W. Storage and Flow of Solids. Bulletin nº 123 of the Utah Engineering Experiment Station, University of Utah. Salt Lake City. 1964.
- LEAPER, Mark Christopher. Measuring the Flow Functions of Pharmaceutical Powders Using the Brookfield Powder Flow Tester and Freeman FT4. Processes 2021, 9, 2032.
- LOBATO, J. C. M.; MESQUITA, A. L. A.; MESQUITA, A. L. A. Caracterização das Propriedades de Fluxo da Lama Vermelha Para Fins de Dimensionamento de Silos: Aplicação Para Tremonhas Cônicas. VII Congresso Nacional de Engenharia Mecânica. São Luís. 2012.
- LOBATO, J. C. M.; MESQUITA, A. L. A.; MESQUITA, A. L. A. Conical Hopper Design for Mass Flow: Case of Study for Red Mud Powder. 15th Brazilian Congress of Thermal Sciences and Engineering. Belém do Pará. 2014.
- MASCARENHAS, F.P.; MESQUITA, A.L.A.; MESQUITA, A.L.A. Identificação de propriedades de fluxo do caulim e dimensionamento de tremonha de silo para fluxo mássico. Revista Matéria, v.22, n.4, 2017.
- OKO, C.O.C.; DIEMUODEKE, E.O.; AKILANDE, I.S. Design of hoppers using spreadsheet. Res. Agr. Eng., 56: 53–58. 2010.
- ORTEGA-RIVAS, Enrique. Unit Operations of Particulate Solids: Theory and Practice. Boca Raton. CRC Press, 2012.

PowderProcess.net. Engineering Resources. Butterfly Valve for Bulk and Powder Process: a complete guide. Disponível em: https://powderprocess.net/Equipments%20html/Butterfly_valve.html. Acesso em 15 de fevereiro de 2023.

PowderProcess.net. Engineering Resources. Vibrating conveyors design overview. Disponível em: https://powderprocess.net/Equipments%20html/Vibrating_Tube.html. Acesso em 15 de fevereiro de 2023.

TRPELKOVÁ, Zofie et al. Predicting the Angle of Internal Friction from Simple Dynamic Consolidation Using Lactose Grades as Model. Article in Journal of Pharmaceutical Innovation. Springer Science + Business Media, LLC. 2019.

SAFRANYIK, F.; OLDAL, I. 3D Discrete Element Model of Silo Discharge. Scientific Journal AGRICULTURAL ENGINEERING. Year XXXVIII No. 2, 2013. pp: 23 – 34. University of Belgrade.

WOODCOCK, C. R.; MASON, J. S. Bulk Solids Handling: An Introduction to the Practice and Technology. New York. Springer Science + Business Media, LLC. 1987.