

# TRABALHO DE GRADUAÇÃO

## VÁLVULA ROTATIVA PARA TRANSPORTE PNEUMÁTICO *ROTARY VALVE FOR PNEUMATIC TRANSPORT*

José Gabriel de Souza<sup>1</sup>; William Henrique Pereira<sup>1</sup>  
Daniel Loureiro<sup>2</sup>

Universidade São Francisco

[jose.gabriel@mail.usf.edu.br](mailto:jose.gabriel@mail.usf.edu.br); [william.pereira@mail.usf.edu.br](mailto:william.pereira@mail.usf.edu.br)

<sup>1</sup>Aluno do Curso de Engenharia Mecânica, Universidade São Francisco; Campus Itatiba

<sup>2</sup>Professor Orientador, Curso de Engenharia Mecânica, Universidade São Francisco;  
Campus Bragança Paulista.

**RESUMO.** O presente artigo teve como objetivo aplicar o conhecimento adquirido durante a pesquisa, para projetar uma válvula rotativa de transporte eficiente e segura, atendendo a algumas normas internacionais, que relacionam suas características construtivas à sua utilização. Essa válvula rotativa é um elemento auxiliar do sistema de transporte, que pode ser utilizado em diversos seguimentos da indústria de transporte pneumático, suas especificações visam garantir a qualidade e durabilidade do equipamento. Os métodos utilizados neste projeto foram: pesquisa bibliográfica e documental, além de utilização de software de renderização, para desenhos e análise do projeto. Os resultados encontrados visam constatar a capacidade do equipamento de atuar em sistemas de transporte, de acordo com as normas previstas.

**Palavras-chave:** válvula rotativa; sistemas de transporte; transporte pneumático; normas.

**ABSTRACT.** This article aimed to apply the knowledge acquired during the research, to design an efficient and safe rotary transport valve, complying with some international standards, which relate its construction characteristics to its use. This rotary valve is an auxiliary element of the transport system, which can be used in various segments of the pneumatic transport industry. Its specifications aim to guarantee the quality and durability of the equipment. The methods used in this project were: bibliographic and documentary research, in addition to the use of rendering software, for drawings and analysis of the project. The results found aim to verify the equipment's ability to operate in transport systems, in accordance with the expected standards.

**Key-words:** rotary valve; transport systems; pneumatic transport; standards.

## 1. INTRODUÇÃO

A definição de transporte pneumático por (SILVA, 2005), cita que o processo consiste em realizar operações de manuseio por meio de sistemas integrados, ou de dispositivos, cujo princípio é baseado na introdução de um produto em forma de partícula, através de uma corrente de gás, dentro de uma tubulação estanque. São utilizados por diversas indústrias, que necessitam que determinado material seja movimentado pela planta de forma eficiente, limpa e segura.

A partir disso, (SANTOS; SILVEIRA FILHO, 2018) discute algumas características desse processo e apresenta as principais vantagens da utilização de sistemas pneumáticos, como por exemplo: abundância na atmosfera, fácil transporte, possibilidade de armazenagem

e também deve ser citadas outras características interessantes, flexibilidade com relação a temperatura, segurança, limpeza, altas velocidades de trabalho, resistência a sobrecargas, baixo custo para a construção dos elementos e fácil manutenção.

Muito utilizado em indústrias do ramo alimentício, esse tipo de transporte conta com vários fatores que o tornam vantajoso, um deles é a sua adaptabilidade ao transporte de diferentes tipos de alimentos, como: pós, grãos, sementes, porém, sua utilização não se resume somente a empresas do ramo alimentício, esse tipo de sistema é utilizado em diversos seguimentos, como: químico, farmacêutico, minérios e metais.

A válvula rotativa é um elemento auxiliar importante utilizado no transporte pneumático, tem como função principal: dosar a quantidade de material que é transportado em um determinado processo, além disso, cumpre outras funções, como: impedir a obstrução da linha, vazamento de material e controla o fluxo quando existe diferença de pressão dentro do sistema, tornando o transporte viável e seguro. A atuação desse equipamento é bastante ampla, existem diversos tipos de válvulas e a adequação delas é necessária, para que sejam utilizadas de forma eficaz no sistema.

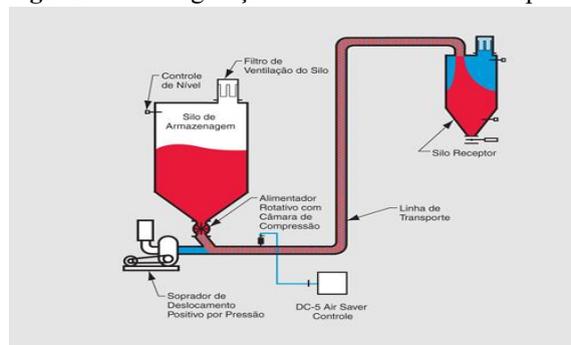
A válvula rotativa para transporte pneumático, é um equipamento que não está amplamente presente no mercado por esse motivo, em contato com a empresa Dynamic Air Ltda que é especialista em soluções para sistemas de transporte foi discutido a elaboração de um projeto para esse tipo de válvula em específico, uma vez que nacionalmente não existe nenhum fabricante que as comercialize.

## 2. REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1 Sistemas de transporte

Os sistemas de transporte pneumático são definidos como operações onde sólidos pulverulentos ou granulares são movimentados através de uma tubulação, suspensos numa corrente de gás (MARCUS *et al.*, 1990). Esse processo foi uma inovação presente na indústria no século XIX, para entendimento histórico (MOLERUS, 1996) cita uma investigação realizada pelo “Dinglers Polytechnisches Journal”, revelando que o primeiro sistema de transporte pneumático documentado, foi atribuído a Peugeot na França e era utilizado desde 1847. O que mostra que esse é um processo bastante antigo, reiterando sua eficiência, que foi evoluindo de acordo com a tecnologia existente na época, a Figura 1 apresenta um modelo de funcionamento de um sistema de transporte pneumático.

Figura 1 – Configuração de um sistema de transporte.



Fonte: Dynamic Air, 2023.

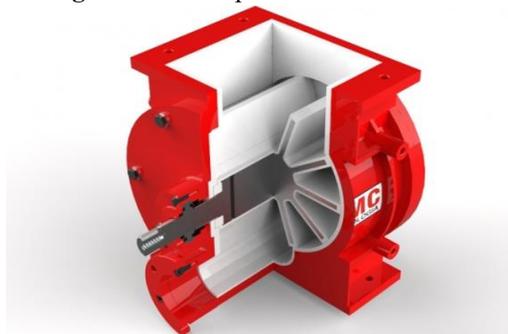
Este modo de transporte de materiais sólidos a granel, se popularizou dentro da indústria de manuseio de material particulado, pois apresenta diversas vantagens em relação a outros meios de transporte, sua aplicação é vasta, incluindo desde aspiradores de pó, a transporte de materiais ao longo de quilômetros de distância. Em uma planta de transporte pneumático há uma série de componentes que são essenciais para as operações específicas, dentre eles destacam-se quatro: fontes de fornecimento de gás, que fornecem a energia necessária para que o gás possa executar sua função, como: bombas de vácuo, compressores e sopradores, que devem atuar como motor principal no sistema; linhas de transporte, que se tratam das tubulações por onde o material é transportado, sendo elas verticais, horizontais ou curvadas, além dos equipamentos auxiliares, como as válvulas; outro elemento importante desse processo são os dispositivos de alimentação, que por sua vez, introduzem o material sólido dentro do sistema, estes são diversos, por exemplo: alimentadores por gravidade, alimentadores vibratórios, **válvulas rotativas**; no final da linha de transporte, as partículas sólidas devem ser separadas da corrente de gás, por esse motivo são utilizados equipamentos separadores, estes podem ser: ciclones, precipitadores eletrostáticos, filtros a vácuo, filtros tipo manga, etc.

Tem sido mais frequente na indústria a opção pela utilização desse tipo de sistema de transporte, em detrimento de outros, como movimentação mecânica por exemplo, isso se deve principalmente pelas vantagens que este processo pode fornecer, (KLINZING et al, 2010) destaca as principais entre elas, a flexibilidade de instalação faz com que o sistema possa ser utilizado para movimentação de materiais granulares ou em pó, mesmo em uma planta remota, o que diminui consideravelmente o custo, caso o processo fosse feito de maneira mecânica; por serem herméticos eles oferecem segurança quanto a perda de material, contaminação do produto, outra vantagem do sistema é que ele pode ser alimentado por diversas fontes e distribuídos em diferentes pontos dentro da planta, além do baixo custo de manutenção e maior possibilidade de controle e automação do processo.

## ***2.2 Válvula rotativa***

No fim do século XIX foram inventados diversos equipamentos auxiliares, alguns utilizados até hoje, como é o caso da válvula rotativa que foi patenteada em 1877. Um sistema eficiente de alimentação na tubulação de transporte, é indispensável para a melhor operação do sistema pneumático e como cita Marcus *et al.* (1990), um dos principais modelos existentes é a válvula rotativa. Este equipamento (Figura 2) é essencial em sistemas de transporte e o mais utilizado na indústria, uma vez que pode ser manipulado em uma larga faixa de pressão. É um dispositivo com característica de funcionamento relativamente simples, segundo (ROSSO, 2018), as válvulas rotativas são constituídas por um eixo horizontal com pás, envolto por uma carcaça externa e podem ser constituídas de ferro fundido, aço carbono, alumínio, bronze, inox, ebonite, PVC e plástico reforçado com fibra de vidro, como cita também (MILLS, 2004), podendo ser utilizada para transporte pneumático, dosagem e descarga nos elementos separadores, como: ciclones, filtros de mangas, etc.

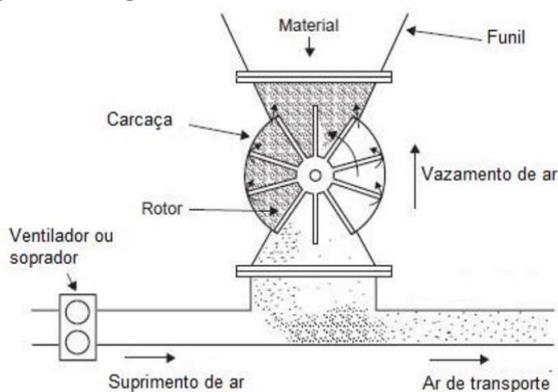
**Figura 2** – Exemplo de válvula rotativa



**Fonte:** CMC Tecnologia, 2023

Suas características de construção tornam o equipamento importante para o sistema, evitando entupimentos e sobrecarga de material na tubulação de transporte. A taxa de carregamento de sólido é controlada pela alteração do número de rotações da válvula, proporcionando praticidade quanto a necessidades de ajustes de vazão (GOMIDE,1983), a ação da gravidade também é um fator imprescindível para o funcionamento do dispositivo, a Figura 3 retrata um esquemático da atuação do equipamento.

**Figura 3** – Esquemático de funcionamento da válvula rotativa



**Fonte:** adaptado de (MILLS, 2004).

Todas as válvulas rotativas apresentam vazamento de ar (ou gás) quando o sistema está em funcionamento, independente da existência de diferencial de pressão, isso pode afetar diretamente o escoamento do material e o desempenho do sistema, principalmente quando a pressão abaixo da válvula é maior, como é o caso das linhas de transporte com pressão positiva, por esse motivo é tão importante a atenção aos detalhes ao projetar este tipo de dispositivo. As folgas entre o rotor e o corpo da válvula devem ser tão pequenas quanto possível e concêntricas; para minimizar o vazamento de gás, as folgas de projeto devem ter o valor de intervalo mais baixo (AGARWAL, 2005).

Observa (MILLS, 2004), que quanto maior a velocidade de rotação da válvula, menor e mais irregular é a eficiência de enchimento no rotor e quanto maior o diferencial de pressão no rotor, menos previsível e estável é a eficiência de alimentação. Outro fator que interfere no projeto e utilização do equipamento, é o material a ser transportado, os elementos de baixa densidade são os que mais sofrem problemas durante a alimentação (TUMULURU et al, 2010). De acordo com (GUNDOGDU, 2004), a operação da válvula acoplada a um silo que tenha pressão equalizada a linha de transporte, favorece o escoamento de sólidos de baixa densidade, aumentando a taxa de alimentação.

Dentro do projeto existem diversos fatores que afetam a escolha da velocidade de rotação e tamanho da válvula, as variáveis devem ser analisadas coletivamente, para que nas melhores condições possam oferecer alta eficiência na alimentação. Na utilização de altas velocidades do rotor, que gera força centrífuga, parte das partículas permanecem nos bolsos, isto resulta na redução da eficiência de enchimento da válvula. Devido aos cuidados que são necessários para alimentação de determinado material e das condições do sistema, é normal que a válvula seja configurada para atuar em uma velocidade que permita tempo para atenuar alguns desses fatores (ROTA VAL LIMITED, 2017).

É importante que o projeto de uma válvula rotativa possa conciliar o maior número possível de recursos alternativos, pois elas devem ser capazes de lidar com uma série de características desafiadoras dos materiais, como: as propriedades abrasivas, corrosivas, coesivas, biológicas, explosivas, entre outras e na maioria das vezes, uma combinação de algumas delas. Portanto é de suma importância a avaliação das variáveis operacionais e de projeto, que influenciam diretamente na eficiência de alimentação, como a pressão, velocidade de rotação da válvula, dimensões dos dutos, da válvula e propriedades das partículas movimentadas.

### **3. METODOLOGIA**

O presente estudo baseou-se em uma estratégia de abordagem qualitativa, através de uma pesquisa exploratória do assunto, desenvolvida a partir de análise bibliográfica e documental. Este capítulo visa demonstrar os procedimentos de pesquisa adotados para o desenvolvimento do artigo.

A origem da pesquisa veio através do contato que foi feito com a empresa Dynamic Air Ltda, especializada em sistemas de transporte pneumático, que sugeriu o estudo do equipamento devido a uma necessidade de mercado. Tendo como referência o objetivo dessa pesquisa, que é projetar uma válvula rotativa, foi decidido adotar o método de pesquisa exploratória devido à necessidade de incorporar conceitos de construção de uma válvula. A pesquisa bibliográfica foi necessária e efetuada para termos um embasamento dos conceitos de sistemas de transporte pneumático, que somados ao conhecimento que já possuíamos sobre o assunto, pudessem nos trazer um norteamento quanto à problematização apresentada.

Foram encontrados vários autores, diversos livros e alguns deles foram analisados e utilizados de maneira mais efetiva, assim como alguns artigos e teses sobre o tema abordado. (MOLERUS, 1996) apresentou um referencial histórico importante para a pesquisa, assim como (MARCUS et al., 1990), que também nos trouxe informações indispensáveis sobre os sistemas pneumáticos, que foram utilizados durante toda a pesquisa. Mills (2004) destacou características de funcionamento do transporte pneumático, bem como apresentou vários equipamentos auxiliares utilizados no sistema. Além da pesquisa bibliográfica, foi necessário o uso de análise documental para o desenvolvimento da solução para a problemática apresentada, foram consultadas diversas normas.

Para a concepção do projeto do dispositivo em questão, a aplicação do software Autodesk Inventor para o modelamento tridimensional foi imperativa. Adicionalmente, houve a necessidade de estabelecer determinadas especificações por parte da entidade fabricante, as quais foram minuciosamente abordadas nos segmentos subsequentes, durante o desenvolvimento individual de cada componente do projeto, servindo como requisitos propostos para o desenvolvimento do mesmo.

As etapas metodológicas abordadas para o seguimento do estudo foram:

1. Análise das predefinições propostas.
2. Definição da geometria e dimensões básicas das peças individuais.
3. Definição das tolerâncias dimensionais.
4. Definição das tolerâncias geométricas.

### ***3.1 Análise das predefinições propostas***

Em conjunto com a fabricante, foram analisadas informações essenciais para o processo de desenvolvimento do projeto, abrangendo tanto aspectos gerais quanto variáveis que exercem influência direta sobre o equipamento. As condições predefinidas para o desenvolvimento do projeto incluíram:

- A concepção de uma válvula com dimensões de 10".
- Folga entre o rotor e o corpo ser igual ou inferior a 0,2 mm.
- Fator de serviço para motoredutor maior ou igual a 1,2.
- Velocidade periférica máxima de 400mm/s para garantir o carregamento do material.
- Carga linear necessária para ruptura de materiais de 9 N/mm.

Esses dados serão importantíssimos durante o projeto do equipamento, e abordados quando necessário nas etapas de desenvolvimento.

### ***3.2 Definição das geometrias e dimensões básicas das peças individuais***

Conforme mencionado anteriormente, as válvulas rotativas são primariamente compostas por um eixo horizontal, equipado com pás, contido dentro de uma carcaça externa. O eixo horizontal é designado como "Rotor", enquanto a carcaça externa é subdividida em três partes denominadas "Corpo" e "Tampas". Portanto, a válvula é essencialmente constituída por quatro componentes distintos, cada um dos quais requer uma abordagem projetual específica.

Seguindo às especificações estabelecidas pela fabricante para o desenvolvimento do projeto, foi determinado que uma válvula de dimensões 10" seria concebida. Nesse sentido, o diâmetro interno do corpo foi fixado em 273 mm (10" SCH.10), com flanges de entrada e saída também de 10", em conformidade com a norma ANSI B16.5. Dessa maneira, a geometria geral do corpo foi configurada, para assim realizar o modelamento tridimensional inicial da mesma.

Com o diâmetro interno do corpo estabelecido, temos também o diâmetro externo do rotor, uma vez que o mesmo deve seguir a mesma dimensão nominal. Portanto, para a definição da geometria geral do rotor, é suficiente determinar apenas a quantidade de câmaras que ele comportará.

Com corpo e rotor previamente definidos, também é possível conceber a geometria geral que as tampas laterais irão possuir, uma vez que as mesmas funcionarão como mancais para suportaçao do eixo.

Desta forma, com todos os itens primordiais modelados, é possível visualizar que o ao fazer o acionamento do rotor com a utilização de um motoredutor por um dos lados das tampas, será necessário confeccionar também uma tampa de proteção para proteger os itens internos da tampa para o lado oposto ao acionamento.

Desta forma a geometria e dimensões básicas de todas as peças são definidas (corpo, rotor, tampas mancais e tampa de proteção), permitindo que os detalhes intrínsecos do projeto possam começar a ser aplicados sobre as mesmas.

### ***3.3 Definição das tolerâncias dimensionais***

Como mencionado anteriormente, a folga mínima entre o rotor, corpo e tampa da válvula é fundamental, sendo assim, a empresa parceira estabeleceu que a folga ideal para o equipamento desejado não deve ultrapassar 0,2 mm. Considerando o funcionamento rotativo do equipamento destinado ao manuseio de sólidos, é razoável esperar a presença de atrito durante o transporte. Diante dessa consideração, foi adotado um fator de segurança de 20% para o desenvolvimento do projeto, ou seja, a folga máxima de projeto será de 0,15mm.

A fim de determinar a folga final do conjunto, é crucial realizar a soma de todas as folgas individuais dos componentes que compõem o sistema, sejam elas provenientes da fabricação (corpo, rotor e tampas), ou adquiridas comercialmente (rolamento). Para facilitar a visualização dessas folgas, a abordagem adotada foi o desenvolvimento de uma planilha de cálculo, que realiza a soma dos valores máximos e mínimos das tolerâncias relevantes de cada peça que compõe o conjunto. A planilha foi segmentada em duas partes distintas: uma destinada ao cálculo das folgas radiais e outra voltada ao cálculo das folgas axiais. Esse método permite uma análise mais abrangente das folgas presentes no dispositivo, proporcionando uma compreensão detalhada das tolerâncias envolvidas.

### ***3.4 Definição das tolerâncias geométricas.***

Tolerâncias geométricas referem-se a desvios geométricos de uma peça que não estão diretamente relacionados com suas medidas dimensionais, mas sim com seus deslocamentos geométricos (SECCO, 2015). Em muitos casos, as tolerâncias geométricas são negligenciadas nos projetos, pois é raro que um processo convencional de usinagem, no qual as tolerâncias dimensionais das peças sejam rigorosamente seguidas, cause desvios geométricos significativos que impactem negativamente no funcionamento dos conjuntos, entretanto, ao lidar com um projeto onde a tolerância dimensional da folga exigida no conjunto é extremamente pequena, torna-se crucial realizar uma análise dos possíveis deslocamentos geométricos e seus impactos na montagem do conjunto. Para visualizar esses deslocamentos, foram consultadas informações em duas normas que estabelecem o controle de geometria, são elas:

- NBR 14646.
- NBR 6409.

Após compreender a forma como essas tolerâncias são aplicadas individualmente nas peças fabricadas, percebe-se a complexidade em entender os impactos proporcionados por essas tolerâncias na montagem final do conjunto. Diante dessa dificuldade, foi empregada uma ferramenta específica para conduzir esse estudo: uma extensão do software Autodesk Inventor, denominada como Inventor Tolerance Analysis. Essa ferramenta é utilizada para realizar análises de tolerâncias em geral.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Com as geometrias e dados básicos das dimensões de todas as peças em mente, torna-se possível iniciar o desenvolvimento do projeto de forma detalhada. Inicialmente, é crucial obter as informações do principal item comercial que influenciará na folga do conjunto, e esse item é o rolamento. No entanto, para a definição do rolamento, além da carga necessária que ele deve suportar, existe uma limitação geométrica no diâmetro interno do rolamento, que está condicionado ao diâmetro do eixo do motoredutor. Portanto, o primeiro passo é a definição e seleção do motoredutor que será utilizado.

### 4.3 Motoredutor

O modelo de redutor selecionado foi o de eixos paralelos, escolhido devido à sua forma construtiva que o torna mais compacto, tanto em altura quanto em desenvolvimento lateral. Em sistemas de transporte, a restrição de altura é uma consideração frequente, e, portanto, a eficiência do equipamento é otimizada quanto mais compacto ele for.

Além do modelo, são necessárias algumas outras informações para seleção do motoredutor, sendo elas:

- Rotação.
- Torque.
- Potência.
- Fator de Serviço.

#### 4.3.1 Definição da rotação

Considerando a velocidade periférica máxima estipulada pelo fabricante sendo de 400mm/s, temos que a rotação máxima que o redutor pode atingir é de 28 RPM:

$$Vp = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{60}$$

Onde,

Vp = Velocidade Periférica  
D = Diâmetro Externo

n = Número de rotações por minuto

Seguindo,

Diâmetro externo do Rotor = 273mm  
Velocidade periférica máxima = 400mm/s

$$n = \frac{Vp \cdot 60}{\pi \cdot D} = \frac{400 \cdot 60}{\pi \cdot 273} = 28 \text{ RPM}$$

#### 4.3.2 Definição do torque

Para determinar o torque necessário, é crucial conhecer a resistência que o rotor enfrentará ao transportar diferentes materiais. Nesse sentido, como uma variável de processo, a Dynamic

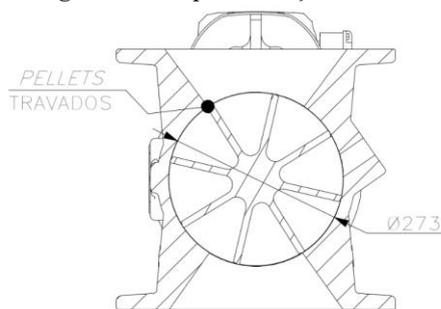
Air solicitou que o projeto fosse elaborado considerando que a força necessária para vencer a rigidez de um *pellet* (partículas ou aglomerados de partículas do material, dependendo da granulometria) genérico seria de até 9 N/mm.

Embora os sistemas de transporte operem com uma ampla variedade de materiais, torna-se impraticável projetar o equipamento para cada material individualmente. Portanto, a abordagem adotada é utilizar parâmetros que garantam eficiência para uma gama diversificada de produtos a serem transportados, por isso esse dado generalizado pela fabricante que tem experiência e dados de teste com diferentes produtos.

O ponto crítico onde o rotor enfrentaria resistência do material transportado está localizado entre as palhetas e o corpo, precisamente na folga do equipamento. Considera-se, essencialmente, que, por algum motivo, o material não flui pela folga, mas sim trava. Nesse cenário, o rotor deve possuir força suficiente para quebrar a partícula e evitar comprometimentos no funcionamento do equipamento. Essa capacidade de enfrentar resistências adicionais é crucial para assegurar a eficiência operacional do dispositivo, mesmo em condições desafiadoras de transporte de material.

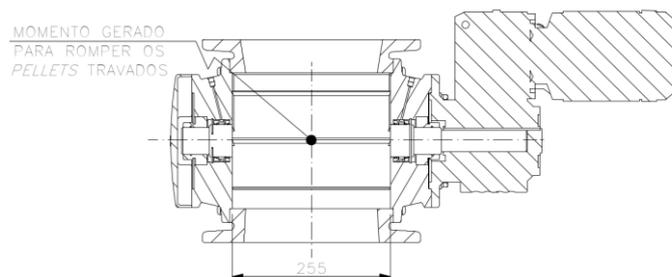
Considerando que a força linear distribuída para ruptura do *pallet* seja de 9N/mm, é possível definir a tensão pontual gerada nesse processo, representado pela figura 4.

Figura 4 – Esquemática Cálculo 1



Fonte: Próprio autor

Figura 5 – Esquemática cálculo 2



Fonte: Próprio autor

Inicialmente é necessário determinar a força necessária para quebrar o *pellet* travado, sabendo-se que o rotor possui 255mm de comprimento (dado definido conforme limitação da dimensão solicitada pela Dynamic Air de que a válvula deveria ter as dimensões de 10”) conforme figura 5, temos que a tensão pontual é de:

$$\sigma = Fd.D$$

Onde,

$\sigma$  = Tensão de ruptura

D = Distância de distribuição da carga

F = Força linear

Seguindo,

$$\sigma = Fd.D = 9 . 255 = 2295 N$$

Desta forma é possível calcular o momento gerado no centro do eixo:

$$T = F.d$$

Sendo,

T = Torque (Nm)

d = Distância (m)

F = Força (N)

Seguindo,

$$T = F \cdot d = 2295 \cdot \frac{0,273}{2} = 313 \text{ Nm}$$

Visando evitar qualquer possível problemas resultantes das variáveis de processos ou até mesmo constatações mecânicas do próprio motoredutor, um fator de segurança de 20% foi aplicado ao torque do mesmo, sendo assim, o torque final de projeto é de **376 Nm**.

#### 4.3.3 Definição da potência

$$P = \frac{T \cdot n}{716}$$

P = Potência (CV)

T = Torque (Kgf·m)

n = Rotação (RPM)

$$P = \frac{T \cdot n}{716} = \frac{37,6 \cdot 28}{716} = 1,5 \text{ CV}$$

#### 4.3.4 Seleção do motoredutor

Com os dados calculados e o fator de serviço exigido pela parceira no desenvolvimento do projeto já estabelecido, a melhor configuração encontrada para atender as necessidades foi um motoredutor FAF57, apresentando uma potência de 1,5 CV, 405 Nm de torque, 28 RPM e um fator de serviço de 1,5 (Figura 6). Este modelo é fornecido pela SEW EURODRIVE, o qual é o fornecedor colaborador da empresa parceira do desenvolvimento do projeto.

**Figura 6** – Folha de dados motoredutor

Dados técnicos			Pré visualização do produto	
FAF57DRN90S4				
Característica	Valor	Unidade		
Rotação nominal do motor	1762	1/min		
Velocidade de saída	28	1/min		
Redução total	62,92			
Torque de saída	405	Nm		
Fator de serviço SEW-FB	1,50			
Posição de montagem	M1			
Pintura fundo de cobertura	7031 Cinza Azulado (51370310)			
Posição do conector/caixa de ligação	0	*		
Posição de entrada do cabo/conector	X			
Eixo eço	40	mm		
			Data de referência	
			Seu código de material	

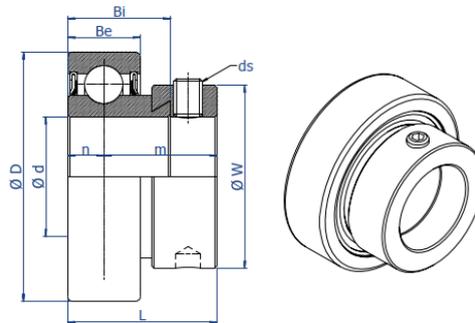
Fonte: adaptado de (SEW, 2023).

#### 4.3.5 Seleção dos rolamentos

O rolamento escolhido para o projeto é um rolamento cilíndrico com colar excêntrico. Este tipo de rolamento possui um anel interno prolongado com um degrau excêntrico, projetado para acomodar o colar de fixação (Figura 7). Girando o colar, ocorre um desalinhamento devido

à excentricidade entre o colar e o rolamento, o que resulta no travamento do eixo. Essa característica permite que o eixo seja deslocado axialmente livremente antes de ser travado. Essa capacidade é crucial para distribuir a folga final entre o rotor e as tampas, garantindo que o conjunto fique centralizado, com a mesma folga em ambos os lados do equipamento.

**Figura 7** – Rolamento cilíndrico com colar excêntrico



Fonte: adaptado de (BRM, 2023).

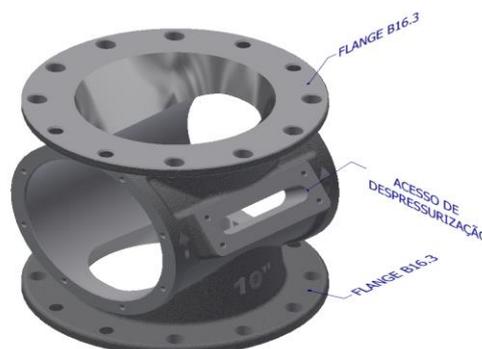
Com o motoredutor selecionado, se sabe que o diâmetro do eixo para o acoplamento no redutor é de 40 mm (Figura 6). Desta forma, já existe uma limitação geométrica, onde fica definido que o rolamento utilizado necessita de um diâmetro superior a 40mm. Isso se deve ao fato de que a classe de tolerância entre o acoplamento do eixo com o motoredutor é diferente da do acoplamento do eixo com o rolamento, portanto, os diâmetros necessitam ser diferentes.

O fornecedor para este rolamento é a BRM, e em seu catálogo foi selecionado o item KHR210. Trata-se de um rolamento cilíndrico com fixação por colar excêntrico, apresentando uma carga dinâmica de 3600 Kgf. Valor significativamente superior ao limite de força máximo que o sistema pode atingir, conforme cálculos já realizados na seleção do motoredutor. Dessa forma, o rolamento atende de maneira eficaz e segura às necessidades do projeto.

#### **4.1 Projeto do corpo**

Ao projetar o corpo, dois aspectos intrínsecos foram incorporados ao desenho para assegurar o funcionamento adequado do equipamento. Primeiramente, foi incluído um acesso lateral para a despressurização da câmara do rotor antes do processo de enchimento, como evidenciam a Figura 8, pois devido à pressão da linha, as câmaras são preenchidas com ar, o que impediria, ou dificultaria o carregamento de material.

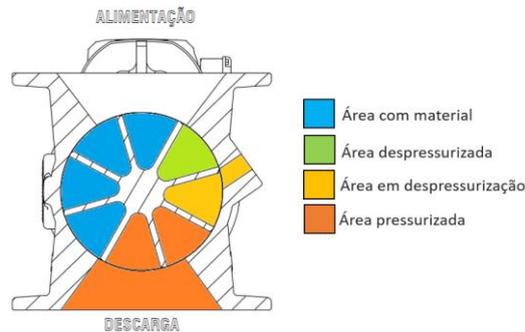
**Figura 8** – Corpo com acesso de despressurização



Fonte: Próprio autor

A Figura 9 ilustra o funcionamento da despressurização através do acesso, fazendo com que a alimentação seja eficiente e não comprometa o funcionamento do sistema de transporte.

**Figura 9** – Conceito de utilização do acesso de despressurização



**Fonte:** Próprio autor

Além disso, o bocal de alimentação foi posicionado de forma inclinada como mostrado na Figura 10, garantindo que a parte superior das palhetas do rotor não entrem em contato direto com a parte superior do corpo de uma única vez, mas sim de maneira gradual.

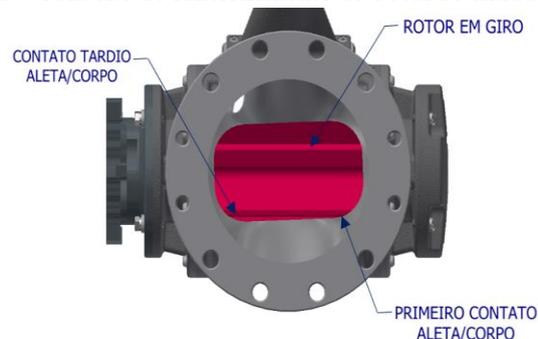
**Figura 10** – Bocal de alimentação inclinado



**Fonte:** Próprio autor

Esse arranjo opera como uma espécie de guilhotina, prevenindo o excesso de atrito ou possíveis obstruções decorrentes do acúmulo de material que não consiga se desprender das palhetas, a Figura 11 destaca como funciona esse atraso planejado do contato das pás com o corpo.

**Figura 11** – Conceito de funcionamento do bocal de entrada inclinado

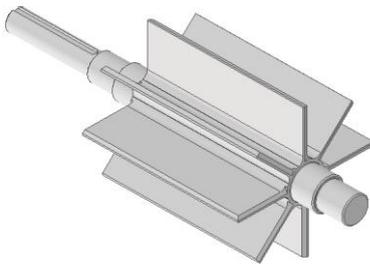


**Fonte:** Próprio autor

## 4.2 Projeto do rotor

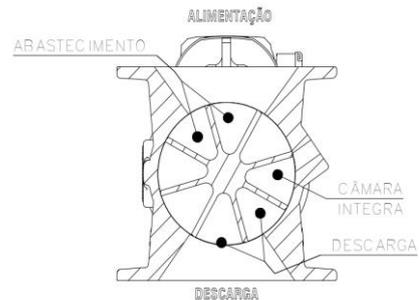
O rotor foi projetado com um diâmetro externo de 273mm, seguindo a medida nominal do corpo, as aletas com 255mm de comprimento, respeitando as 10” solicitadas pela Dynamic e com oito câmaras internas (Figura 12), o que garante um ciclo no qual duas câmaras estão sempre em fase de abastecimento enquanto outras duas estão em processo de descarga. Adicionalmente, é imperativo assegurar a existência de pelo menos uma câmara íntegra entre os pontos de entrada e saída, fornecendo resistência a passagem de ar e evitando que ele chegue à parte superior do equipamento (Figura 13).

**Figura 12** – Rotor



Fonte: Próprio autor

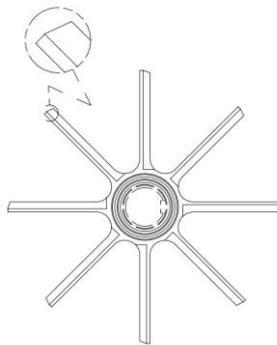
**Figura 13** – Conceito quantidade câmaras



Fonte: Próprio autor

Paralelo a isso, pensando em evitar um travamento indesejado do material, foi acrescentado um chanfro ao redor de todas as aletas (Figura 14), de forma que diminua área tangencial da face da aleta com o corpo, facilitando o escorregamento de qualquer *pellet* que fique entre o rotor e o corpo, de forma que ele possa ser movimentado para a próxima câmara e transportado sem nenhum problema.

**Figura 14** – Chanfro das aletas



Fonte: Próprio autor

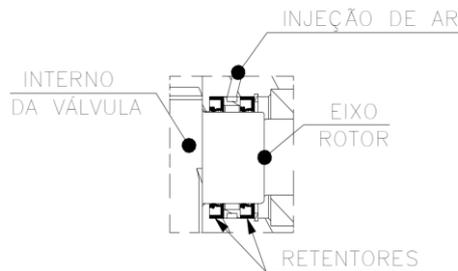
As demais dimensões nominais do rotor estão todas atreladas aos itens comerciais, rolamento, motoredutor e retentores.

## 4.3 Projeto das tampas laterais:

As tampas laterais do corpo desempenharão o papel de mancal para sustentação do rotor, abrangendo um rolamento que possibilitará a rotação do eixo. Adicionalmente ao rolamento, torna-se essencial incorporar algum mecanismo de vedação, para impedir o contato entre os

sólidos transportados pelo equipamento e os rolamentos. Nesse contexto, foi projetado um selo pneumático, cuja representação esquemática é apresentada na Figura 15.

**Figura 15** – Selo pneumático



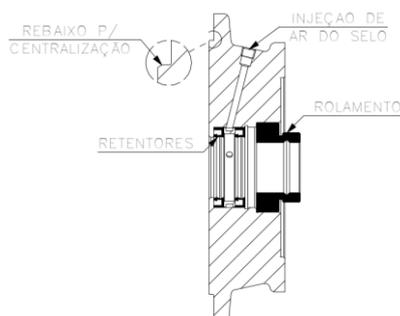
**Fonte:** Próprio autor

Este selo é composto por dois retentores, sendo que o elemento crucial não reside exclusivamente nos retentores em si, mas na utilização do ar. Os retentores são posicionados de modo que os lábios estejam voltados para a parte interna do corpo, e então o ar é introduzido entre eles. Dado que o retentor veda apenas na direção em que seus lábios estão dispostos, o ar encontra resistência em apenas um sentido, onde o retentor desempenha sua função convencional, contudo, o ar encontra pouca resistência ao passar pelo outro retentor, possibilitando que ele adentre a parte interna da rotativa, mas impeça o seu retorno. Esse fluxo contínuo de ar constitui a base da vedação do eixo, formando uma película fina pela injeção constante de ar, essa película não apenas evita a entrada de qualquer material na tampa, mas também gera resistência e turbulência para o ar pressurizado que tenta subir em direção à câmara de carregamento, esse efeito combinado amplifica a capacidade de vedação da válvula.

Com os elementos definidos, pode-se finalizar a geometria básica das tampas laterais, acrescentado apenas um detalhe importante, de que uma vez que essas tampas funcionarão como mancais para o rotor, é indispensável de que as mesmas estejam concêntricas com o corpo, desta forma, um rebaixo na face da mesma se dá necessário para que durante a montagem se possa garantir de que ambas as tampas estarão concêntricas com o corpo (Figura 16).

Os retentores selecionados para incorporação no projeto são do modelo R5 (Figura 17), fabricados pela Vedabrás. Esses retentores são construídos com um anel metálico revestido de borracha, que proporciona uma base estável em seu acoplamento; essa característica é crucial, uma vez que contribui para a durabilidade do componente.

**Figura 16** – Rebaixo para alinhamento



**Fonte:** Próprio autor

**Figura 17** – Retentor R-5



**Fonte:** adaptado de (Vedabrás, 2023)

#### ***4.4 Projeto da tampa de proteção***

Com as peças devidamente definidas, o conjunto podendo ser visualizado em sua totalidade e estabelecido que o acionamento da rotativa seria realizado por meio do motoredutor, posicionado em um dos lados das tampas laterais, se deu a necessidade de conceber uma tampa (Figura 18), que desempenha a função de proteger o rolamento e os componentes internos da parte oposta ao acionamento contra interferências externas.

**Figura 18** – Tampa de proteção



**Fonte:** Próprio autor

#### ***4.5 Tolerâncias dimensionais.***

O desafio substancial na fabricação desse equipamento não reside na determinação de sua forma construtiva, uma vez que é um dispositivo com existência consolidada por mais de um século. Isso implica que o conceito de funcionamento está solidamente estabelecido, sendo necessário apenas a aplicação de tecnologias e métodos contemporâneos para sua materialização. A singularidade deste projeto está em confeccionar um conjunto capaz de atender às folgas mínimas requeridas para assegurar a estanqueidade do sistema; para alcançar tal resultado, torna-se crucial que as tolerâncias de fabricação individual das peças sejam meticulosamente definidas, é precisamente nesse ponto que se encontra a distinção do projeto entre diferentes fabricantes. De acordo com o fator de segurança definido para o projeto, foi definido que a folga máxima no equipamento deve ser de 0,15mm. Essa abordagem visa aprimorar a robustez do projeto, assegurando que mesmo em caso de desgaste eventual, o funcionamento do equipamento não seja comprometido.

##### ***4.5.1 Folgas radiais***

As folgas radiais são todas aquelas estabelecidas pelos diâmetros das peças, elas implicam basicamente em um deslocamento vertical dentro do conjunto. O processo de definição das tolerâncias ideais começa com os itens que já possuem especificações claras, como o rolamento, que apresenta uma folga radial pré-determinada pelo fabricante, assim como tolerâncias para o diâmetro interno e externo. A partir desse ponto, é possível estabelecer as tolerâncias para o alojamento do rolamento na tampa, essa montagem deve ser executada com interferência, pois o rolamento não é desmontado frequentemente, garantindo assim a concentricidade do rolamento com a tampa e evitando um deslocamento por folga, sempre seguindo as orientações dos fabricantes sobre as tolerâncias ideais para cada tipo de montagem.

Ao contrário do externo do rolamento, a montagem do eixo com o interno precisa permitir um deslocamento deslizante; isso é necessário porque, após a montagem, o rotor precisa ser movimentado axialmente dentro do corpo, essa movimentação visa distribuir uniformemente as

folgas entre o rotor e a tampa para ambos os lados, garantindo que o rotor seja centralizado com o corpo, independentemente das pequenas variações dimensionais nas partes axiais.

Para as peças puramente fabricadas, a montagem entre a tampa lateral e o corpo segue o mesmo princípio de interferência, assegurando que ambas as tampas laterais, que funcionam como mancais, estejam concêntricas com o corpo, evitando deslocamentos indesejados do rotor durante a montagem do conjunto.

Após a minuciosa definição dessas tolerâncias, a planilha realiza o somatório das medidas máximas e mínimas de cada tolerância especificada, apresentando o resultado das folgas superiores e inferiores entre o corpo e o rotor. Vale ressaltar que, apesar da concentricidade das peças, as folgas não são idênticas, uma vez que a gravidade atua deslocando as folgas radiais para baixo, resultando em uma folga inferior sempre menor que a superior.

Após uma série de testes e distribuição cuidadosa das folgas, foi possível estabelecer uma folga superior máxima de 0,145 mm, uma folga superior mínima de 0,059 mm, uma folga inferior máxima de 0,089 mm e uma folga inferior mínima de 0,003 mm. Essas medidas foram obtidas utilizando tolerâncias individuais consideradas aceitáveis, viabilizando o processo de usinagem sem grandes desafios. Vale ressaltar que essas dimensões representam cenários extremos, onde a fabricação ocorre nos limites máximos e mínimos das tolerâncias especificadas, normalmente, espera-se que as folgas estejam dentro desse intervalo e não nos extremos.

A definição detalhada de cada uma das tolerâncias pode ser observada na figura 19, juntamente com os limites máximos e mínimos da folga do conjunto.

Figura 19 – Planilha para dimensionamento das tolerâncias

VALVULA ROTATIVA Ø10" - TRANSPORTE											
<b>FOLGA RADIAL FINAL DO ROTOR COM O CORPO</b>						<b>FOLGA AXIAL FINAL DO ROTOR COM O CORPO (CONSIDERANDO ROTOR CENTRALIZADO NO CORPO)</b>					
MAX SUPERIOR		0,145		MAX DESLOCAMENTO DO ROTOR		0,050		MAX		0,140 DE CADA LADO	
MIN SUPERIOR		0,059		MIN DESLOCAMENTO DO ROTOR		0,006		MIN		0,010 DE CADA LADO	
MAX INFERIOR		0,089									
MIN INFERIOR		0,003									
<b>DIAMETRO: CORPO - ROTOR</b>						<b>VALOR POSITIVO</b>		<b>VALOR REAL</b>			
	NOM	MIN	MAX	MIN	MAX	F MIN	F MAX	F MIN	F MAX		
ROTOR	273	273,080	273,940	0,080	0,120	0,105	0,190	0,105	0,190		
CORPO	273	273,045	273,080	0,045	0,080	0,053	0,095	0,053	0,095		
<b>DIAMETRO: CORPO - TAMPA</b>						<b>VALOR POSITIVO</b>		<b>VALOR REAL</b>			
	NOM	MIN	MAX	MIN	MAX	F MIN	F MAX	F MIN	F MAX		
TAMPA	273	273,080	273,120	0,080	0,120	0,000	0,000	-0,075	0,000		
CORPO	273	273,045	273,080	0,045	0,080	0,000	0,000	-0,037	0,000		
<b>DIAMETRO: EXTERNO ROLAMENTO - TAMPA</b>						<b>VALOR POSITIVO</b>		<b>VALOR REAL</b>			
	NOM	MIN	MAX	MIN	MAX	F MIN	F MAX	F MIN	F MAX		
ROLAMENTO	90	89,989	90,000	-0,011	0,000	0,000	0,000	-0,038	-0,005		
TAMPA	90	89,962	89,984	-0,038	-0,016	0,000	0,000	-0,019	-0,003		
<b>DIAMETRO: FOLGA RADIAL ROLAMENTO</b>						<b>VALOR POSITIVO</b>		<b>VALOR REAL</b>			
	NOM	MIN	MAX	MIN	MAX	F MIN	F MAX	F MIN	F MAX		
ROLAMENTO	50	50,006	50,013	0,006	0,013	0,006	0,013	0,006	0,013		
<b>DIAMETRO: INTERNO ROLAMENTO - EIKO</b>						<b>VALOR POSITIVO</b>		<b>VALOR REAL</b>			
	NOM	MIN	MAX	MIN	MAX	F MIN	F MAX	F MIN	F MAX		
EIKO	50	49,984	50,000	-0,016	0,000	0,000	0,037	0,000	0,037		
ROLAMENTO	50	50,000	50,021	0,000	0,021	0,000	0,018	0,000	0,018		
<b>COMPRIMENTO: CORPO/TAMPA - ROTOR</b>						<b>VALOR POSITIVO</b>		<b>VALOR REAL</b>			
	NOM	MIN	MAX	MIN	MAX	F MIN	F MAX	F MIN	F MAX		
TAMPA x2	3	4,910	4,950	-0,050	0,040	0,020	0,280	0,010	0,140		
CORPO	265	264,960	265,050	-0,040	0,050	0,010	0,140	0,010	0,140		
<b>DIAMETRO: ROTOR</b>						<b>VALOR POSITIVO</b>		<b>VALOR REAL</b>			
	NOM	MIN	MAX	MIN	MAX	F MIN	F MAX	F MIN	F MAX		
ROTOR	255	254,950	255,040	-0,050	0,040	0,020	0,280	0,010	0,140		
TAMPA/CORPO	255	255,060	255,230	0,060	0,230	0,010	0,140	0,010	0,140		

Fonte: Próprio autor

Essas medidas representam uma análise rigorosa dos piores casos possíveis, garantindo que o equipamento permaneça funcional mesmo sob condições extremas de fabricação.

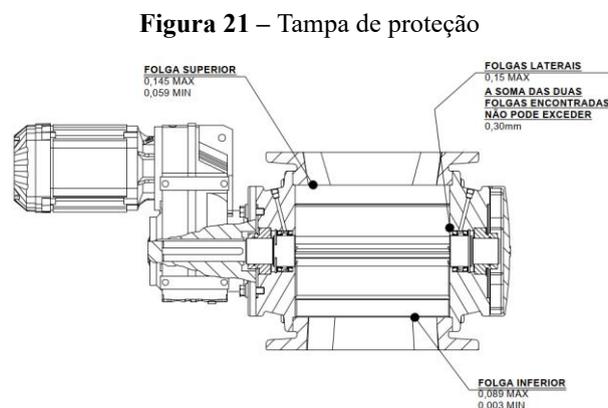
- Folga Superior Máxima: 0,145 mm
- Folga Superior Mínima: 0,059 mm
- Folga Inferior Máxima: 0,089 mm
- Folga Inferior Mínima: 0,003 mm



acordo com os possíveis desvios que elas poderiam ter, considerando os desvios dimensionais já calculados anteriormente conforme a tabela da Figura 19.

#### 4.6 Conjunto Montado

Com todas as peças definidas e devidamente modeladas, assim como as tolerâncias estabelecidas, é possível visualizar o conjunto final do equipamento (Figura 21). Fabricado a partir dos dados estabelecidos no presente trabalho, que incluem informações dimensionais e teóricas sobre as tecnologias aplicadas, como a utilização do rolamento com colar excêntrico ou o desenvolvimento do selo pneumático, espera-se que o equipamento apresente um funcionamento adequado sem quaisquer problemas, conforme previsto para uma válvula de transporte a ser comercializada por uma fabricante multinacional de equipamentos para transporte pneumático.



Fonte: Próprio autor

## 5. CONCLUSÃO

O presente artigo teve como objetivo apresentar o projeto mecânico de uma válvula rotativa para transporte pneumático, abrangendo uma variedade de conceitos relacionados ao desenvolvimento de equipamentos. Destacou-se a importância da interdisciplinaridade entre as peças individuais de um conjunto, evidenciando o impacto significativo que cada componente exerce nos resultados esperados do equipamento final. A complexidade na definição de folgas tornou-se evidente ao analisar um conjunto funcional, onde as peças individuais revelam seus valores intrínsecos.

A principal dificuldade no projeto concentrou-se na configuração das tolerâncias, especialmente para as folgas radiais, inúmeras combinações foram testadas e analisadas para alcançar o resultado desejado. Em um dispositivo tão preciso, a influência da gravidade desempenhou o seu papel, resultando em interferência na parte inferior e uma folga maior que a desejada na parte superior na maior parte do tempo. As folgas axiais também apresentaram desafios e a construção de uma válvula onde o rotor ficasse 100% centralizado com o corpo, parecia inicialmente impossível, especialmente sem a utilização do rolamento com colar excêntrico. Nesse contexto, além da expertise necessária para lidar com as tolerâncias, tornou-se crucial conhecer as tecnologias e ferramentas disponíveis no mercado para otimizar o projeto.

Apesar dos desenhos de fabricação não terem sido detalhados, todas as informações essenciais para a confecção dos mesmos foram fornecidas no presente trabalho. Variáveis não

preenchidas dependem exclusivamente da escolha do método de fabricação, por exemplo, se os corpos forem fundidos, exigirão uma abordagem diferente em comparação com um processo de caldeiraria, ou a utilização de um rolamento de fabricante diferente, com um colar distinto também pode exigir ajustes mínimos na usinagem; no entanto, o dimensionamento geral tratado no trabalho, juntamente com as tolerâncias e análises realizadas, permanece inalterado. Conclui-se, portanto, que todos os objetivos estabelecidos para o desenvolvimento do projeto foram alcançados, viabilizando a fabricação de um equipamento funcional a partir dos dados elaborados durante este trabalho.

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGARWAL, A. T. **Improving rotary valve performance: achieve better pneumatic conveying performance through better design and operation of the rotary-valve venting system.** Chemical Engineering, v. v. 112, n. n. 3, p. 29–34, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **Tolerâncias geométricas - Requisitos de máximo e requisitos de mínimo material.** NBR 14646, 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **Tolerâncias geométricas - Tolerâncias de forma, orientação, posição e batimento - Generalidades, símbolos, definições e indicações em desenho.** NBR 6409, 1997.

BRM, **Rolamentos e mancais.** São Paulo. Disponível em: <<http://www.brm.com.br/>>. Acesso em 20 nov. 2023.

CMC TECNOLOGIA®. **Soluções Técnicas de Revestimento.** Santa Catarina. Disponível em: <<https://www.cmc.ind.br/produto/27/valvula-rotativa>>. Acesso em 20 nov. 2023.

DYNAMIC AIR®. **Sistemas e componentes para transportes pneumáticos.** São Paulo. Disponível em: <<https://www.dynamicair.com/br/systems/ldp2000.html>>. Acesso em: 8 nov. 2023.

GOMIDE, R. **Operações unitárias: Operações com sistemas sólidos granulares.** São Paulo: R. Gomide, 1983.

GUNDOGDU, M. Y. **Design improvements on rotary valve particle feeders used for obtaining suspended airflows.** Powder Technology, v. 139, n. 1, p. 76–80, 2004.

KLINZING, G. E.; RIZK, F.; MARCUS, R. D.; LEUNG, L. S. **Pneumatic conveying of solids: a theoretical and practical approach.** 3. ed. New York: Springer, 2010.

MARCUS, R. D.; LEUNG, L. S.; KLINZING, G. E.; RIZK, F. **Pneumatic conveying of solids.** Chapman & Hall, New York, 1990, 596p.

MECANICAMENTE, **Dimensões para flanges conforme ANSI B16.5**. Disponível em: <<https://aliceriojr.wordpress.com/2017/09/08/flanges-padrao-ansi-150-seus-parafusos-e-a-pressao-maxima-admissivel/>> Acesso em 5 nov. 2023.

MILLS, D. **Pneumatic Conveying Design Guide**. 2 ed. Amsterdam: Elsevier Butterworth Heinemann, 2004, 637 p.

MOLERUS, O. **Overview: Pneumatic transport of solids**. Powder Technology, v. 88, p. 309-321, 1996.

ROSSO. **Válvula Rotativa**. 2023. Disponível em: <<https://www.rosso.ind.br/produtos/valvula-rotativa/valvularotativa/68/va%EF%BF%BD%20vula-rotativa>>. Acesso em: 08 nov. 2023.

ROTA VAL LIMITED. **A practical guide to rotary valves**. 2017. Disponível em: <<http://files.ecommercedns.uk/216486/bb6F5Z9oQ2GZ3EVVtiupWcaShTKOfME.pdf>>. Acesso em: 18 out. 2023.

SANTOS, B. K. dos.; FILHO, E. S. D. da. S. **Sistemas Hidráulicos e Pneumáticos**. 1 ed. 248p. São Paulo: SAGAH, 2018.

SCHÜTZ, M. **Momento Angular e Torque: Um curso rápido e didático (Física Clássica)**. Vol. 4. E-book. 2020

CRIVELARO, M.; PINHEIRO, A. C. da. F. **Resistência dos Materiais**. 1 ed. LTC editora. Rio de Janeiro, 2022.

SECCO, A. R. **Tolerância geométrica**. 1 ed. 140p. São Paulo: SENAI-SP Editora, 2015.

SILVA, D. R. da. **Transporte pneumático: Tecnologia, projetos e aplicações na indústria e nos serviços**. São Paulo: Artliber Ltda, 2005.

SEW Eurodrive, **Sistemas de acionamento, automação, serviços e soluções**. Disponível em: <<https://www.sew-eurodrive.com.br/inicio.html>>. Acesso em 20 nov. 2023.

SKF, **Rolamentos, acessórios, vedações e serviços**. Disponível em: <<https://www.skf.com/br>>. Acesso em 20 nov. 2023.

TUMULURU, J. et al. **A Riview on Biomass Densification Technologies for EnergyApplication**. Idaho National Laboratory, 2010.

WEG, **Guia de especificação: motores elétricos**. Jaraguá do Sul, 2023. Disponível em: <<https://static.weg.net/medias/downloadcenter/h32/hc5/WEG-motores-eletricos-guia-de-especificacao-50032749-brochure-portuguese-web.pdf>>. Acesso em: 24 nov. 2023>