

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

THALES ROSADO PINHEIRO DE ALMEIDA

ESTUDO DA VIABILIDADE DE APLICAÇÃO DO
TRANSPORTE PNEUMÁTICO PARA
ABASTECIMENTO DE SULFATO DE SÓDIO EM
INDÚSTRIA DE FIBRA DE VIDRO

SÃO CARLOS – SP
2021

THALES ROSADO PINHEIRO DE ALMEIDA

ESTUDO DA VIABILIDADE DE APLICAÇÃO DO TRANSPORTE PNEUMÁTICO
PARA ABASTECIMENTO DE SULFATO DE SÓDIO EM INDÚSTRIA DE FIBRA DE
VIDRO

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. Rodrigo Béttega

São Carlos - SP
2021

AGRADECIMENTO

Agradeço aos meus pais, Kelly e Renato, que nunca mediram esforços para garantir educação aos seus filhos.

Agradeço aos meus amigos, Gabriel e Lucas, conselheiros nas decisões mais difíceis.

Agradeço aos meus colegas de faculdade, em especial ao Matheus, Thales e Helena, por trilharem comigo essa longa aventura.

Agradeço ao meu irmão, Thiago, por não me deixar esquecer das minhas raízes.

Agradeço ao meu orientador de estágio, Gustavo, pelas oportunidades.

Agradeço aos meus professores, pelos aprendizados.

E agradeço a Isabella, por iluminar todos os meus dias.

RESUMO

Com o avanço tecnológico, a variedade de maneiras com que é feito o transporte de materiais sólidos particulados de um ponto ao outro mudou vertiginosamente, com medidas mais focadas e eficientes, reduzindo principalmente as perdas inerentes ao processo de transporte. Este trabalho objetivou a análise de viabilidade de aplicação de um novo processo de abastecimento de matéria-prima numa indústria que produz fibra de vidro, considerando aspectos como o risco associados a trabalhos em altura, custo energético de um nova solução e custos de implantação. Para tal fim, analisou-se a alimentação do sulfato na indústria praticada atualmente e buscou-se propor a implantação de um equipamento que envie o material até seu silo designado considerando implementos e soluções disponíveis na empresa. Duas propostas foram analisadas em aspectos de segurança e de custos, envolvendo fatores operacionais, custos com utilidades e custos com manutenção: a realocação de um vaso de pressão existente na planta, e o comissionamento e instalação de uma bomba de diafragma adaptada para transporte de sólidos. Em relação aos custos, a situação atual teve uma estimativa de 198,25 R\$/mês, enquanto as propostas tiveram, respectivamente, uma projeção de 102,86 R\$/mês e 90,16 R\$/mês. Já em segurança, baseada numa análise de risco semiquantitativa das atividades, a situação atual teve uma pontuação de risco de 440, o vaso de pressão de 275, e a bomba de diafragma de 110, sendo a única a pertencer na faixa de risco cuja ações futuras não são mais necessárias. Com a análise concluída, a bomba de diafragma foi a alternativa que se mostrou mais viável, considerando principalmente os benefícios de segurança que a mesma traz em relação as alternativas.

Palavras-chave: Transporte Pneumático. Bomba de Diafragma Operada Por Ar. Análise de Segurança. Vaso de Pressão.

ABSTRACT

Technology advances changed the way we approach fine powder loading within the industry. Efficient and focused on problem-solving, these solutions drastically reduced losses in industry activities. The purpose of this project is to investigate new solutions for sodium sulfate loading in a fiberglass plant, assessing safety, utilities, installation, maintenance, and operational impacts. Studies regarding modern sodium sulfate loading led to two scopes, structured for further understanding. One of them is an air-operated diaphragm pump, modified for fine powder pumping, while the other is a reallocation of an inactive blow tank. Each scope was analyzed concerning safety risks, start-up costs, and monthly expenses. Costs related to the initial situation were estimated in 198,25 R\$/month, while the blow tank proposition had an projected cost of 102,86 R\$/month and the AODD pump, 90,16 R\$/month. Safety was handled by risk based process safety guidelines, whose results for risk managing was 440 for current sodium sulfate loading, 275 for the blow tank operation, and 110 in an AODD pump activity, the only one that requires no further action to mitigate risks. In the end, the AODD pump was chosen as the most viable, mainly because of its safety benefits.

Keywords: Pneumatic Conveying. Air-operated Diaphragm Pump. Safety Analysis. Blow Tank.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Esquemática de um transportador de correias.....	11
Figura 2 – Esquemática de um transportador de caçambas	12
Figura 3 – Esquemática de um transportador helicoidal	13
Figura 4 – Esquemática de uma bomba rotativa (de engrenagem).....	17
Figura 5 – Esquemática de uma bomba de diafragma dupla operada por ar.....	18
Figura 6 – Detalhe da adaptação necessária numa bomba AODD para transporte de sólidos	19
Figura 7 – Processo de descarregamento do sulfato de sódio.....	23
Figura 8 – Vaso de pressão proposto para instalação no local	25
Figura 9 – Local proposto para instalação do vaso de pressão	26
Figura 10 – Bomba AODD proposta para instalação no local	28
Figura 11 – <i>Mock-up</i> da tubulação dos sistemas propostos	29
Figura 12 – Diagrama de Moody para escolha do fator de atrito.....	37
Figura 13 – Curva característica da bomba AODD	44

LISTA DE TABELAS E QUADROS

Tabela 1 – Pontuação de risco para a efetividade do controle da atividade	31
Tabela 2 – Pontuação de risco para a frequência de exposição da atividade.....	32
Tabela 3 – Pontuação de risco para a severidade da atividade.....	32
Tabela 4 – Categorias de risco e estados da atividade em função da pontuação.....	32
Tabela 5 – Resumo dos resultados da avaliação de segurança	40
Tabela 6 – Resumo dos resultados da análise de custo	50

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	8
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	10
2.1 TRANSPORTE DE SÓLIDOS	10
2.1.1 Carregadores	10
2.1.2 Arrastadores	12
2.1.3 Pneumáticos	13
2.2 SULFATO DE SÓDIO	15
2.3 BOMBA DE DIAFRAGMA DUPLA OPERADA POR AR (AODD)	16
2.4 SEGURANÇA NO TRABALHO	20
3 ANÁLISE NO TRANSPORTE DE SULFATO DE SÓDIO	22
3.1 DESCRIÇÃO DO PROBLEMA	22
3.2 PROPOSTAS DE SOLUÇÃO	24
3.2.1 Vaso de pressão	24
3.2.2 Bomba de diafragma dupla operada por ar	27
4 MATERIAIS E MÉTODOS	30
4.1 ANÁLISE DE SEGURANÇA	30
4.2 ANÁLISE DE CUSTO	33
4.2.1 Custos de implementação	34
4.2.2 Custos de manutenção	34
4.2.3 Custos de utilidades	34
4.2.3.1 Balanço de energia	35
4.2.4 Custos operacionais	38
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	39
5.1 ANÁLISE DE SEGURANÇA	39
5.2 ANÁLISE DE CUSTO	40
5.2.1 Custos de implementação	40
5.2.2 Custos de manutenção	41
5.2.3 Custos de utilidades	43
5.2.3.1 Balanço de energia	45
5.2.4 Custos operacionais	48
5.3 ANÁLISE FINAL	49
6 CONCLUSÃO	51
REFERÊNCIAS	52

1 INTRODUÇÃO

A fibra de vidro é um material resistente, não condutivo, pouco reativo e utilizado em diversas aplicações, visto que os diversos filamentos podem ser moldáveis dependendo da aplicação necessária, e até tecidos e isolantes térmicos podem ser confeccionados desse material.

O primeiro processo industrial de fibra de vidro foi descoberto acidentalmente em 1932, em que jatos de ar comprimido transpassaram vidro derretido, formando diversas fibras no processo (SLAYTER, 1933). As empresas de vidro Owens-Illinois e Corning Inc., focadas em desenvolvimentos de outras tecnologias com a matéria prima e muito afetadas pela lei seca da década de 20 nos Estados Unidos, criaram a Owens-Corning, uma empresa focada na produção e pesquisa de aplicações e manufatura de fibra de vidro.

Dentre os fatores significativos que impactam na fibra de vidro resultante do processo, o tipo de vidro utilizado fornece as características mecânicas desejadas para o produto final: sua resistência à tração, resistência a compressão, densidade, entre outras. Portanto, o primeiro passo de toda confecção de fibra de vidro é definir a composição do vidro que será aquecido à 500°C para a formação dos filamentos da fibra, e como a logística desses diversos minérios será distribuída.

Numa empresa que fabrica fibra de vidro, a atividade de abastecimento de sulfato de sódio, um dos minérios que compõem o vidro, envolve a utilização de empilhadeiras e a proximidade do operador de um vão de 13 metros, características que pontuam tal atividade como arriscada no quesito de segurança.

Com o intuito de continuamente mitigar os riscos a atividades rotineiras atreladas ao operador, um projeto foi mapeado para que a atividade seja substituída, e um equipamento que possa enviar o material até seu silo designado será implementado, juntamente com toda a infraestrutura necessária para o seu funcionamento.

Feita a pesquisa inicial, duas alternativas se propuseram como viáveis para a substituição da atividade: a realocação de um vaso de pressão desativado, ou a aquisição e instalação de uma bomba de diafragma adaptada para se tornar um transportador pneumático, capaz de bombear a matéria-prima.

Assim, o objetivo do estudo foi analisar a viabilidade entre duas opções tecnológicas para o transporte de sulfato de sódio numa aplicação industrial. As

características de cada um dos processos escolhidos foram comparadas, considerando os fatores como segurança, custos, balanço de energia, rotina de manutenção e operação.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 TRANSPORTE DE SÓLIDOS

As operações unitárias, termo cunhado por A. Little em 1915, reorganizam os diferentes processos industriais não em sua área de aplicação, mas em operações baseadas em princípios científicos semelhantes, possibilitando os seus estudos de forma eficiente. Por exemplo, os embasamentos técnicos relacionados ao projeto de um destilador são similares independentes de sua aplicação final, seja na indústria sucroalcooleira, petrolífera ou farmacêutica. A técnica necessária para utilizá-los é objeto da estequiometria industrial e inclui a prática de balanço materiais, balanço de energia, relações de equilíbrio e equações de velocidade (GOMIDE, 1983).

Dentre as diversas operações unitárias, naquelas com o foco no transporte de sólidos devem ser considerados diversos fatores para atingir o objetivo de transportar matéria de um ponto a outro, como a natureza do material (tanto propriedades físico-químicas quanto características do pó), distância e nível entre o começo e o fim da operação, a quantidade de material a ser transportado e os fatores econômicos envolvidos no projeto. Nessas soluções, as tecnologias utilizadas para o transporte de sólidos geralmente são de caráter mecânico (com motores) ou por gradiente de pressão (hidráulico e pneumático).

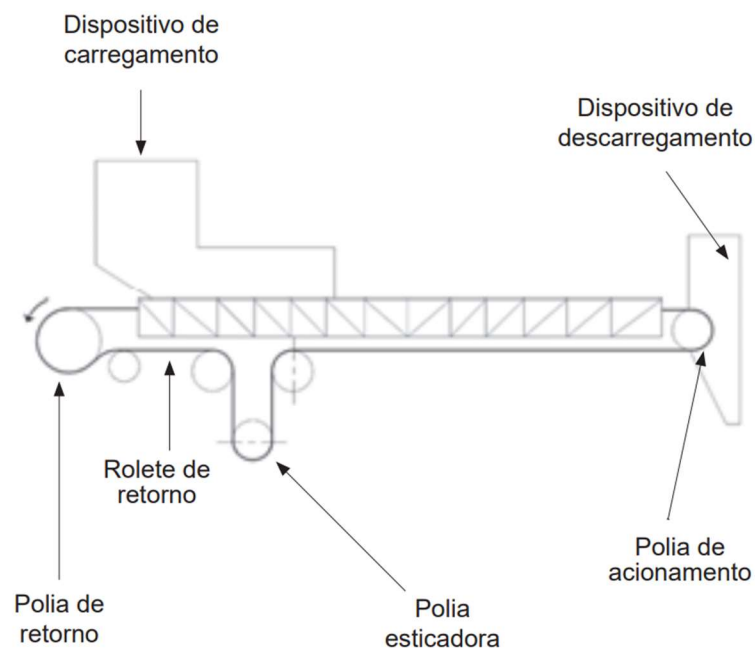
Os equipamentos fixos são aqueles implementados para a quantidade e especificidade demandada pelos processos químicos numa operação unitária, enquanto os móveis (transportadores) auxiliam a planta química no remanejamento organizacional e produtivo de cargas.

2.1.1 Carregadores

O transporte de sólido por carregadores é definido como aquele cujo transporte ocorre sobre superfícies ou dentro de tubos, levando-o de um lugar ao outro.

No transporte de correias e esteiras, esquematizados na Figura 1, o material é levado de um ponto a outro por uma correia sem fim ou por esteiras com padrões cuja utilização permite o transporte de materiais mais pesados, abrasivos e quentes, ambas suportadas por roletes que deixam o suporte do sólido continuar apoiado.

Figura 1 – Esquemática de um transportador de correias



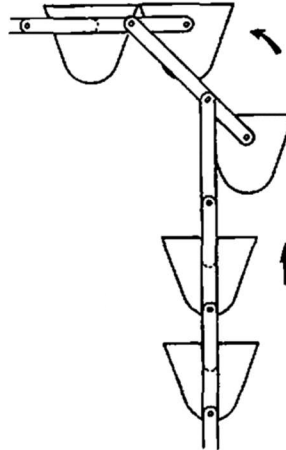
Fonte: Adaptado de ELETROBRAS et al, 2009.

Nas correias, tambores livres, geralmente localizados em cada extremidade, servem como a força motriz do equipamento, que, juntamente com o ângulo de inclinação, largura da correia e velocidade desejada, definem o transporte a ser utilizado, comumente operados entre 0,5 a 3 m/s. Já as esteiras, utilizando-se de trilhos, possui um custo reduzido em relação as correias, embora projetado para velocidades muito menores (5 a 10 m/min) (GOMIDE, 1983).

Outros transportes carregadores são os de caçambas, unidades sequenciais suspensas em trilhos, implementados como roldanas com cabos de aço, que podem levar o material em grandes distâncias, se beneficiando de processos que utilizam de seu formato para que outras operações unitárias possam ocorrer nas próprias caçambas, como em aplicações envolvendo minérios.

As vantagens do transporte de caçamba, representado pela Figura 2, incluem a possibilidade de elevar o material, fazendo o transporte vertical do mesmo. Porém, o transporte carregador mais utilizado como elevador é o de canecas, uma união das correias verticais com caçambas que elevam os sólidos a alturas de até 100 metros. As dificuldades de projeto de tal equipamento são as velocidades, as posições e quantidades de canecas, e a potência utilizada.

Figura 2 – Esquemática de um transportador de caçambas



Fonte: Adaptado de GOMIDE, 1983.

Além das possibilidades apresentadas, outra alternativa é a utilização de um transporte vibratório, que utilizam equipamentos vibratórios no inferior de uma calha horizontal para movimentar sólidos de fácil escoamento, e o transporte por gravidade, cujo ângulo de inclinação é a única força responsável por movimentar o produto. Em situações que as partículas se aceleram de maneira excessiva, barras transversais, curvas, ou seções com a inclinação reduzida são implementadas para garantir as características desejadas na descarga do material.

2.1.2 Arrastadores

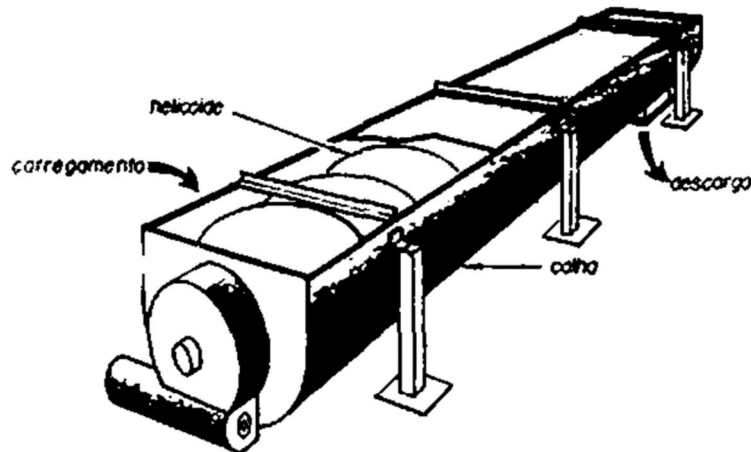
Nos transportes por arrastadores, o material é “empurrado”, ao invés de repousar sobre uma superfície que se movimenta. Embora esse método promova equipamentos mais econômicos, o custo de manutenção é elevado, visto que o desgaste sofrido é maior.

O primeiro tipo de transporte por arrastadores é o de calha, em que raspadores arrastam o material depositado numa calha de aço ou madeira. Com um custo de instalação bem econômico, o transporte por calhas é recomendado em situações de curtas distâncias, mas com uma inclinação significativa (até 45°).

Porém, o mais versátil dos arrastadores é o helicoidal (ou rosca sem fim), mostrado na Figura 3, em que o equipamento pode operar com a tampa aberta ou totalmente enclausurado. Com a tampa aberta, é possível a interação com diversos outros processos (lavagem, resfriamento, mistura, etc.), e fechado, são utilizados como elevadores (até 12 m). Geralmente utilizados em curtas distâncias, o helicóide

utilizado pode tomar diversas formas, dependendo do sólido utilizado. Outra vantagem do equipamento é a flexibilidade de ponto de carga/descarga. Caso a carga seja no meio do equipamento, ele opera em direções opostas, possuindo dois pontos de descarga. (GOMIDE, 1983).

Figura 3 – Esquemática de um transportador helicoidal



Fonte: Adaptado de GOMIDE, 1983.

2.1.3 Pneumáticos

No transporte pneumático, um sistema é implementado para que o sólido, caracterizados como materiais finos de granulometria que variam de 0,1 até 10mm, se fluidize ou seja aerado pelo gás, e escoe pelo interior de uma tubulação. Grandes distâncias podem ser atingidas com esse método, e diversas considerações em função de sua carga e descarga precisam ser levadas em consideração para uma operação eficiente

O transporte pneumático pode ser categorizado como contínuo, com o emprego de ventiladores centrífugos, ou em ciclos, utilizando sopradores de deslocamento positivo ou compressores recíprocos, em que o material é aerado em pequenas partes, preferível em materiais com alta densidade. Outra categorização é sobre a pressão do sistema, que pode operar a pressões altas (acima de 2 bar), preferível em configurações que precisam do abastecimento em pressões elevadas, ou em longas distâncias; em pressões baixas, que possibilitam um controle melhor de operação; e em vácuo, que pode ser a solução ideal para materiais com propriedades críticas.

Por fim, alguns sistemas podem se diferenciar por como o material será transportado dentro da tubulação, seja de forma diluída (*dilute phase*), forma densa

(*dense phase*) ou de maneira híbrida. Diferentes sistemas são projetados para atingirem os resultados requeridos, as características do produto e a eficiência do sistema pode alterar drasticamente entre o tipo de transporte pneumático escolhido. Em todos os sistemas, o processo pode trabalhar de forma pressurizada, atingindo distâncias maiores com uma menor velocidade, ou a vácuo, trabalhando com distâncias pequenas, mas com risco reduzido de entupimento, pois o empacotamento dos materiais na linha pode ocorrer por falhas de processo, grumos, densidade do material incorreta, entre outros. Os equipamentos na forma diluída mais comuns são também contínuos enquanto os em forma densa geralmente são em ciclos, mas diversas opções, incluindo operações híbridas, tem suas características mescladas entre as diferentes categorizações.

A forma diluída geralmente é utilizada para materiais que não são abrasivos, não são frágeis, e que não alteram suas características físicas em alta velocidade, pois considera o sólido, geralmente com densidades menores, diluído no ar, tratando-os como um só fluido sendo transportado pela tubulação. Seu princípio de funcionamento envolve o uso de exaustores, e sua implementação é mais barata e necessita de um espaço físico reduzido em relação a outras alternativas. Outra vantagem de se transportar na forma diluída é o contato reduzido do pó com a tubulação, preferível em situações com incompatibilidades químicas ou materiais tóxicos.

Sistemas pneumáticos com o material sendo enviado de forma densa naturalmente trabalham com velocidades reduzidas, podendo se caracterizar de diferentes formas: aerado com o ar em operação, de forma pulsada com pacotes de ar entre os ciclos do material, e até, em algumas situações, preenchendo totalmente a tubulação. É utilizada para materiais que possam ser danificados se transportados em alta velocidade, ou para quantidades que tornariam o projeto na forma diluída difícil de ser executado.

Uma família dos equipamentos de transporte pneumáticos, muito implementados na indústria, são os vasos de pressão. Eles são implementados para aplicações que, geralmente, necessitam de pressões elevadas, seja pela distância grande que o material precisa percorrer, pela quantidade de material enviada, ou pelas características intrínsecas do material sendo transportado. O procedimento de operação envolve ciclos, em que o vaso é carregado, pressurizado, o transporte do material ocorre, o vaso é despressurizado, e a carga é feita novamente. As

categorizações dos vasos pneumáticos podem ser feitas pela posição da descarga (por cima ou por baixo); se um ou mais vasos estão trabalhando de forma sincronizada para diminuir os ciclos de abastecimento; e se o vaso opera de forma contínua, ou faz somente um ciclo, rotineiramente carregando uma grande quantidade de material (MILLS, 2016).

2.2 SULFATO DE SÓDIO

O sulfato de sódio (Na_2SO_4) é um composto inorgânico, de cor branca e inodoro, altamente solúvel em água e possui um ponto de fusão alto (aproximadamente $1430\text{ }^\circ\text{C}$), que é mais comumente encontrado em sua forma anidra (cujo nome do mineral é a tenardita) e na forma decahidratada ($\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$), conhecida como mirabilita pelo minério ou como Sal de Glauber (WELLS, 1923).

A produção de sulfato de sódio pode ser caracterizada de duas formas: de fontes naturais e por processos químicos. Independente de ambos, quando utilizado nas indústrias químicas, é comercialmente conhecido como *salt cake* (ou bolo de sal), e suas características, como pureza e quantidade de outros compostos, definem a gama de aplicações que tal matéria-prima pode ser empregada.

Por fontes naturais, é majoritariamente extraído como mirabilita, comum em países como USA, México, Espanha, China, Canadá e Rússia. Devido à presença constante de sulfatos em formações ígneas rochosas (como lavas, granito, entre outras), tais sulfatos são levados pela água ou formam uma camada na superfície, onde tais minerais podem ser obtidos. Pela correlação entre a solubilidade do sulfato de sódio e temperatura, uma mudança nos valores térmicos de uma região que possui sulfatos solubilizado em águas naturais podem acarretar na formação de cristais. Por tais motivos, o mineral hidratado é bem mais comumente encontrado que o anidro, e outros exemplos que contém sulfato de sódio em sua composição geralmente são acompanhados de outros sulfatos, como a glauiberita (sulfato de cálcio + sódio), a bloedita (sulfato de magnésio + sódio) e a afititalita (sulfato de sódio + potássio) (WELLS, 1923).

A outra forma que o sulfato de sódio pode ser produzido é de maneira sintética, geralmente associada a produção de ácido clorídrico. Dois processos podem ser utilizados para fazer a síntese, o de Mannheim, em que cloreto de sódio reage com ácido sulfúrico num forno de ferro (operado em temperaturas de $600\text{-}700\text{ }^\circ\text{C}$),

produzindo ácido clorídrico e bissulfato de sódio, que reage novamente com o NaCl para formar mais ácido e sulfato de sódio. Embora os processos de Mannheim e Hargreaves, que também sintetizam o ácido clorídrico e o sulfato de sódio, mas com uma mistura de NaCl, dióxido de enxofre e vapor, sejam conhecidos por produzir o Na₂SO₄ diretamente, uma parte significativa do composto é subproduto de outros processos, como na síntese de rayon (fibra de celulose), de dicromato de sódio, vitamina C e outros.

Algumas das aplicações do sulfato de sódio são na fabricação de sabão em pó, como produto que dá volume ao agente ativo; no processo Kraft de fabricação da polpa de celulose, em que o composto é reduzido a sulfeto de sódio, que quebra as lascas de madeira para se tornarem, majoritariamente, papel. E por fim, o sulfato de sódio é utilizado na indústria de vidro para impedir a formação de espuma na superfície do mesmo (PLESSEN, 2000).

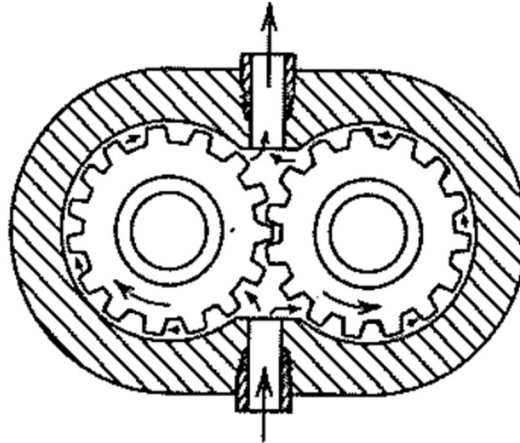
2.3 BOMBA DE DIAFRAGMA DUPLA OPERADA POR AR (AODD)

Bombas utilizam de forças mecânicas, geralmente oriundas de outros geradores, para o transporte de fluidos, podendo ser utilizadas em diversas aplicações, dependendo do tipo e da escala da bomba escolhida.

Algumas forças motrizes que podem caracterizar os diferentes tipos de bombas são as cinéticas, em que energia é fornecida ao material para que o mesmo obtenha a vazão desejada, e as de deslocamento positivo, cujo princípio de funcionamento se baseia em restringir e expulsar o material bombeado num volume pré-estabelecido, garantido uma vazão volumétrica de forma cíclica, com soluções mecânicas relativamente simples.

Um dos diversos modelos de bombas com deslocamento positivo são as bombas rotativas, mostradas na Figura 4, que utilizam de mecanismos que promovem um corpo rotatório que prende o material em setores e o expulsam de maneira constante, garantindo uma flexibilidade nas características físicas e na vazão de material desejada. Contudo, o material pode escapar entre as frestas de cada unidade de volume definida, diminuindo diretamente a eficiência da mesma, seja pelo dano causada por elementos corrosivos ou abrasivos ou pela pressão positiva causada na bomba ao longo do tempo.

Figura 4 – Esquemática de uma bomba rotativa (de engrenagem)



Fonte: Adaptado de MCCABE, 1993.

Outro tipo de bombas de deslocamento positivo são as recíprocas, que envolvem não elementos rotativos, mas movimentos repetitivos que empurram o material, como em pistões e êmbolos. Assim como os rotativos, diversas características podem ser levadas em conta na escolha de uma bomba recíproca, mas sua maior perda geralmente se encontra na perda de energia por impacto no elemento recíproco, geralmente causado por alta pressão na entrada da mesma.

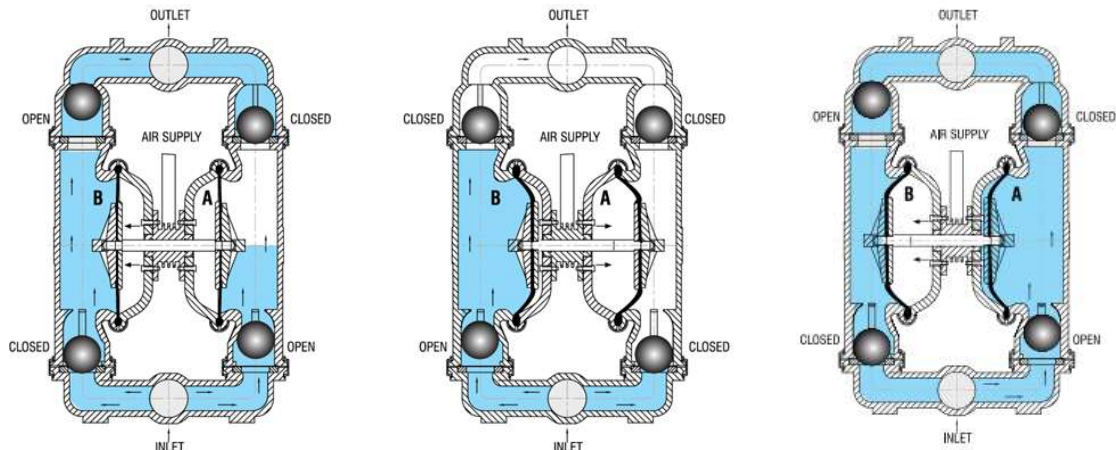
Uma bomba de deslocamento positivo recíproca bastante comum é a de diafragma, que utiliza de duas câmaras unidas por duas membranas conectadas (podendo ambas funcionarem como unidades de volume, ou não). Um mecanismo gerador de energia (elétrico ou pneumático) alterna o estado entre as duas unidades: uma membrana fecha a sua unidade, promovendo a expulsão do material, e a outra se abre, para que material ocupe a unidade de volume. Com válvulas nas entradas e saídas da unidade (cônicas ou esféricas), o fluxo do material ocorre repetidamente.

Embora mecanismos elétricos e pneumáticos possam ser utilizados para o funcionamento da bomba, uma bomba de diafragma dupla operada por ar (ou AODD, *air-operated double diaphragm*) possibilita que exista um equilíbrio de forças nos lados internos e externos da membrana, promovendo um sistema eficiente com pouca informação relacionada a sua utilização (HENRY, 2006).

As características de uma bomba AODD incluem o enclausuramento total da unidade de volume, diminuindo drasticamente os problemas por vazamentos, mesmo sem a necessidade de lubrificações e preocupações com a temperatura em que se opera o equipamento. Contudo, para manter as características de processo, é importante garantir a troca e manutenção das membranas utilizadas. Também, devido

aos materiais comumente implementados, materiais quimicamente e fisicamente agressivos podem ser utilizados, além de, como não há a necessidade de conexões elétricas na mesma, é possível utilizá-la submersa. Na Figura 5, uma progressão dos mecanismos descritos mostra como é o funcionamento da mesma.

Figura 5 – Esquemática de uma bomba de diafragma dupla operada por ar



Fonte: Adaptado de HENRY, 2006.

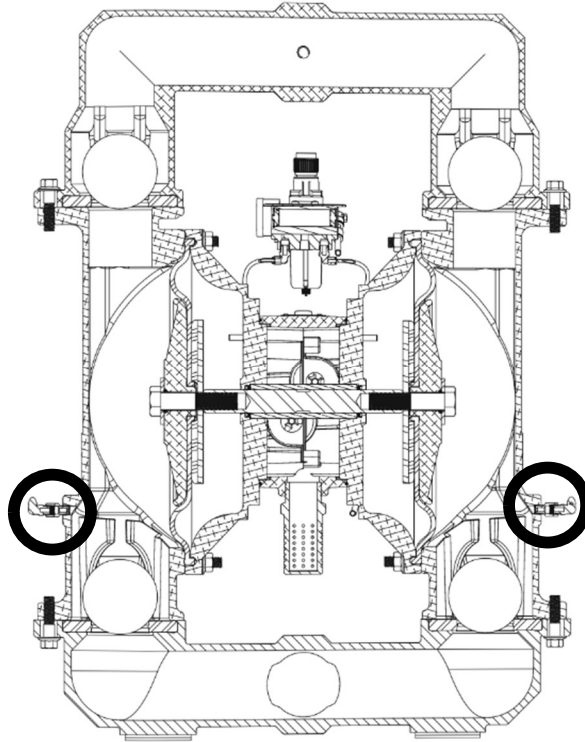
Como o mecanismo pneumático entra em equilíbrio com o líquido, a pressão do sistema está artificialmente limitada pela pressão do ar utilizada (em torno de 10 bar), e também pode ser utilizada como o controle de processo para variar a vazão do material. Por fim, o problema supracitado com impactos nas bombas recíprocas aparece aqui na forma de pulsação na vazão do material, podendo a mesma ocorrer de forma não constante, mas em intervalos de tempo, delimitados pelos ciclos das membranas. Porém um sistema de alívio de pressão pode ser inserido para mitigar os efeitos dessa natureza.

Considerando a flexibilidade de materiais que podem ser utilizados na bomba AODD, uma indústria pode decidir inserir a mesma em diversas aplicações, incluindo materiais com características de fluidos, como lama, lodo, *slurries*, suspensões e pós finos, diminuindo a gestão de *spare parts* e conhecimento de manutenção. E, ao ser implementada em aplicações cuja vazão não é elevada nem necessita ser constante, grande parte dos pontos elencados possibilitam a simplificação de instalação da bomba, especialmente em indústrias com um sistema pneumático robusto em uso.

Uma recente aplicação da bomba pneumática é sua adaptação para o transporte de materiais sólidos. Um pequeno furo, explicitado na Figura 6, é feito nas

câmaras da bomba de diafragma, possibilitando a aeração do material e o envio pela linha.

Figura 6 – Detalhe da adaptação necessária numa bomba AODD para transporte de sólidos



Fonte: Adaptado de ARO FLUID, 2018.

Com tal alteração, a bomba AODD se torna um transportador pneumático, com as válvulas abre/fecha dosando o material sem a presença de vazamento de ar retornando para a linha, pois a aeração do ar é sincronizada com a atuação de diafragma da bomba. Ela também atua na própria aeração do ar, enviando pequenas quantidades de material de forma pulsada, sendo mais eficaz em distâncias curtas. As vantagens desse equipamento são: o fato de ser um equipamento compacto; seu enclausuramento, não causando poeira no ambiente; sua fácil manutenção, especialmente numa planta que já utiliza bombas de diafragma em outras aplicações, visto que as peças são semelhantes entre as aplicações. Contudo, pela sua natureza, acaba não sendo tão eficiente energeticamente, e não sendo monetariamente interessante se um transporte intermitente é feito.

2.4 SEGURANÇA NO TRABALHO

Com o desenvolvimento e evolução do trabalho, seus diversos componentes foram sendo continuamente melhorados para atender o nível de excelência necessário. Ao caminhar para a constante renovação, novos fatores foram se tornando chave na gestão de qualquer operação, como controle de qualidade, controle de estoque e segurança.

A responsabilidade de assegurar a saúde e segurança de seus trabalhadores de forma eficiente é pautada na CLT (Consolidação das Leis do trabalho), que delimita às empresas o cumprimento e instrução das normas de segurança e medicina no trabalho. Complementar a CLT, as normas reguladoras expandem tais deveres, englobando assuntos e setores específicos, como a utilização de EPIs (NR6), trabalho em altura (NR35), espaços confinados (NR33), foco nos setores de mineração (NR22), portuário (NR29), e até normas específicas de certos equipamentos, como a sobre caldeiras e vasos de pressão (NR13) e instalações em eletricidade (NR10). As NRs, dependendo de sua aplicação, podem explicitar como o controle das ações precisa ser feito, categorização de equipamentos, treinamento necessário para a atividade e como as mesmas podem ser auditadas.

Não só questões legais regem a aplicação de segurança numa planta. Optando pela implementação de uma gestão sólida de saúde e segurança do trabalho, que promove um ambiente seguro e responsável sob o operador, a empresa pode desejar obter uma certificação de um sistema de gestão, como a ISO 45001 que audita os processos e mapeamentos feitos para controle e garantia da segurança no local de trabalho, mostrando o comprometimento da organização no assunto.

Portanto, existe a necessidade de ferramentas capazes de analisar de forma analítica ou qualitativa os diversos pontos que se referem a saúde e segurança no trabalho. Não só sua identificação, como seu entendimento, sua gestão e melhoria contínua, com o objetivo de cada vez mais mitigar os pontos que podem causar um acidente.

Para essa finalidade, uma metodologia focada no gerenciamento de risco (RBSP) pode ser implementada para manter uma cultura de segurança, identificar de forma eficaz os pontos críticos, confeccionar padrões para manter os processos seguros e tratar as atividades que necessitam atenção, de forma a continuamente

envolver os operadores nesses processos, garantindo a eficácia e permeabilidades dos controles implementados (CCPS, 2007).

3 ANÁLISE DO TRANSPORTE DE SULFATO DE SÓDIO

3.1 DESCRIÇÃO DO PROBLEMA

Na produção de qualquer componente vítreo, independentemente de sua aplicação ou formato, o processo se inicia com o abastecimento de matéria-prima no forno principal, que eleva a temperatura da mistura no ponto de viscosidade desejado para o manejo futuro do vidro.

O processo de abastecimento é conhecido como *batch* (batelada em inglês), pois as diferentes matérias-primas são pesadas de forma proporcional, misturadas, e depois inseridas no forno. O processo de mistura é geralmente feito em batelada para garantir o peso correto de cada pó, que é estocada em silos até ser utilizado no processo.

Diversos materiais podem compor o *batch* de uma indústria de vidros, dependendo da característica desejada para o produto final. De forma geral, os pós adicionados cumprem uma das 5 funções: Óxido principal, que fornecem a estrutura principal do vidro e suas características; fundentes, cujo objetivo é diminuir o ponto de fusão da mistura; aditivos, que ajudam a promover características específicas para cada aplicação; corantes e, por fim, clarificantes que diminuem a quantidade de bolhas produzida. (SHELBY, 2005).

No processo de produção de vidro estudado, sete materiais compõem o *batch*, que são pesados automaticamente e produzem uma batelada a cada 10 minutos. Dos sete materiais, cinco são abastecidos no silo diretamente pelos caminhões que levam a matéria-prima à planta (chegando à frequência de até um carregamento por dia).

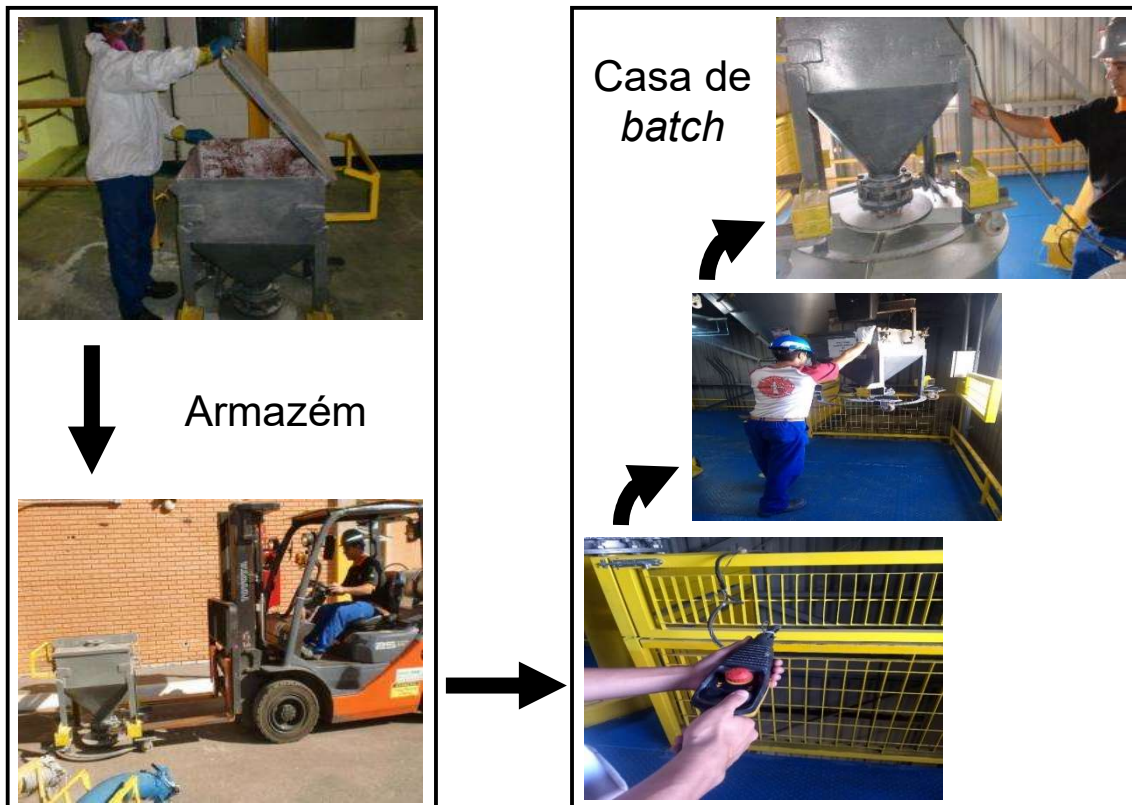
Por suas características e consumo menor que os demais, a barrilha (carbonato de sódio) e o sulfato (sulfato de sódio) são recebidos em sacarias pela planta e, posteriormente, abastecidos nos silos definidos pelos operadores da empresa.

A barrilha, que tem um consumo de aproximadamente 1500 kg/dia, é enviada para o seu silo por um sistema de transporte pneumático por vaso de pressão, com sua linha própria, que envia o material do térreo, onde o *big bag* é rasgado, até o silo, 15 metros acima do chão. O silo pode receber até 7 tons, o que possibilita a atividade ser realizada a cada 4-5 dias, dependendo do consumo diário de *batch* na planta.

O transporte de sulfato de sódio (foco do presente estudo), cujo fluxo pode ser resumido pela Figura 7, é recebido em sacos de 25kg que são depositados num

recipiente de aço que é transportado do local de abastecimento da matéria-prima até a casa de *batch*, onde o material será descarregado no silo. O operador, então, iça o recipiente numa talha, levanta o mesmo por três andares, coloca o interior do recipiente na entrada do silo, e faz o descarregamento do material. O consumo de sulfato é de 40 kg/dia, e a atividade é feita a cada 5 dias, preenchendo o recipiente com 200 kg de sulfato de sódio em cada batelada, devido a capacidade do silo utilizado. A dosagem de material para a confecção do *batch* é feita por roscas com um sistema de pesagem automático, e a atividade de abastecimento é independente desse processo.

Figura 7 – Processo de descarregamento do sulfato de sódio



Fonte: Acervo pessoal

Como parte de um processo contínuo para melhoria na segurança das atividades envolvidas dentro da planta, alguns pontos críticos foram identificados no abastecimento de sulfato, como a utilização de empilhadeira, o içamento de um recipiente com material interno e proximidade do operador com um vão de 13 metros sem a proteção necessária, ocorrências que podem acarretar num acidente

gravíssimo. Portanto, se torna interessante o estudo de novas possibilidades para a atividade, com o objetivo de diminuir o risco atrelado a mesma.

Para que a atividade diminua a interação com o operador, foi desenhada uma linha própria que levaria o material até o silo, de forma similar ao que ocorre com a barrilha. E, como propostas para a operação unitária que seria a matriz tecnológica do processo de abastecimento, duas opções se apresentaram como possíveis: a reutilização de um vaso de pressão desativado na planta, ou a compra de uma bomba de diafragma.

Com um vaso de pressão, o sistema seria igual ao utilizado para a barrilha. O vaso de pressão, hoje desativado e não utilizado para nenhuma atividade, poderia ser realocado e acoplado na tubulação que faria o transporte do sulfato de sódio. Embora o custo seja reduzido pela reutilização de equipamento, o vaso de pressão foi originalmente projetado para cargas acima de 200kg, o que origina a necessidade de reavaliação dos pontos de operação do vaso, visto que uma carga acima de 200kg poderia causar empedramento de material no silo de sulfato. Além disso, existe a preocupação da necessidade de instalação do mesmo próximo ao vaso existente que faz o transporte de barrilha, ponto crítico levando em conta a rigorosa avaliação da disposição dos vasos de pressão que a NR13 engloba, elevando o risco do processo.

Na instalação da bomba de diafragma adaptada, um modo de transporte de sólidos não compartilhado por nenhuma das filiais da empresa seria implementado na atividade, trazendo todos os desafios de adaptação e regulagens de processo, embora bombas similares são utilizadas em outros processos dentro da planta (bombeando fluidos ao invés de sólidos). As vantagens da instalação, apesar de mais cara, seria o projeto específico para a utilização desejada, sendo escolhida desde seu comissionamento o equipamento certo para a carga desejada.

3.2 PROPOSTAS DE SOLUÇÃO

3.2.1 Vaso de pressão

No processo de abastecimento pelo vaso de pressão, parte da estrutura utilizada para a carga de barrilha seria utilizada: a sacaria é rasgada num nível acima do chão (e acima do vaso de transporte), para que o produto possa chegar no silo com a granulometria desejada. Contudo, pela preocupação com a contaminação

cruzada de material, um sistema paralelo precisaria ser feito para separar o abastecimento das duas matérias-primas. Assim como o abastecimento da barrilha, o sistema funciona com uma única batelada sendo enviada pelo sistema, na fase diluída e em pressão positiva, estimada em 5-6 bar. Essa configuração é escolhida pois a quantidade de material é pequena, e o processo não é intermitente, possibilitando a manutenção do equipamento quando necessário e a limpeza total na linha em cada pulso pneumático.

Com o vaso cheio até sua carga especificada, o operador fecha a entrada de material, e o pó seria enviado diretamente para o silo, num processo rápido e sem a necessidade de limpeza posterior da linha. O operador guarda os materiais utilizados, atualiza os indicadores de peso do material, e finaliza a atividade. O vaso planejado para implementação é o representado na Figura 8

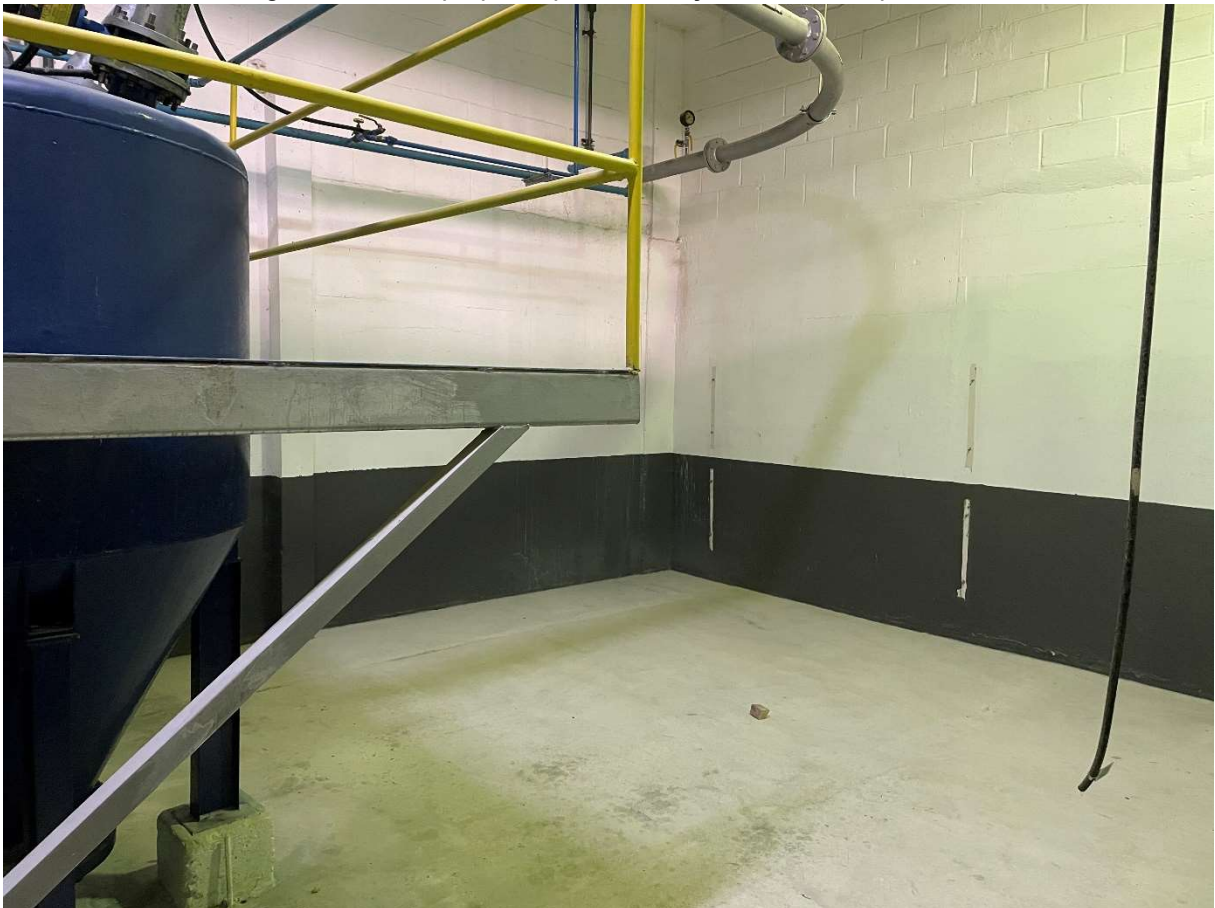
Figura 8 – Vaso de pressão proposto para instalação no local



Fonte: Acervo pessoal

No vaso de transporte, as maiores preocupações são relacionadas a: segurança, pois a presença de um sistema com descarga pneumática precisa ser auditada anualmente, ter a documentação gerida, e inclui-se o agravante de se colocar dois vasos próximos um ao outro, podendo até ser um impeditivo legal/gerencial, dependendo da distância entre eles. Outro ponto é na carga mínima do equipamento, que precisaria ser reavaliada para comportar as necessidades do silo de sulfato. O local designado para o vaso de pressão pode ser visualizado na Figura 9.

Figura 9 – Local proposto para instalação do vaso de pressão



Fonte: Acervo pessoal

Os benefícios envolvem a utilização de uma tecnologia conhecida e familiar para os trabalhadores, com pessoas na planta que possuem conhecimento teórico e prático a respeito, e podem fazer um troubleshooting caso problemas ocorram no seu desenvolvimento. Todas as *spare parts* do projeto já estariam definidas, e um equipamento inoperante na planta seria reutilizado, aumentando indicadores de manutenção e liberando espaço em outra área para gestão organizacional.

A instalação necessária incluiria adequações no mezanino para o abastecimento, realocação física do vaso, conexão com a tubulação e instalação do sistema pneumático em si, incluindo o acompanhamento rigoroso da NR13 (Caldeiras, vasos de pressão e tubulações e tanques metálicos de armazenamento), que suporta a instalação de vasos de transporte.

3.2.2 Bomba de diafragma dupla operada por ar

No processo de abastecimento pela bomba de diafragma adaptada, o operador utiliza a estação de descarga localizada no mezanino para rasgar a sacaria e colocar material no começo da bomba. Assim que o material que se deseja carregar for inserido (quantidade livre), se aciona a bomba pela válvula de ar, e o material começa a ser bombeado diretamente para a entrada do silo.

Dependendo da quantidade de blocos na sacaria, a entrada da bomba pode acumular e empacotar sulfato, surgindo a necessidade de um martelo para o esgotamento restante do material. Depois da descarga (para 150-200 kg, em média 2,5-3 horas), é importante um período de bombeamento em falso para que se garanta a limpeza da linha, e que nenhum material volte para a saída da bomba, o que pode causar avarias nas partes internas.

Embora a bomba AODD seja utilizada majoritariamente para fluidos e *slurries*, uma modificação a permite transportar materiais finos como o sulfato de sódio: uma abertura na entrada de ar comprimido da bomba, conectada as câmeras de diafragma. Dessa forma, o material pode ser aerado e enviado pela tubulação, dado um diafragma cujo material resista a abrasão do processo. O sistema funciona em pressões positivas e em fase diluída, com a própria bomba sendo um sistema dosador e o princípio de funcionamento da operação pneumática.

Os desafios com uma nova tecnologia no transporte de pó, mesmo com um equipamento que seja usado em outra parte da planta, indicam uma curva de aprendizado, contato maior com o suporte técnico do fornecedor, propensão a falhas inesperadas, entre outros fatores. A descarga não instantânea pode levar o operador a gestão incorreta do material no silo, parando a descarga antes da sua finalização ou não esgotando o material no início do processo. A bomba descrita anteriormente é mostrada na Figura 10.

Figura 10 – Bomba AODD proposta para instalação no local

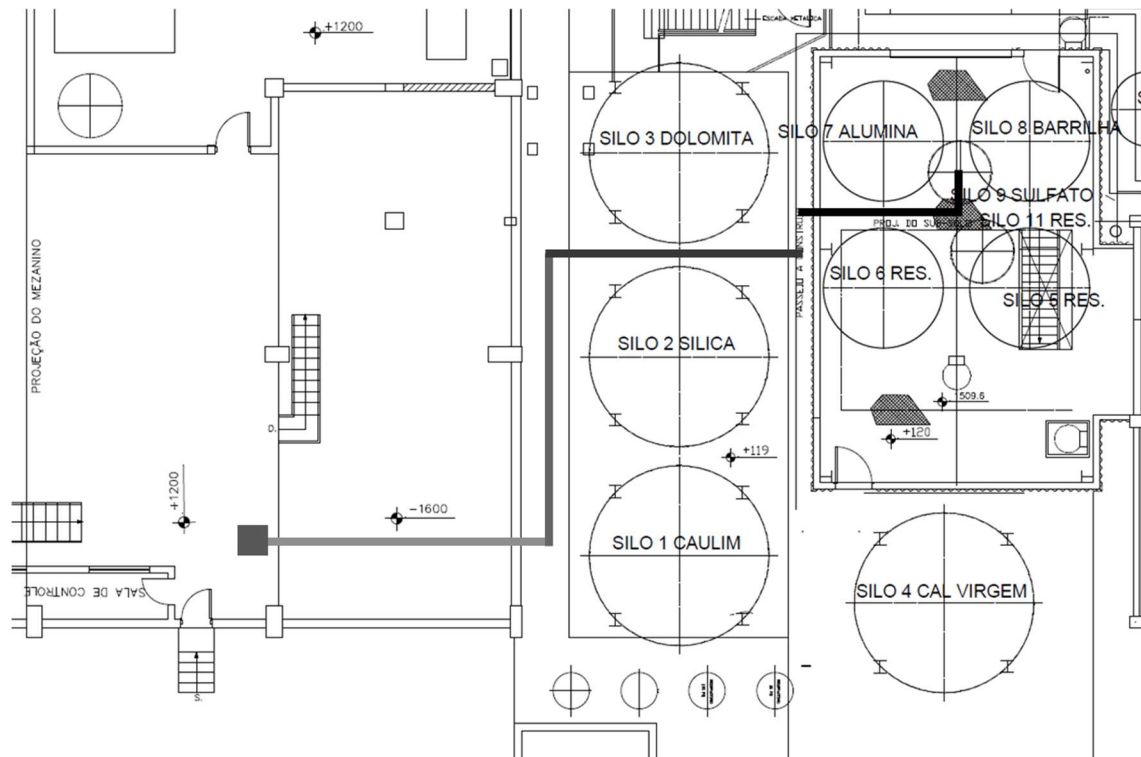


Fonte: Acervo pessoal

Com a bomba instalada, um processo projetado para a atividade leva a um equipamento mais seguro, otimização de espaço na área e flexibilidade no peso das cargas feitas. O suporte técnico do fornecedor já é familiar com as atividades da empresa, e uma garantia de 1 ano como período de testes foi acordada.

A instalação da bomba é mais simples que a opção alternativa: a gestão de *spare parts* já existe na planta e o equipamento só precisa de uma linha de ar e conexões na entrada e saída para funcionar. A tubulação, que precisa ser colocada independente da tecnologia escolhida, foi proposta com o *mock-up* observado na Figura 11.

Figura 11 – Mock-up da tubulação dos sistemas propostos



Fonte: Acervo pessoal

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Com o escopo das propostas definido, é necessário a definição das análises que foram feitas para a escolha da melhoria instalada. Além da análise de segurança, ponto principal do projeto, uma análise de custo também pode ser feita para solidificar o escopo feito das duas propostas, e incluir todos os fatores necessários para instalação. Outro ponto que foi analisado é a viabilidade técnica de ambas as propostas, com um cálculo do balanço de energia para identificar a eficiência e pontos de atenção das propostas.

4.1 ANÁLISE DE SEGURANÇA

Independente da finalidade de uma indústria química, a garantia que todos os envolvidos no processo estejam seguros é primordial. E a gestão de segurança, para que seja eficiente, precisa não só tratar as ocorrências quando elas ocorrem, mas implementar sistemas que impeçam as mesmas de ocorrer.

As atividades citadas tem relações diretas e indiretas com diversas normas reguladoras, além de precisarem estar conformes segundo a certificação ISO 45001 que a empresa possui. Para isso, um gerenciamento de risco customizada é aplicada em todos os setores da empresa, incluindo aspectos de meio ambiente, saúde e segurança do trabalho.

Para a análise de segurança entre as duas propostas, a empresa segue um método de avaliação de riscos (AR) associados a cada atividade que é feita na planta. Uma avaliação semiquantitativa é feita, incluindo os EPIs necessários, a FISPQ (ficha de segurança de produtos químicos) dos matérias relacionados, fotos da atividade sendo feita, identificação dos pontos críticos, e uma pontuação analítica relacionada aos riscos e possíveis acidentes associados a atividade. Essa avaliação considera todas as NRs e certificados envolvidos, utilizando conceitos dos mesmos para a categorização e identificação dos riscos, e é embasada num gerenciamento de indicadores relevantes relacionados a atividade, como número de quase acidentes relacionados, histórico de acidentes, equipamentos avariados, entre outros, e uma análise feita com base em brainstorm no local, pontuando e levantando os perigos e riscos associados com a atividade (CCPS, 2007).

A pontuação atrelada a cada atividade é a combinação de três fatores: a frequência de exposição, que considera o tempo entre instâncias da atividade analisada; a eficiência dos controles, que delimita os controles colocados em prática e define a possibilidade do risco se tornar um acidente, dependendo das diversas medidas que podem auxiliar a mitigar o ocorrido, e a severidade do acidente caso ele ocorra. Tais fatores são contabilizados na equação abaixo para pontuar o risco da atividade analisada, e sua pontuação é feita conforme a Equação 1, utilizando as categorizações estipuladas pelas Tabelas 1, 2, 3

$$Risco = (Efetividade\ do\ controle + Frequência) * Severidade \quad (1)$$

Para a classificabilidade do risco, uma adaptação da identificação de acidentes e análise de riscos (HIRAs) é implementada pela empresa, separando as atividades em quatro categorias, representadas por uma cor: vermelha, equivalente a um risco intolerável; laranja, equivalente a um risco com ações requeridas assim que possível, amarela, com um risco controlado, mas são necessárias ações mapeadas (no HIRA, classificada como ALARP), e verde, quando o risco é considerado tolerável.

Tabela 1 – Pontuação de risco para a efetividade do controle da atividade

Efetividade do controle	Possibilidade	Pontuação
Nenhum controle - Somente EPIs, sem treinamento e acidentes similares ocorreram na mesma planta nos últimos 12 meses	Várias vezes	9
Controles insuficientes - Somente EPIs e treinamentos, acidentes similares ocorreram em outras plantas nos últimos 12 meses	Esporadicamente	4
Controle intermitente - Controles de engenharia, manutenções preventivas e nenhum acidente similar nos últimos 12 meses	Improvável	1
Controles aceitáveis - Sistema poka-yoke (a prova de erros), treinamento em segurança, nenhum acidente similar reportado	Não ocorrerá	0,5

Fonte: Documento interno.

Tabela 2 – Pontuação de risco para a frequência de exposição da atividade

Frequência de exposição	Pontuação
Contínua a diária	13
Semanal a mensal	10
Mensal a anual	7
Menor que anual	4

Fonte: Documento interno.

Tabela 3 – Pontuação de risco para a severidade da atividade

Severidade	Pontuação
Uma ou mais fatalidades	50
Ferimento ou doença incapacitante	40
Ferimento ou doença envolvendo ausência temporária	25
Primeiros socorros ou tratamento médico menor	10

Fonte: Documento interno.

Para a classificabilidade do risco, que pode ir de 45 até 1100, é dada conforme a Tabela 4, e se origina numa adaptação da identificação de acidentes e análise de riscos (HIRAs), separando as atividades em quatro categorias, representadas por uma cor: vermelha, equivalente a um risco intolerável; laranja, equivalente a um risco com ações requeridas assim que possível, amarela, com um risco controlado (ALARP), mas são necessárias ações mapeadas, e verde, quando o risco é considerado tolerável (CCPS, 2007).

Tabela 4 – Categorias de risco e estados da atividade em função da pontuação

Categoria de risco	Risco	Estado da atividade
Vermelha - PARE	800+	Atividade não pode ser feita
Laranja - ALERTA	500 a 799	Atividade precisa de aprovação
Amarelo - CUIDADO	200 a 499	Ações são necessárias para mitigar riscos
Verde- SIGA	199-	Manter controles implementado

Fonte: Documento interno.

A gestão da AR é separada por área e por operador, onde cada atividade é descrita (juntamente com imagens), as fontes do risco e os equipamentos necessários

para a atividade, os riscos em si, as partes do corpo expostas ao risco e a pontuação da atividade. O operador precisa consultar a AR constantemente, e assina uma cópia da mesma quando a faz pela primeira vez.

Tal pontuação é feita com os representantes de segurança da empresa, que analisam cada atividade *in loco*, juntamente com a situação da área (se existe algum vão, materiais soltos, etc.) e a gestão das matérias-primas, como por exemplo, se a estocagem e a utilização do material precisam de alguma atenção especial, segundo a FISPQ do mesmo.

4.2 ANÁLISE DE CUSTO

Embora o projeto tenha como objetivo principal a redução na pontuação de segurança da atividade, uma análise de custo precisa ser feita para englobar todos os fatores que ocorreriam devido a mudança proposta, e considerar os aumentos de gastos que poderiam acontecer nesse novo cenário.

Inicialmente, deve ser avaliado o gasto com a implementação do projeto, considerando tanto o valor do equipamento, quanto o custo com mão de obra e materiais. Na cotação feita pela empresa, é comum o material necessário para a instalação já estar incluso com a mão de obra, obtendo um valor fechado para a instalação completa do equipamento. O objetivo da análise de implementação é entender se esse custo poderia ser absorvido pelas despesas estimadas do projeto, e não uma análise de retorno de investimento.

Mas também devem ser considerados outros custos, como os gastos com a manutenção do equipamento, o consumo de utilidades (energia elétrica, água, ar comprimido, etc.), e o custo com a operação, utilizando a projeção de utilização e frequência da atividade. Como comentado acima, o impacto mensal será avaliado pois, entendendo que o projeto entra nas despesas delimitadas, o comparativo mensal é mais relevante para a análise, identificando se alguma das propostas aumentaria o custo mensal total da fábrica, independente do investimento inicial. O custo mensal de cada proposta, portanto, é apresentado na Equação 2

$$C \text{ (R\$/mês)} = C_{ma} + C_{ut} + C_{op} \quad (2)$$

4.2.1 Custos de implementação

Considerando os custos para a implementação de cada proposta, é necessário elencar as cotações dos equipamentos (que, por via de regra, já incluem os custos de transporte até a planta) e as instalações da infraestrutura necessária para seu funcionamento, como adaptações físicas, tubulações, conexões com utilidades existentes, etc. A mão de obra e materiais para tal finalidade são cotados de forma única, e são acompanhados pelos engenheiros responsáveis da planta. O custo de implementação pode ser esquematizado conforme apresentado na Equação 3

$$\text{Valor do equipamento (R\$)} + \text{Valor de instalação (R\$)} = C_{im} \text{ (R\$)} \quad (3)$$

4.2.2 Custos de manutenção

Os custos de manutenção consideram a frequência de quebra de cada equipamento e as peças necessárias para voltar o mesmo a operação padrão. Peças que precisam ser trocadas numa avaria são armazenadas em estoque e se nomeiam *spare parts*, para que sempre seja possível a manutenção sem a espera de peças específicas pelo fornecedor.

Uma estimativa do custo de cada um dos equipamentos envolvidos no processo pode ser calculada considerando a frequência de manutenção, seja ela programada ou por falha no equipamento, e o valor estimado para realizar a manutenção pode ser calculado pela Equação 4

$$\frac{\text{Valor por manutenção (R\$)}}{\text{Frequência de manutenção (mês)}} = C_{ma} \text{ (R\$/mês)} \quad (4)$$

4.2.3 Custos de utilidades

Os custos com utilidades variam de acordo com as necessidades de cada proposta, embora ambas utilizem principalmente o ar comprimido como força motriz. Além do consumo real, pode-se avaliar a eficiência de cada proposta, calculando a potência real e a potência necessária para levar o material escolhido até o silo designado, fazendo um balanço de energia entre a entrada e saída de material.

Para o cálculo de custos de utilidades, podemos relacionar o valor pago pela empresa por kWh e o consumo de energia do equipamento. No caso da utilização de ar comprimido, como representado pela Equação 6, primeiro precisamos calcular a potência gasta pelo compressor, e depois o gasto anual. A relação utilizada na Equação 5 é uma estimativa de gastos com o compressor, considerando uma eficiência do motor em 92,5%, utilizando a vazão de ar em SCFM (Pé cúbico por minuto padrão), pressão em PSI e a potência em horse-power (NREL, 2014).

$$P (hp) = 0,2583 * Vazão de ar * \left[\left(\frac{Pressão do ar + 14,69}{14,69} \right)^{0,286} - 1 \right] \quad (5)$$

$$\frac{P * 0,746 * Horas no mês * Valor pago por kWh}{Eficiência do motor} = Cut (R\$/mês) \quad (6)$$

Em outros equipamentos onde o consumo elétrico é direto, podemos calcular conforme a Equação 7

$$Consumo * Horas no mês * Valor pago por kWh = Cut (R\$/mês) \quad (7)$$

4.2.3.1 Balanço de energia

Como uma análise adicional, podemos encontrar uma relação entre a potência utilizada pelo equipamento e a potência real necessária para enviar o material. Para a potência ideal, considerando o ponto 1 como o inicial, no carregamento do material, e o ponto 2 a entrada do silo. Podemos calcular o balanço energético pela Equação 8, representado pela altura manométrica, que é a energia por unidade de peso necessária para atender as características de processo estipuladas pelo balanço.

$$H \left(\frac{Energia}{Peso} = \frac{kg * m^2}{s^2} * \frac{s^2}{kg * m} = m \right) \\ = \frac{P_2 - P_1}{\gamma} + Z_{2 \rightarrow 1} + \frac{V_2^2 - V_1^2}{2g} + h_{1 \rightarrow 2} \quad (8)$$

Em que P e V são as pressões e velocidade nos respectivos pontos, Z é a diferença de altura entre os pontos, H é a altura manométrica, γ é o peso específico, g a aceleração da gravidade e h a perda de carga entre os pontos (GEANKOPLIS, 2018). Para o cálculo de velocidade, é necessário a vazão volumétrica de ar utilizada no processo encontrada pela Equação 10, e para isso precisamos converter SCFM em m^3/h e calcular a velocidade pela Equação 9

$$\dot{v} \left(\frac{m^3}{h} \right) = SCFM * \frac{P_{padr\tilde{a}o}}{P_{atual}} * \frac{T_{atual}}{T_{padr\tilde{a}o}} * \frac{m^3}{35,3 ft^3} * \frac{60 min}{h} \quad (9)$$

$$V \left(\frac{m}{s} \right) = \frac{4\dot{v}}{\pi D^2} * \frac{h}{3600 s} \quad (10)$$

Em que P é em bar ou psi, T é em Kelvin e D em metros. Com a altura manométrica resultante do balanço energético, é possível calcular a potência real e a eficiência do equipamento pela Equação 11 e 12

$$P_{\acute{u}til} (hp) = \dot{m}gH * \frac{h}{3600 s} * \frac{hp}{745,7 W} \quad (11)$$

$$\eta = \frac{P_{\acute{u}til}}{P_{equipamento}} \quad (12)$$

Em que m é a vazão mássica do processo. Para encontrar a perda de carga entre os pontos, podemos utilizar a Equação 13

$$h_{1 \rightarrow 2} = \frac{fLV^2}{2Dg} \quad (13)$$

Em que D é o diâmetro da tubulação, f é o fator de atrito que pode ser identificado pelo diagrama de Moody abaixo, utilizando uma tubulação de 2" e Sch 40, a rugosidade relativa é aproximadamente 0,001, enquanto L é o comprimento equivalente, calculado pela Equação 14. que considera o comprimento total e os acidentes (cotovelos, Ts, curvas, etc.) da tubulação

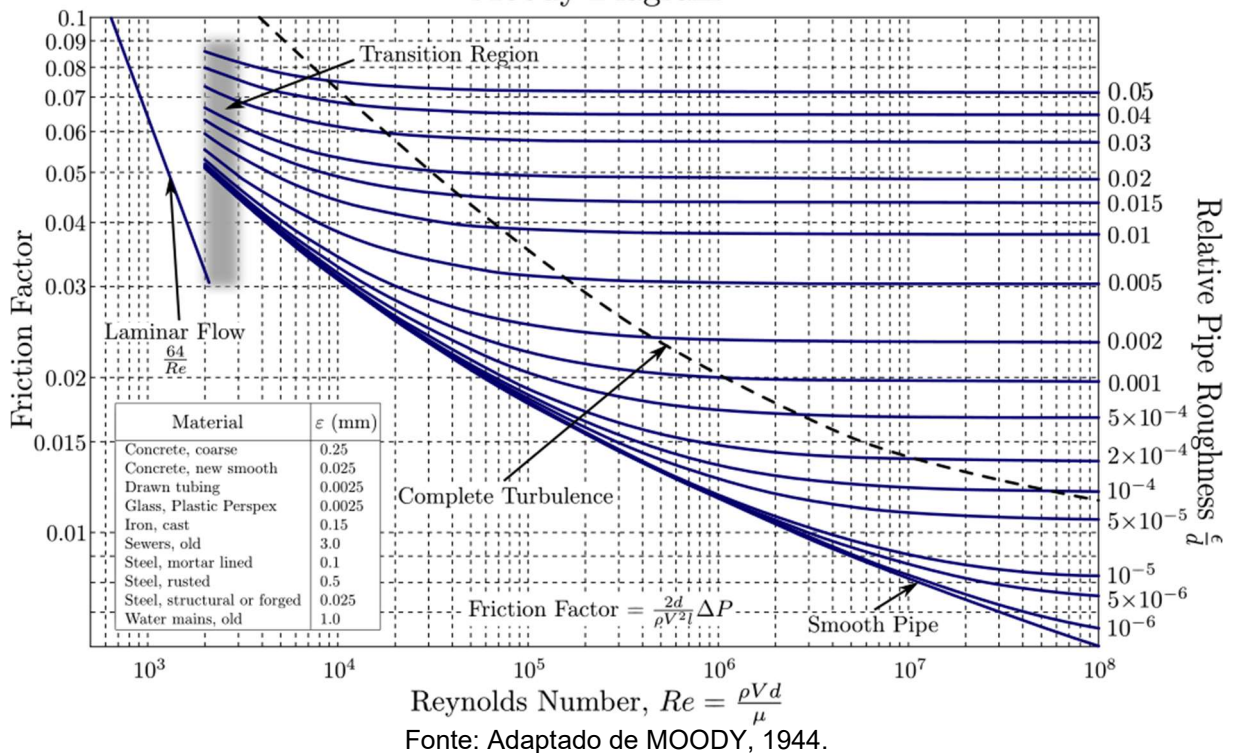
$$L = L_{altura} + 2 * L_{comprimento} + \frac{KDN}{f} \quad (14)$$

Em que K é um fator atrelado a cada acidente, e N é o número de ocorrências desses acidentes. Para encontrar o fator de atrito por Moody no diagrama da Figura 12, é necessário calcular o número de Reynolds do fluido, obtido pela Equação 15

$$Re = \frac{\rho VD}{\mu} \quad (15)$$

Com ρ sendo a densidade do ar (a 60 psig e 25°C, 6,024 kg/m³), μ sendo a viscosidade do ar (a 60 psig e 25°C, 0,0186 cP), V a velocidade e D o diâmetro da tubulação (WISC, 2006).

Figura 12 – Diagrama de Moody para escolha do fator de atrito
Moody Diagram



Considerando o fluxo de ar com material sólido, como nos casos apresentados a vazão de sólido é próxima a vazão de ar utilizado para sua aeração, a correção representada pela Equação 16 pode ser aplicada a perda de carga para considerar a presença desse material (MCGLINCHEY, 2004).

$$h_{1 \rightarrow 2} = \frac{fLV^2}{2Dg} * \left(1 + \frac{\dot{m}_{sólidos}}{\dot{m}_{ar}}\right) \quad (16)$$

4.2.4 Custos operacionais

Por fim, os custos operacionais podem ser estimados pelo tempo da atividade, desde quando o operador prepara o material para ser enviado para o silo, até o desligamento do equipamento. Para isso, um escopo com a operação feita pelo operador em detalhes, para cada uma das propostas, precisa ser montado, com o tempo que cada atividade demandaria, para que o período entre elas pudesse ser comparado. Como a área do *batch* possui diversas atividades, pode-se considerar que o operador não ficará ocioso nesse período, e o gasto com pessoas pode ser calculado pela Equação 17

$$\begin{aligned} & \text{Valor da hora do operador (R\$/h)} * \text{Tempo da atividade (h)} \\ & * \text{Frequência da atividade (mês)} = \text{Cop (R\$/mês)} \end{aligned} \quad (17)$$

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 ANÁLISE DE SEGURANÇA

Para as três atividades analisadas, a frequência da atividade é a mesma, pois a quantidade de material que precisa ser enviada para o silo não foi alterada. Feita a cada 5 dias, pela tabela de pontuação relacionada a esse fator, ele será equivalente a 10 pontos independentemente da proposta escolhida.

Na efetividade de controle, nenhum acidente foi contabilizado em relação as atividades tratadas, todos operadores são treinados em segurança e a manutenção preventiva dos equipamentos é feita quando possível, independente da solução escolhida. Contudo, os sistemas apresentados não são à prova de erros, independente da habilidade operacional do operador. Portanto, a pontuação de efetividade de controle para as três propostas é igual a 1 ponto.

Então, a pontuação das atividades se difere em função da severidade. Na situação atual, como parte do trabalho é feito perto de um vão livre, a severidade atrelada é ferimentos ou doenças incapacitantes, equivalente a 40 pontos. Assim, a pontuação é encontrada na Equação 18

$$Risco_{(atual)} = (1 + 10) * 40 = 440 \quad (18)$$

O que resulta numa classificação amarela, sendo necessárias ações para mitigar o risco, considerado o mais baixo possível para a atividade funcionar sem supervisão (ALARP). No caso do vaso de pressão, pela proximidade a outro vaso, a severidade atrelada é de ferimentos com ausência temporária, com uma pontuação igual a 25, resultante num risco representado na Equação 19

$$Risco_{(vaso)} = (1 + 10) * 25 = 275 \quad (19)$$

O que, assim como a situação atual, também resulta numa classificação amarela, não ocorrendo a redução de classificação em relação a situação atual, embora o risco quantitativo seja menor e melhorias seriam promovidas para a segurança da área, o risco dos vasos de pressão em conjunto ainda demandaria

ações por parte da empresa. Por fim, com a bomba pneumática, a classificação de severidade é a menor, igual a 10, obtendo um risco encontrado pela Equação 20

$$Risco_{(bomba)} = (1 + 10) * 10 = 110 \quad (20)$$

E com tal pontuação, a classificação da atividade passa de amarela para verde, configurando um risco tolerável. Um ponto importante para a análise se mostra aqui, pois, mesmo com a instalação do vaso de pressão, a categoria da atividade não seria alterada, pois ambas estariam na amarela, e mais ações seriam necessárias para mitigar os riscos avaliados. Porém, com a bomba AODD, a categoria seria reduzida, atingindo os objetivos corporativos do projeto. Um resumo dos resultados encontrados pode ser observado na Tabela 5

Tabela 5 – Resumo dos resultados da avaliação de segurança

Variável	Situação atual	Vaso de pressão	Bomba AODD
Controle	1	1	1
Frequência	10	10	10
Severidade	40	25	10
Risco	440	275	110

5.2 ANÁLISE DE CUSTO

5.2.1 Custos de implementação

Para a situação atual, o custo com implementação seria zero, visto que nenhuma adaptação ou equipamento novo seria necessário.

Para a instalação do vaso de pressão, os custos com implementação são relacionados somente a retirada do vaso de pressão do local que ele se encontra atualmente, instalação e adaptação no local desejado, além da tubulação e infraestrutura requerida. Na cotação requisitada, o total para tais atividades seria de R\$ 52.640,73

Por fim, na proposta de instalação da bomba AODD, não só a infraestrutura é necessária, como também a aquisição do equipamento. A bomba tem um custo de R\$ 43.703,33 (incluindo custos com transporte), enquanto a cotação da montadora é de

R\$ 28.750,20, totalizando R\$ 72.453,53 com custos de implementação. Tais resultados são calculados pelas Equações 21 e 22

$$R\$ 52.640,73 = Cma_{(vaso)} \quad (21)$$

$$43.703,33 + 28.750,2 = R\$ 72.453,53 = Cma_{(bomba)} \quad (22)$$

Os custos de implementação da bomba se mostraram mais elevados do que o vaso, pois, embora na instalação do vaso de pressão seria necessária a realocação física do equipamento e adequação do espaço, grande parte da cotação de infraestrutura são comuns para as duas propostas: a instalação da tubulação externa. Portanto, o fator determinante aqui foi a aquisição do equipamento importado, e todo trâmite legal que imputa sua importância no valor do mesmo.

5.2.2 Custos de manutenção

Para a situação atual, os equipamentos que precisam de manutenção periódica são: o pote de aço inox, a empilhadeira que faz o transporte do pote, e a talha que içava o mesmo. A empilhadeira é utilizada de forma constante na área, e sua manutenção é feita independentemente da quantidade de uso da mesma, portanto, os custos de manutenção não são alterados em função da atividade. Para o pote de aço inox, devido ao abrasamento pelo contato com o material, um acabamento adicional (estimado em R\$ 3.000) foi necessário após 15 anos de uso, enquanto a talha é verificada e mantida por uma empresa terceirizada (custos em torno de R\$ 300 por talha), cuja média de atuação numa única talha é de 6 meses. Os custos de manutenção, portanto, são calculadas pelas Equações 23 e 24

$$\frac{R\$ 7.000}{15 * 12} = Cma_{(pote)} = 16,7 (R\$/mês) \quad (23)$$

$$\frac{R\$ 300}{6} = Cma_{(talha)} = 50 (R\$/mês) \quad (24)$$

Portanto, para a situação atual, os custos de manutenção são as representadas pela Equação 25

$$Cma_{(atual)} = Cma_{(talha)} + Cma_{(pote)} = 66,7 \text{ (R\$/mês)} \quad (25)$$

Para as propostas, os custos com manutenção são oriundos dos respectivos equipamentos (vaso de pressão e bomba AODD) e da tubulação instalada. As manutenções com tubulações de inox envolvem principalmente pintura e realocação da mesma, de forma infrequente e custos pequenos, suficientes para não serem significativos na análise.

A bomba AODD tem uma série de *spare parts* que precisam ser gerenciadas, que custam em torno de R\$ 2.000 e trocadas quando a manutenção na mesma é feita. A compra dessas partes para estoque não precisa ser feita pois outros equipamentos na planta também utilizam as mesmas *spare parts*, diminuindo consideravelmente os custos iniciais de manutenção. O fornecedor estimou uma frequência de manutenção de 3 anos e meio, segundo outras empresas que utilizam a mesma solução. Então, temos um custo de manutenção da bomba calculado pela Equação 26

$$\frac{R\$ 2.000}{3,5 * 12} = Cma_{(bomba)} = 47,6 \text{ (R\$/mês)} \quad (26)$$

Por fim, o vaso de pressão, por ser um equipamento crítico de segurança, com normas específicas para sua regulamentação, uma empresa terceirizada é responsável por avaliar, manter e regularizar o estado do vaso de pressão. O custo é da atividade é fixa pra toda a planta, mas fica em média R\$ 900 por vaso de pressão, e a verificação é anual, resultando num custo de manutenção observado na Equação 27

$$\frac{R\$ 900}{12} = Cma_{(vaso)} = 75 \text{ (R\$/mês)} \quad (27)$$

Ainda impactado pela regulamentação específica, também visto na análise de segurança, a manutenção estimada do vaso de pressão foi a maior entre as três

situações abordadas. A bomba AODD é beneficiada por ser um equipamento único, e não precisar da compra de peças adicionais para a sua manutenção.

5.2.3 Custos de utilidades

Os custos de utilidades relacionados a situação atual são oriundos somente da empilhadeira e da talha utilizadas no processo. O consumo de energia da talha, até pela quantidade pequena de tempo em que a mesma fica ligada, não afeta a estimativa da conta final dos custos. A empilhadeira, que possui uma bateria de aproximadamente 25kW, a consome totalmente em 8 horas. A utilização da empilhadeira na atividade é de 30 minutos a cada 5 dias, e o custo da energia utilizada na planta é de 0,3 R\$/kWh. Então, o custo pode ser calculado na Equação 28

$$\frac{25}{8} (kWh) * 0,5 * 6 * 0,3 = Cut_{(empilhadeira)} = 23,55 (R\$/mês) \quad (28)$$

Para a bomba e o vaso de pressão, ambos sistemas utilizam a linha de ar comprimido da planta, que mantém a pressão constante a 60 psig. Com isso, é possível estimar a vazão de ar que a bomba utiliza pela curva da mesma, encontrada na Figura 13, e, pelo consumo diário da planta, a mesma será utilizada por 3 horas a cada 5 dias. A bomba selecionada foi do mesmo fabricante e formato que outras bombas de diafragma utilizadas na planta, mas adaptadas para o transporte de sólidos, para que as mesmas *spare parts*, suporte técnico do fornecedor e conhecimento dos trabalhadores pudesse ser implementado para esse processo. O material da bomba, contudo, foi escolhido para que pudesse suportar a característica abrasiva do pó fino a ser transportado. Embora a curva da bomba seja especificada para água, o fabricante explicita que correções na vazão são necessárias somente se o material da bomba é reativo com o fluido utilizado, ou se a viscosidade do fluido é superior ao da água. Como nenhum dos casos se aplica, a quantidade de sólidos é pequena em relação ao ar, e a compressibilidade do ar não altera significativamente dentro das câmeras, podemos utilizar os valores indicados (PSG DOVER, 2003).

Figura 13 – Curva característica da bomba AODD

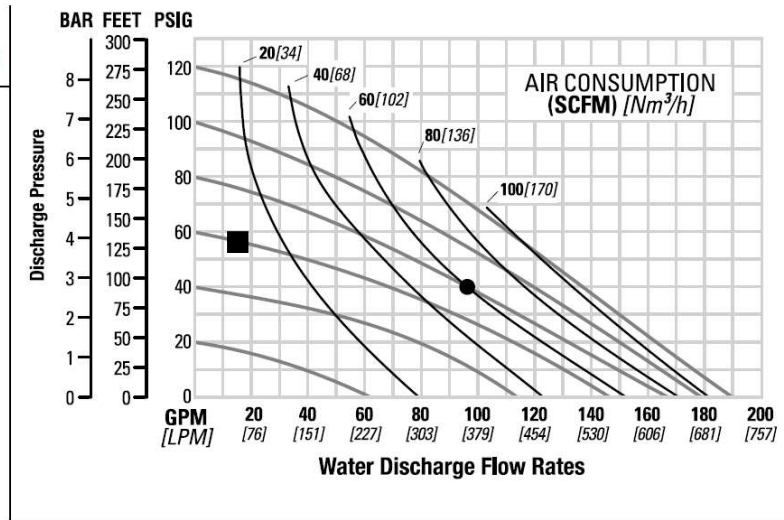
**PS8 METAL
EZ-INSTALL TPE-FITTED**

Ship Weight..... Aluminum 35 kg (78 lb)
 316 Stainless Steel 53 kg (117 lb)
 Cast Iron 49 kg (109 lb)
 Air Inlet..... 3/4"
 Inlet..... 2"
 Outlet..... 2"
 Suction Lift..... 6.9 m Dry (22.7')
 9.0 m Wet (29.5')
 Disp. per Stroke¹.....2.6 L (0.69 gal)
 Max. Flow Rate.....719 lpm (190 gpm)
 Max. Size Solids.....6.4 mm (1/4")

¹Displacement per stroke was calculated at 4.8 bar (70 psig) air inlet pressure against a 2.1 bar (30 psig) head pressure.

Example: To pump 363 lpm (96 gpm) against a discharge head of 2.8 bar (40 psig) requires 5.5 bar (80 psig) and 102 Nm³/h (60 scfm) air consumption.

Caution: Do not exceed 8.6 bar (125 psig) air supply pressure.



Flow rates indicated on chart were determined by pumping water.

For optimum life and performance, pumps should be specified so that daily operation parameters will fall in the center of the pump's performance curve.

Fonte: Adaptado de PSG DOVER, 2003.

O consumo utilizado no processo, considerando uma quantidade pequena de material em relação ao ar, é em torno de 15 GPM, o que nos estima uma vazão de ar de 10 SCFM, representado pelo ponto quadrado na Figura 13, pois também já é conhecido que a linha de ar utilizada é de 60 psig. Portanto, o consumo mensal de utilidades para a bomba é estimado pelas Equações 29 e 30

$$P (hp) = 0,2583 * 10 * \left[\left(\frac{60 + 14,69}{14,69} \right)^{0,286} - 1 \right] = 1,53 hp \quad (29)$$

$$\frac{1,53 * 0,746 * 3 * 6 * 0,3}{0,925} = Cut_{(bomba)} = 6,66 (R\$/mês) \quad (30)$$

Para o vaso de pressão, o vaso recebe o material e é totalmente pressurizado, para que o diferencial de pressão envie o material até o topo. O vaso é pressurizado em média em 5 minutos e possui 1400 L de capacidade, possibilitando uma estimativa da vazão de ar necessária para sua operação. Assim, é possível encontrar o valor da vazão necessária em SCFM pela Equação 31

$$\frac{1,4}{5/60} = SCFM * \frac{14,696}{74,696} * \frac{298,15}{275,15} * \frac{m^3}{35,3 ft^3} * \frac{60 min}{h} \Rightarrow SCFM = 46 \quad (31)$$

Considerando o ar comprimido existente na linha de utilidades, aproximadamente 46 SCFM seriam necessários para pressurizar o vaso nesse período, resultando num consumo obtido nas Equações 32 e 33

$$P (hp) = 0,2583 * 46 * \left[\left(\frac{60 + 14,69}{14,69} \right)^{0,286} - 1 \right] = 7,04 hp \quad (32)$$

$$\frac{7,04 * 0,746 * \frac{5}{60} * 6 * 0,3}{0,925} = Cut_{(vaso)} = 0,852 (R\$/mês) \quad (33)$$

Ao invés da situação atual, as propostas enviaram o material de forma direta, resultando num encurtamento total da atividade, fato que também reflete no custo de operação. Como a frequência de abastecimento é feita lima vez por semana, e o ar comprimido seria ativado de forma infrequente, o custo de utilidades estimados para as propostas foram não significativos se comparados aos outros custos mensais elencados.

5.2.3.1 Balanço de energia

Para o cálculo de balanço de energia, a maioria dos fatores são semelhantes para a bomba e o vaso de pressão. Considerando a equação do balanço, as pressões envolvidas no processo são as mesmas, visto que a entrada e saída do processo estão sob pressão atmosférica. A altura Z é igual a 13 metros para os dois casos, restando somente a velocidade e a perda de carga para serem encontradas.

Para a bomba AODD, a velocidade inicial é zero, mas a final pode ser encontrada pela vazão de ar e o diâmetro da tubulação. Considerando a vazão em SCFM, podemos converter para m³/h pela Equação 34, também validando a preposição que o consumo de ar ficaria em torno de 15 GPM para a escolha do ponto de operação da bomba

$$\dot{v} = 10 * \frac{14,70}{74,70} * \frac{298,15}{275,15} * \frac{m^3}{35,3 ft^3} * \frac{60 min}{h} \Rightarrow \dot{v} = 3,65 \left(\frac{m^3}{h} \right) = 16 GPM \quad (34)$$

Como a tubulação instalada é de 2" Sch 40, o diâmetro interno é de 0,0525 m, o que resulta numa velocidade obtida pela Equação 35

$$V = \frac{4 * 3,65}{\pi * 0,0525^2} * \frac{h}{3600 s} = 0,468 \left(\frac{m}{s} \right) \quad (35)$$

Para o vaso de pressão, podemos encontrar a velocidade nas Equações 36 e 37, alterando somente o SCFM utilizado em relação a bomba

$$\dot{v} = 46 * \frac{14,70}{74,70} * \frac{298,15}{275,15} * \frac{m^3}{35,3 ft^3} * \frac{60 min}{h} \Rightarrow \dot{v} = 16,8 \left(\frac{m^3}{h} \right) \quad (36)$$

$$V = \frac{4 * 16,8}{\pi * 0,0525^2} * \frac{h}{3600 s} = 2,156 \left(\frac{m}{s} \right) \quad (37)$$

O primeiro passo para calcular a perda de carga do sistema é o número que Reynolds, que para a bomba é calculado na Equação 38

$$Re = \frac{6,024 * 0,468 * 0,0525}{0,0000186} = 7957,51 \quad (38)$$

Utilizando o diagrama de Moody, obtemos um fator de 0,023. Com ele, podemos calcular o comprimento equivalente na Equação 39, considerando que a tubulação instalada tem 3 curvas com $K = 0,4$

$$L = 13 + 2 * 14 + \frac{0,4 * 0,0525 * 3}{0,023} = 43,74 m \quad (39)$$

Por fim, a perda de carga para a bomba AODD pode ser calculada na Equação 40, visto que o abastecimento de 200 kg é feito em 3 horas, e a vazão mássica do ar pode ser encontrado pela vazão volumétrica e a densidade

$$h_{1 \rightarrow 2} = \frac{0,023 * 43,74 * 0,468^2}{2 * 0,0525 * 9,81} * \left(1 + \frac{\frac{200}{3}}{3,65 * 6,024} \right) = 0,86 m \quad (40)$$

Para o vaso de pressão, a perda de carga é obtida da mesma forma, cujo cálculo está nas Equações 41, 42 e 43

$$Re = \frac{6,024 * 2,156 * 0,0525}{0,0000186} = 36658,95 \xrightarrow{\text{Moody}} f = 0,021 \quad (41)$$

$$L = 13 + 2 * 14 + \frac{0,4 * 0,0525 * 3}{0,021} = 44 \text{ m} \quad (42)$$

$$h_{1 \rightarrow 2} = \frac{0,021 * 44 * 2,156^2}{2 * 0,0525 * 9,81} * \left(1 + \frac{\frac{200}{5}}{16,8 * 6,024} \right) = 103,1 \text{ m} \quad (43)$$

Por fim, é possível calcular a altura manométrica, a potência útil e a eficiência para a bomba AODD, representadas nas Equações 44, 45 e 46

$$H = 0 + 13 + \frac{0,468^2}{2 * 9,81} + 0,86 = 13,87 \text{ m} \quad (44)$$

$$P_{\text{útil}} = \left(3,65 * 6,024 + \frac{200}{3} \right) * 9,81 * 13,87 * \frac{745,7}{3600} = 0,0045 \text{ hp} \quad (45)$$

$$\eta = \frac{0,0045}{1,56} = 0,29\% \quad (46)$$

E para o vaso de pressão, nas Equações 47, 48 e 49

$$H = 0 + 13 + \frac{2,156^2}{2 * 9,81} + 103,1 = 116,34 \text{ m} \quad (47)$$

$$P_{\text{útil}} = \left(16,8 * 6,024 + \frac{200}{5} \right) * 9,81 * 116,34 * \frac{745,7}{3600} = 1,06 \text{ hp} \quad (48)$$

$$\eta = \frac{1,06}{7,04} = 15,1\% \quad (49)$$

Embora o custo de utilidades não indique uma importância monetária na análise de eficiência, o resultado final nos mostra uma diferença entre as propostas: o vaso de pressão transporta o material de forma direta, utilizando o ar comprimido de forma direta no processo, como força motriz e aerador do material. Já na bomba, o ar comprimido atua como aerador e atua de forma indireta na força motriz, o que pode refletir nas diferenças de eficiência encontradas.

5.2.4 Custos operacionais

As três atividades necessitam de somente um operador para concluir as etapas necessárias, e o valor pago por hora pelos operadores que fazem tais atividades é, em média, 18 R\$/h. Na situação atual, o operador abastece o pote de sulfato com 200kg de material (o abastecimento do material é o mesmo para as três atividades, e dura em média 10 minutos), leva o pote com a empilhadeira para a casa de *batch*, onde se localiza o silo de sulfato (15 minutos), iça o pote com a talha para subir até a tampa do silo (10 minutos), faz o abastecimento do material (5 minutos), desce o pote pela talha (5 minutos) e retorna o pote até o local designado com a empilhadeira (15 minutos), resultando num custo operacional encontrado na Equação 50

$$18 * 1 * 6 = Cop_{(pote)} = 108 \text{ (R\$/mês)} \quad (50)$$

Para a proposta da bomba AODD, o operador abastece o material (10 minutos), liga a bomba (5 minutos), e a deixa funcionando por 3 horas, sem a necessidade de acompanhar o processo. Após todo o material ter sido enviado, o operador desliga a bomba (5 minutos) e termina a atividade, cujo custo pode ser observado na Equação 51

$$18 * \frac{20}{60} * 6 = Cop_{(bomba)} = 36 \text{ (R\$/mês)} \quad (51)$$

Por fim, para o vaso de pressão, o operador abastece o material (10 minutos), pressuriza a linha (5 minutos) e envia o material para o silo. O custo da atividade é dado pela Equação 52

$$18 * \frac{15}{60} * 6 = Cop_{(vaso)} = 27 \text{ (R\$/mês)} \quad (52)$$

O custo de operação intimamente relacionado com o tempo alocado para cada atividade. Como as três atividades ocorrem na mesma área e necessitam de um operador, a demanda física e temporal do processo atual reflete num custo operacional acima das propostas.

5.3 ANÁLISE FINAL

Concluída as análises em relação a segurança e custos, se pode traçar justificativas para a escolha da proposta tecnológica que substituirá o atual abastecimento de sulfato de sódio na planta de fibra de vidro analisada. O comparativo de custo resultou nos gastos mensais encontrados nas Equações 53, 54 e 55, para cada uma das situações analisadas

$$C_{(atual)} = 66,7 + 23,55 + 108 = 198,25 \text{ (R\$/mês)} \quad (53)$$

$$C_{(vaso)} = 75 + 0,856 + 27 = 102,86 \text{ (R\$/mês)} \quad (54)$$

$$C_{(bomba)} = 47,5 + 6,66 + 36 = 90,16 \text{ (R\$/mês)} \quad (55)$$

O que, aliado aos custos de implementação, corroboram que ambas as propostas são similares em gastos, e entram no orçamento delimitado para o projeto, além de ter um gasto mensal inferior ao projetado para a atividade atual. Portanto, o fator de maior importância, também o motivo pela alteração da atividade, é o impacto em segurança.

E, pela análise feita, enquanto com o vaso de pressão a classificação da atividade se manteria a mesma que a atual, o risco atrelado a bomba AODD é inferior. Portanto, visto os resultados obtidos das análises feitas, a escolha sugerida pelo estudo de viabilidade é a aquisição e instalação da bomba de diafragma. Na Tabela 6 é apresentado um resumo da análise de custo

Tabela 6 – Resumo dos resultados da análise de custo

Implementação	-	52.640,73	72.453,53
Custo em R\$/mês	Situação atual	Vaso de pressão	Bomba AODD
Manutenção	66,7	75	47,5
Utilidades	23,55	0,856	6,66
Operação	108	27	36
Total	198,25	102,86	90,16

6 CONCLUSÃO

Para o estudo de viabilidade da instalação de um transporte pneumático como alternativa para um transporte manual numa indústria de fibra de vidro, após identificados os pontos relevantes das propostas elencadas, análises relacionadas à segurança e custos foram feitas para que uma escolha assertiva pudesse ser proposta diante da situação encontrada.

Quando comparado os custos mensais, a atividade atual teve um valor estimado de R\$198,25, enquanto as propostas obtiveram um valor de R\$102,86 e R\$90,16, reduções significativas, mas próximas entre si. Contudo, na categorização de cada atividade segundo seus riscos atrelados a segurança, a situação atual e o vaso de pressão ficaram na categoria amarela, com uma pontuação entre 200 e 499, enquanto a atividade que envolve a bomba AODD obteve pontuação de 110, sendo classificada como verde.

Embora as análises de custos tenham ajudado na estruturação de cada proposta, as diferenças encontradas na análise de segurança foi o principal fator para a recomendação de viabilidade, preferindo a instalação de uma bomba de diafragma operada por ar em contrapartida a realocação de um vaso de pressão existente na planta. Com o equipamento instalado, a atividade semanal requerida é feita de forma mais rápida, com menos custos de manutenção, sem a utilização de empilhadeiras e com mais segurança, visto que o operador não tem mais interface com um vão em queda livre.

REFERÊNCIAS

- BENTON, Nathanael. **Compressed Air Evaluation Protocol**. NREL. San Francisco. 2014.
- BHATIA, A. **Pneumatic Conveying Systems**. 1. ed. New Jersey: CED Engineering, 2006. Disponível em:
<https://www.cedengineering.com/userfiles/Pneumatic%20Conveying%20Systems-R1.pdf>. Acesso em: ago. 2021.
- BRASIL. Lei nº 6.514, de 22 de dezembro de 1977. Altera o Capítulo V do Título II da Consolidação das Leis do Trabalho, relativo a segurança e medicina do trabalho e dá outras providências. Disponível em:
http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/LEIS/L6514.htm. Acesso em: nov. 2021.
- CCPS. **Guidelines for Risk Based Process Safety**. New York: John Wiley & Sons, 2007.
- COUPER, James R. *et al.* **Chemical Process Equipment**. 2. ed. [S.l.]: Elsevier Science, 2005.
- MILLS, David. **Pneumatic Conveying Design Guide**. 3^a. ed. Newcastle: Elsevier, 2016.
- DOVER, PSG. **PS8 Original Metal Pump**. Grand Terrace. 2003.
- ELETROBRÁS. **Conceitos Básicos de Transportador de Correias**. Instituto de Educação, Ciência e Tecnologia do Maranhão. Maranhão, p. 177. 2009.
- FLUID, ARO. Powder Transfer Pumps. **ARO Zone**, 2018. Disponível em:
<https://www.arozone.com/en-us/diaphragm-pumps/specialty/powder-transfer-pumps>. Acesso em: nov. 2021.
- GEANKOPLIS, Christie J.; HERSEL, A. A.; LEPREK, Daniel H. **Transport Processes and Separation Process Principles**. 5. ed. Boston: Pearson, 2018.
- GOMIDE, Reynaldo. **Operações Unitárias**. 3. ed. São Paulo: CIP Brasil, v. I, 1983.
- HENRY, D. Selecting air-operated double diaphragm pumps. **World Pumps**, p. 26-28, mai 2006. Acesso em: ago. 2021.
- HOLLEN, David; MULLET, Vaughn. **Engineering Handbook for Diaphragm Pumps**. 1. ed. Arlington Heights: Yamada Pump, 2014. Disponível em:
<https://www.yamadapump.com/assets/literature/guides/YAMADA%20Engineering%20Handbook%202014.pdf>. Acesso em: ago. 2021.
- KLINZING, George E. **Gas-Solid Transport**. 1. ed. New York: McGraw-Hill, 1981.
- MCCABE, Warren L.; SMITH, Julian C.; HARRIOTT, Peter. **Unit Operation of Chemical Engineering**. 5. ed. New York: McGraw-Hill, 1993.

MCGLINCHEY, Don. **Characterisation of Bulk Solids**. 2. ed. Glasgow: Blackwell, 2004.

MOODY, L. F.; PRINCETON, N. J. Friction Factors for Pipe Flow. **Transactions of the American Society of Mechanical Engineers**, 1944. 671-681.

PLESSEN, Helmold V. Sodium Sulfates. **Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry**, Frankfurt, 15 jun. 2000. 383-399.

RIETEMA, K. **The Dynamics of Fine Powders**. 1. ed. Son: Elsevier Science, 1991.

SHELBY, James E. **Introduction to Glass Science and Technology**. 2. ed. Cambridge: RSC, 2005.

SLAYTER, Games. **Method and apparatus for making glass wool**. US2133235A, 11 out. 1933.

WELLS, Roger C. **Sodium Sulphate: Its Sources and Uses**. Ohio State University. Columbus, p. 43. 1923.

WILLIAMS, Kenneth C. **Dense Phase Pneumatic Conveying of Powders: Design Aspects and Phenomena**. The University of Newcastle. Newcastle, p. 48. 2008.

WISC. Fluid Property. **IRC**, Winsconsin, 2006. Disponível em: <https://irc.wisc.edu/properties2/>. Acesso em: set. 2020.