



IAN VINICIUS SUGUIURA DE CARVALHO

**PROJETO DE REBITADEIRA E DOBRADEIRA
PNEUMÁTICAS**

LAVRAS – MG

2022

IAN VINICIUS SUGUIURA DE CARVALHO

PROJETO DE REBITADEIRA E DOBRADEIRA PNEUMÁTICAS

Relatório técnico de estágio supervisionado apresentado à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do curso de Engenharia de Controle e Automação, para obtenção do título de Bacharel.

Prof. Dr. Felipe Oliveira e Silva
Orientador

LAVRAS – MG

2022

IAN VINICIUS SUGUIURA DE CARVALHO

**PROJETO DE REBITADEIRA E DOBRADEIRA PNEUMÁTICAS
DESIGN OF PNEUMATIC RIVETING AND BENDING MACHINES**

Relatório técnico de estágio supervisionado apresentado à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do curso de Engenharia de Controle e Automação, para obtenção do título de Bacharel.

Dr. Felipe Oliveira e Silva UFLA.

Mestre Leomar Santos Marques UFLA.

Técnico Marcelo Aparecido Canavez HIROSE *Containers* para Esterilização.

Prof. Dr. Felipe Oliveira e Silva

Orientador

LAVRAS – MG

2022

*Aos meus amigos, familiares e professores,
por sempre acreditarem em mim nos momentos mais difíceis.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais Marcos e Sandra, por sempre terem acreditado no meu potencial e terem dedicado parte das suas vidas para que eu obtivesse um estudo de qualidade.

Aos meus avós Roberto, Ana e Maria, pelo apoio irrestrito mesmo que não tivessem na juventude as mesmas oportunidades que tive.

A todos os professores que tive na Universidade Federal de Lavras, que sempre buscaram ensinar, mesmo nas desavenças padrões que há entre aluno e professor.

Aos meus amigos com os quais morei junto por anos Bruno, Lucas, Jefferson e Caio, por nunca duvidarem de que eu chegaria a esta etapa, mesmo com um início de faculdade conturbado.

Ao meu orientador professor Dr. Felipe Oliveira e Silva, por ter me guiado no assunto de pneumática e acreditado no projeto.

A todos os integrantes com os quais interagi do Núcleo de Estudos de Métodos Numéricos e Simulação Computacional, por ser a primeira experiência de trabalho em equipe real que tive na vida.

Meus agradecimentos a todas as pessoas que conheci e interagi, que de alguma forma contribuíram para o meu progresso na faculdade e na vida. Muito obrigado!

“Só se pode alcançar um grande êxito quando nos mantemos fiéis a nós mesmos”.
(Friedrich Nietzsche)

RESUMO

O mundo está cada dia mais automatizado e uma das principais tecnologias industriais passíveis de implementação para tal finalidade é a tecnologia pneumática. A pneumática usa como recurso do meio ambiente, o ar atmosférico, o qual uma vez comprimido serve como forma de energia para acionar dispositivos móveis, os quais, por sua vez realizam todo o esforço que antes era feito com o emprego de força humana considerável. Este trabalho, elaborado na forma de relatório de estágio supervisionado na empresa Hirose *Containers* para Esterilização, descreve o uso da tecnologia pneumática para automatizar dois processos de fabricação por conformação plástica, a rebitagem e o dobramento, que são parte de uma cadeia produtiva para confeccionar *containers* de esterilização hospitalares. Primeiramente é apresentado o funcionamento da tecnologia pneumática, sendo demonstrado, em seguida, como se calculam as forças necessárias para conformar o material de cada processo. Simulações computacionais são apresentadas no *software* SolidWorks as quais indicam que as forças atendem o necessário para a conformação. Por fim, é apresentado o projeto do sistema pneumático no *software* FluidSIM 5 *Demo* e escolhido o cilindro pneumático de menor diâmetro possível capaz de deformar cada material dos processos.

Palavras-chave: Pneumática, Rebitagem, Dobramento, Ar comprimido, Cilindros, Válvulas, Solid Works, Fluidsim.

ABSTRACT

The world is increasingly automated and one of the main industrial technologies that can be implemented for this purpose is pneumatic technology. Pneumatics uses atmospheric air as a resource from the environment, which, once compressed, serves as a form of energy to drive mobile devices, which, in turn, perform all the effort that was previously made with the use of considerable human force. This work, elaborated in the form of a supervised internship report in the company Hirose Containers para Esterilização, describes the use of pneumatic technology to automate two plastic forming manufacturing processes, riveting and bending, which are part of a production chain to manufacture hospital sterilization containers. Firstly, the operation of pneumatic technology is presented, and then how the forces necessary to conform the material of each process are calculated. Computer simulations are presented in the SolidWorks software, which indicate that the forces meet the requirements for forming. Finally, the design of the pneumatic system is presented in the FluidSIM 5 Demo software and the pneumatic cylinder with the smallest diameter possible is chosen aiming at to deform each material in the processes.

Keywords: Pneumatics, Riveting, Bending, Compressed air, Cylinders, Valves, Solid Works, FluidSIM.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Fachada da empresa	15
Figura 2 – Compressores de ar	15
Figura 3 – Peças da caixa cortadas a laser	16
Figura 4 – Esmeril usado para lixar	17
Figura 5 – Dobradeira pneumática para dobras de chapas	17
Figura 6 – Chapas antes e após serem dobradas.....	17
Figura 7 – Dobradeira manual de estribos	18
Figura 8 – Estribos antes e após serem dobrados.	18
Figura 9 – Estação de tratamento de água de anodização	18
Figura 10 – Tanques de anodização	19
Figura 11 – Quadros usados para selagem das peças	19
Figura 12 – Tanques para abrilhantamento.	20
Figura 13 – Peças secando após anodização, selagem e abrilhantamento.....	20
Figura 14 – Gravadora a laser.....	21
Figura 15 – Fundo de caixa gravado a laser	21
Figura 16 – Rebitadeiras manuais.	21
Figura 17 – Rebites de aço inox 304 e 420.....	22
Figura 18 – Caixa rebitada.....	22
Figura 19 – Fixadora de silicone	23
Figura 20 – Fundo de caixa com silicone fixado.....	23
Figura 21 – Setor de <i>checklist</i>	24
Figura 22 – Modelos de caixa da empresa Hirose	24
Figura 23 – Caixa embaladas.....	25
Figura 24 – Solicitações mecânicas de tração e compressão.....	27
Figura 25 – Solicitação mecânica de flexão	27
Figura 26 – Solicitação mecânica de cisalhamento	27
Figura 27 – Solicitação mecânica de torção	28
Figura 28 – Região de deformação da torção.	28
Figura 29 – Curva tensão x deformação.....	29
Figura 30 – Diagrama dos processos de fabricação.	30
Figura 31 – Tipos de rebites.	31
Figura 32 – Processo de rebitagem via impacto	32

Figura 33 – Processo de rebitagem via repuxo.....	33
Figura 34 – Processo de dobramento guiado.....	33
Figura 35 – Processos de dobramentos semiguiados.....	34
Figura 36 – Processo de dobramento livre	35
Figura 37 – Unidade de condicionamento (Lubrefil)	36
Figura 38 – Filtro de ar	36
Figura 39 – Regulador de pressão	37
Figura 40 – Filtro regulador.....	37
Figura 41 – Lubrificador.....	38
Figura 42 – Cilindro pneumático padrão.....	38
Figura 43 – Cilindro pneumático de dupla ação.....	39
Figura 44 – Cilindro pneumático de dupla ação com pistão magnético.....	39
Figura 45 – Cilindro pneumático de simples ação com retorno por mola.....	40
Figura 46 – Cilindro pneumático sem haste	40
Figura 47 – Mola pneumática.....	40
Figura 48 – Cilindro pneumático rotativo de aleta	41
Figura 49 – Cilindro pneumático rotativo de cremalheira.....	41
Figura 50 – Cilindro pneumático com haste passante.	42
Figura 51 – Cilindro pneumático com múltiplas posições	42
Figura 52 – Cilindro pneumático anti-giro	42
Figura 53 – Cilindro pneumático com guia.	43
Figura 54 – Cilindro pneumático com freio	43
Figura 55 – Cilindro pneumático com curso ajustável	43
Figura 56 – Número de posições	44
Figura 57 – Número de vias	44
Figura 58 – Válvulas com acionamento muscular.....	45
Figura 59 – Válvulas com acionamento mecânico	46
Figura 60 – Válvulas com acionamento pneumático, elétrico e/ou combinado	46
Figura 61 – Válvula de retenção com mola e válvula de escape rápido.....	47
Figura 62 – Válvula de isolamento/elemento OU.	48
Figura 63 – Válvula de simultaneidade/elemento E.....	48
Figura 64 – Módulo de segurança bimanual	48
Figura 65 – Válvula de controle de fluxo	49
Figura 66 – Temporizador automático	50

Figura 67 – Captador de queda de pressão	50
Figura 68 – Contador pré determinado pneumático	51
Figura 69 – Especificações do rebite.....	53
Figura 70 – Estribo dobrado.....	54
Figura 71 – Rebite da biblioteca do SolidWorks.....	55
Figura 72 – Estribo criado no SolidWorks	56
Figura 73 – Malha gerada no rebite.....	56
Figura 74 – Malha gerada no estribo.....	57
Figura 75 – Simulação de compressão sofrida pelo rebite.....	57
Figura 76 – Deformação do rebite.....	58
Figura 77 – Simulação de tensão sofrida pelo estribo.....	59
Figura 78 – Deformação do estribo.....	59
Figura 79 – Esquemático do sistema pneumático FluidSIM.....	61

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Força do cilindro pneumático em kgf para diferentes diâmetros	54
Tabela 2 – Valores médios dos elementos do sistema pneumático projetado.....	62
Tabela 3 – Preço médio de óleo gasto em diferentes períodos de tempo.....	63

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	14
1.1 Descrição da Empresa	15
1.2 Objetivos do Estágio	25
1.3 Organização do Trabalho	25
2. REFERENCIAL TEÓRICO	26
2.1 Propriedades dos Materiais Metálicos.....	26
2.1.1 Solicitação Mecânica	26
2.1.2 Curva Tensão x Deformação	29
2.2 Processos de Fabricação.....	30
2.2.1 Rebitagem.....	31
2.2.2 Dobramento.....	33
2.3 Pneumática	35
2.3.1 Unidade de Condicionamento (Lubrefil).....	35
2.3.2 Atuadores Pneumáticos.....	38
2.3.3 Válvulas Direcionais e Auxiliares.....	44
3. METODOLOGIA.....	53
3.1 Atividades Realizadas.....	52
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	60
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	64
REFERÊNCIAS.....	65

1. INTRODUÇÃO

O uso da pneumática remonta há muito tempo com a invenção do fole, por volta de 2000 a.c. .No século 3 a.c, em Alexandria, tem-se relatos sobre o aproveitamento da força gerada pela dilatação do ar aquecido e do vento, ao passo que, na Grécia antiga, em 3 d.c. Hero escreveu trabalhos sobre o uso de vácuo e ar comprimido. Já na pré revolução industrial, tem-se grandes descobertas como as de Torricelli (barômetro) e Watts (máquinas a vapor) (PARKER 2000). Pneumática deriva-se de *Pneumos* (respiração/sopro em grego) e em engenharia é definida como o ramo destinado ao estudo e trabalho dos fenômenos físicos envolvendo gases e/ou vácuo (PARKER, 2000).

As maiores vantagens do uso da tecnologia pneumática são (PARKER, 2000):

- Baixo custo.
- Automação simples.
- Resistência dos componentes do sistema a ambientes hostis e a desgastes em longo prazo.
- Simplicidade de instalação e manutenção.
- Segurança.
- Otimização e aumento da produtividade.

As maiores desvantagens são (PARKER, 2000):

- Necessidade da preparação do ar.
- Recomendado para baixas aplicações de força.
- Elevado ruído sonoro.
- Dificuldade de trabalhos com baixa velocidade e cursos intermediários.

Nestas características, observa-se que a pneumática é útil em diversos processos industriais, proporcionando uma automação simples nas suas máquinas. Na empresa em que foi realizado o estágio ao qual se refere este relatório, usou-se dessa tecnologia para otimizar dois dos processo de fabricação presentes na mesma, a saber, rebitagem e dobramento, a fim de otimizar o tempo gasto nessas tarefas e também diminuir o esforço físico realizado por seus operadores.

1.1 Descrição da Empresa

A empresa em que foi realizado o estágio chama-se HIROSE *Containers* para Esterilização (FIGURA 1). Ela encontra-se na cidade de Batatais-SP e possui como atividade principal a confecção de containeres de esterilização hospitalares feitas de aço. A empresa possui dois compressores de ar para atender aos diferentes setores de sua cadeia produtiva (FIGURA 2), cada um com capacidade de 12 kgf/cm². A empresa é de porte pequeno e atende principalmente hospitais e clínicas das regiões de Ribeirão Preto-SP e Franca-SP.

Figura 1 – Fachada da empresa



Fonte: Do Autor (2022).

Figura 2 – Compressores de Ar



Fonte: Do Autor (2022).

A cadeia produtiva da empresa se dá da seguinte maneira:

- Pedido da caixa do cliente.
- Corte a laser das chapas de aço realizado em uma empresa especializada do mesmo dono (FIGURA 3).

- Lixamento das chapas de aço com lixas de zircônio grão 150, lixa grão 100 e lixa de grão oca, com a finalidade principal de homogeneizar a superfície (FIGURA 4).
- Dobra das chapas (FIGURAS 5 e 6) e estribos (FIGURAS 7 e 8).
- Novo lixamento utilizando roda PG para dar acabamento.
- Anodização e pintura das peças: na anodização mergulham-se as peças em soluções ácidas e alcalinas, para criar uma película protetora às mesmas e receber as colorações desejadas (FIGURAS 9 e 10).
- *Silk* selagem das peças: este processo visa fechar os poros criados pela anodização, e busca dar ao material à máxima resistência a corrosão (FIGURA 11).
- Abrilhantamento das peças: este processo é caracterizado por mergulhar as peças em ácido nítrico ou fosfórico, com a intenção de dar uma superfície brilhante no material (FIGURAS 12 e 13).
- Gravação a laser de informações da caixa e de onde serão posicionados os silicones cirúrgicos (FIGURAS 14 e 15).
- Processo de rebite para fixação das chapas com outros elementos, como presilhas e fechaduras (FIGURAS 16 a 18).
- Processo de fixação de silicone usada para prender materiais cirúrgicos (FIGURAS 19 e 20).
- *Checklist* para verificar se as caixas estão dentro dos conformes (FIGURAS 21 e 22).
- Embalagem (FIGURA 23).
- Despacho de mercadorias para os clientes.

Figura 3 - Peças da caixa cortadas a laser.



Fonte: Do Autor (2022).

Figura 4 – Esmeril usado para lixar.



Fonte: Do Autor (2022).

Figura 5 – Dobradeira pneumática para dobra de chapas.



Fonte: Do Autor (2022).

Figura 6 – Chapas antes e após serem dobradas



Fonte: Do Autor (2022).

Figura 7 – Dobradeira manual de estribos.



Fonte: Do Autor (2022).

Figura 8 – Estribos antes e após serem dobrados



Fonte: Do Autor (2022).

Figura 9 – Estação de tratamento da água de anodização



Fonte: Do Autor (2022).

Figura 10 – Tanques de anodização



Fonte: Do Autor (2022).

Figura 11 – Quadros utilizados para selagem das peças.



Fonte: Do Autor (2022).

Figura 12 – Tanques para abrillantamento.



Fonte: Do Autor (2022).

Figura 13 – Peças secando após anodização, selagem e abrillantamento.



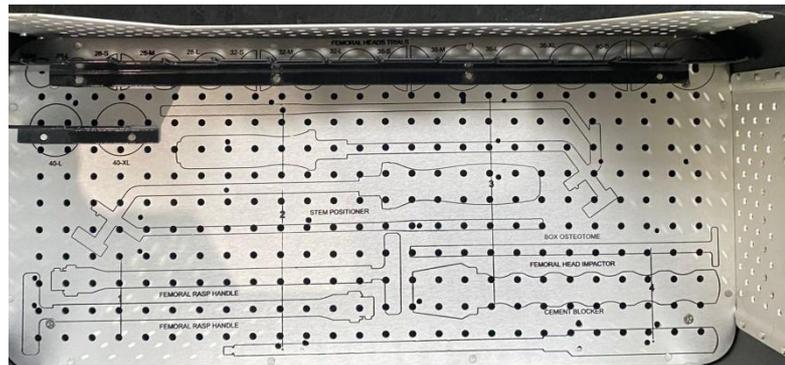
Fonte: Do Autor (2022).

Figura 14 – Gravadora a laser.



Fonte: Do Autor (2022).

Figura 15 – Fundo de caixa gravado a laser.



Fonte: Do Autor (2022).

Figura 16 – Rebitadeiras manuais



Fonte: Do Autor (2022).

Figura 17 – Rebites de aço inox 304 e 420.



Fonte: Do Autor (2022).

Figura 18 – Peça rebitada e com presilha.



Fonte: Do Autor (2022).

Figura 19 – Fixadora de silicone.



Fonte: Do Autor (2022).

Figura 20 – Fundo de caixa com silicone fixado.



Fonte: Do Autor (2022).

Figura 21 – Setor de *checklist*.

Fonte: Do Autor (2022).

Figura 22 - Modelos de caixas da empresa Hirose.



Fonte: Do Autor (2022).

Figura 23 – Caixas embaladas.



Fonte: Do Autor (2022).

1.2 Objetivos do Estágio

Os objetivos do estágio consistiram no estudo e projeto de uma rebidadeira e dobradeira pneumáticas, a fim de otimizar o tempo destes dois processos de fabricação, os quais eram feitos de formas totalmente manuais, apenas com o uso de uma alavanca simples presente nas carcaças dos equipamentos. Como objetivo específico buscou-se minimizar o custo do equipamento e melhorar a ergonomia, a qual era deficitária sem o auxílio da tecnologia pneumática.

1.3 Organização do Trabalho

O restante deste trabalho está organizado da seguinte forma: O Capítulo 2 apresenta o referencial teórico utilizado como embasamento para implementação do sistema pneumático, a saber, as propriedades dos materiais metálicos, processos de fabricação e tecnologia pneumática. O Capítulo 3 descreve sobre as atividades realizadas na empresa, a análise de viabilidade da tecnologia a ser utilizada, os requisitos definidos pelo supervisor, o cálculo de forças de deformação e a simulação no *software SolidWorks*. O Capítulo 4 discorre sobre os materiais utilizados no sistema pneumático exemplificados no *software* de projeto FluidSIM 5 *Demo*, além da análise de custos para obtenção destes elementos. Por fim no Capítulo 5 tem-se a conclusão do trabalho que visa sintetizar as contribuições do relatório.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

Este capítulo aborda todo o referencial teórico utilizado na elaboração dos projetos, a saber: propriedades essenciais dos materiais metálicos usadas para análises e cálculos das deformações dos materiais; processos de fabricação por conformação plástica, com ênfase em rebiteamento e dobramento; tecnologia pneumática explicada de forma geral para a elaboração dos projetos finais no *software* FluidSIM 5 DEMO.

2.1 Propriedades dos Materiais Metálicos

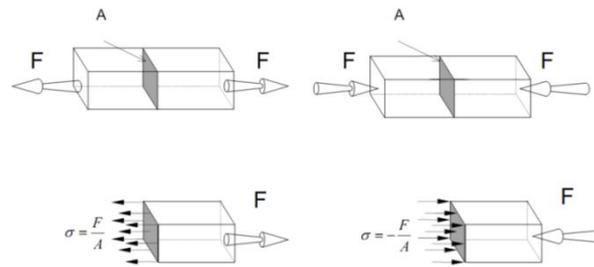
Segundo Chiaverini (1995), a maioria das indústrias se vale de metais ou ligas metálicas em suas cadeias produtivas, daí a necessidade de se conhecer com suficiente profundidade, os diversos tipos de materiais metálicos existentes. O emprego dos mesmos na engenharia e na indústria é fundamentado, principalmente, nas suas propriedades metálicas, as quais, por sua vez estão ligadas intimamente à estrutura do material.

2.1.1 Solicitação Mecânica

Todo tipo de força aplicada em um material, o deforma tanto em intensidade quanto na direção em que está sendo submetido, e, portanto, é de vital importância conhecer o tipo de solicitação que está sendo utilizada. Há quatro tipos de solicitações mecânicas, a saber, tração/compressão, flexão, cisalhamento e torção (BENTO, 2003).

A tração e compressão são semelhantes, sendo ambas aplicadas com uma carga normal à área de seção transversal da peça. O que as difere é a direção em que atuam. Na tração o esforço é aplicado visando esticar o material, com a deformação resultante deste, a sua área de seção transversal diminui. Já na compressão o esforço é aplicado para comprimir o material, conseqüentemente a deformação resulta no aumento da área de seção transversal. Estes processos podem ser observados na Figura 24 (BENTO, 2003).

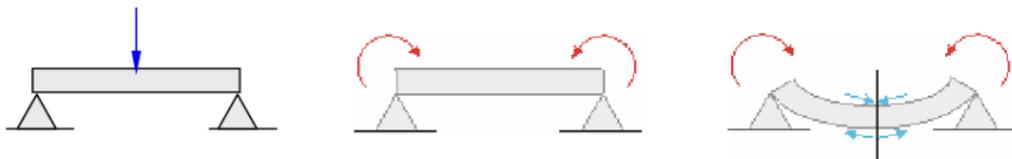
Figura 24 – Solicitações mecânicas de tração e compressão.



Fonte: Bento (2003).

A flexão tende a provocar curvatura nas peças, pois atua como uma carga normal aplicada transversalmente a área de seção transversal da peça, normalmente apoiada (FIGURA 25). Este tipo de solicitação provavelmente é o mais produzido nos elementos de máquinas, quando estes recebem ou transmitem esforços, atuando como vigas (BENTO, 2003).

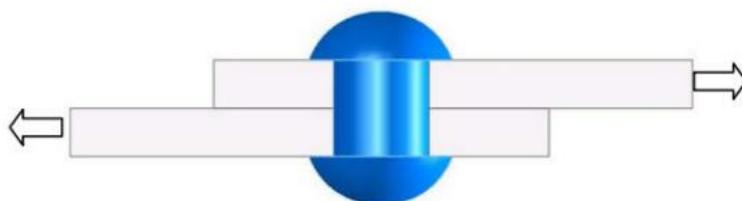
Figura 25- Solicitação mecânica de flexão.



Fonte: Bento (2003).

A solicitação de cisalhamento ocorre quando um corpo resiste a duas forças em sentidos opostos, agindo próximas, paralelas e transversalmente à área de secção da peça (FIGURA 26). Esta solicitação aparece em elementos que ligam diversas estruturas, como rebites, parafusos e pinos, uma vez que cada parte tende a se movimentar em uma direção diferente da outra (BENTO, 2003).

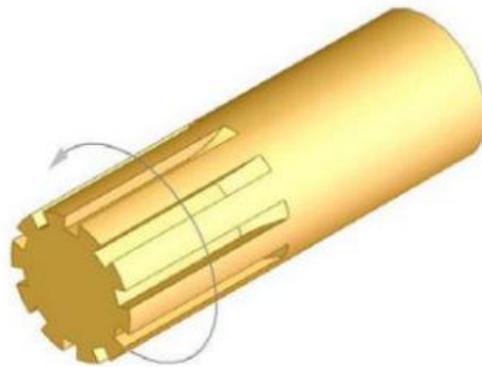
Figura 26 – Solicitação mecânica de cisalhamento.



Fonte: Bento (2003).

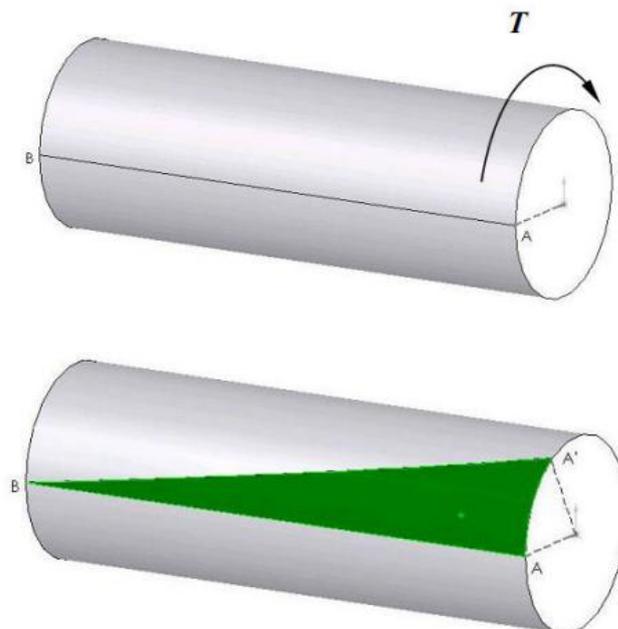
A solicitação de torção, por fim, tende a girar as seções de um corpo, uma em relação a outra, gerando rotação na peça (FIGURA 27). Esta ação é resistida pelo material, que produz uma torção de mesma intensidade e sentido oposto ao aplicado externamente. A região localizada entre estes dois planos se deforma, resultando em tensões internas no material, o que pode ser observado na Figura 28 (BENTO, 2003)

Figura 27 – Solicitação mecânica de torção.



Fonte: Bento (2003).

Figura 28 – Região de deformação da torção.

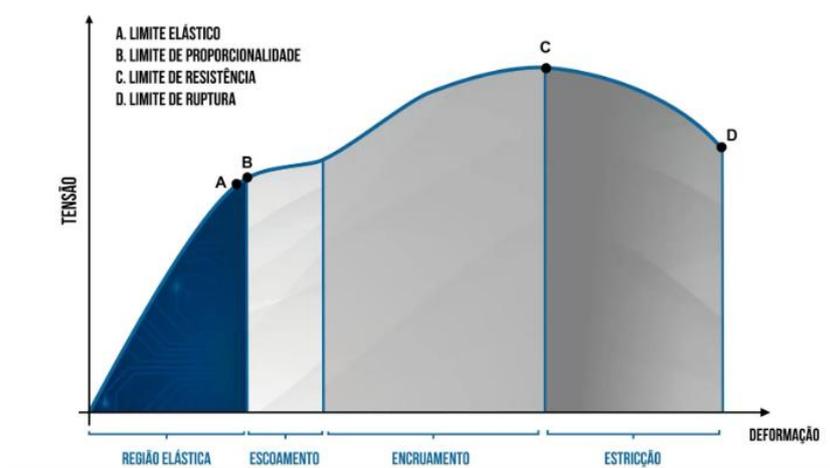


Fonte: Bento (2003).

2.1.2 Curva Tensão vs. Deformação

A curva de tensão vs. deformação de um material ilustra algumas características do mesmo, podendo, por exemplo, ser usada para determinar a proporcionalidade da deformação do material, bem como os locais em que a deformação deixa de ser elástica e torna-se plástica (irreversível), e o ponto de ruptura (FIGURA 29).

Figura 29 – Curva tensão vs. deformação.



Fonte: Biopdi (2022).

Os limites descritos na Figura 29 são por definição: limite elástico é o ponto máximo em que um material ainda tem deformação reversível e se deforma proporcionalmente à tensão; o limite de proporcionalidade possui deformação reversível, embora não tenha proporcionalidade entre tensão e deformação; o limite de resistência é definido como sendo o valor de tensão máxima que um material suporta antes que comece a diminuir até chegar ao limite de ruptura, ou seja, a fratura do material (BIOPDI, 2022);

O limite de escoamento, ilustrado na Figura 29 como região de escoamento, é o ponto onde se inicia a deformação irreversível (plástica) do material, ou seja, após ser deformado, ele não consegue voltar ao seu estado inicial como seria observado numa deformação elástica. Na grande maioria dos materiais, a transição do regime elástico para o plástico ocorre de forma lenta, não sendo definido exatamente onde começa o ponto de escoamento. Por este motivo, o limite de escoamento dos materiais é definido em uma faixa considerável de valores. (LUZ, 2017)

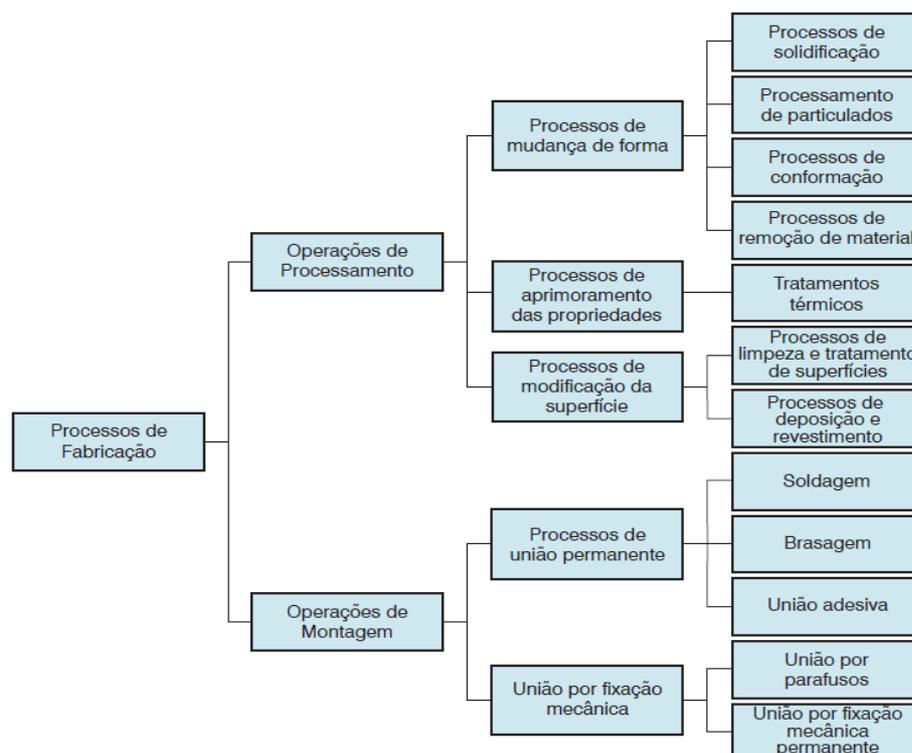
A tensão de ruptura, por fim, descrita na Figura 29 como limite de ruptura, é a força máxima sobre unidade de área, que um material suporta ser submetido, antes que sua estrutura rua, ou seja, a partir deste ponto o material fraturará. Isto acontece quando há um decréscimo da área de seção reta além do permitido para o limite de escoamento e quando mais dúctil for o material, maior será sua tensão de ruptura (SMITH, 1998).

2.2 Processos de Fabricação

De acordo com Groover (2014), um processo de fabricação se caracteriza pela transformação física e/ou química de um material com a finalidade de agregar valor ao mesmo. As operações de fabricação normalmente se encaixam em dois tipos principais, a saber: as operações de processamento e as operações de montagem. Na operação de processamento, os enfoques são a geometria, propriedades e acabamento dos materiais enquanto na operação de montagem, o enfoque normalmente é a união de peças, seja por fixação mecânica ou união permanente.

Uma classificação abrangente e clara dos tipos de processos de fabricação é ilustrada na Figura 30.

Figura 30 - Diagrama dos tipos de processos de fabricação



Fonte: Groover (2014).

Em ambos os processos há a necessidade do uso de alguma fonte de energia para mudar o material, podendo essa ser mecânica, química, térmica ou elétrica. Ademais, para que haja a transformação completa do material desejado, geralmente é necessário mais de um processo de fabricação.

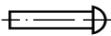
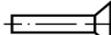
Na empresa em que foi realizado o estágio, trabalhou-se com dois processos de fabricação em particular, a rebiteagem e Dobramento, através dos quais se conforma o aço inox pela aplicação de uma força mecânica através de um circuito pneumático. Enquanto o primeiro caso permite a fixação mecânica das chapas, o segundo é usado para dobrar os estribos usados nas caixas de esterilização.

2.2.1 Rebiteagem

A rebiteagem é um processo de fabricação por conformação plástica, onde o rebite, que é um pino cilíndrico de metal, é posicionado em um furo em uma chapa metálica e conformado via impacto ou repuxo a fim de unir mecanicamente duas chapas metálicas. O processo é feito a quente ou a frio e normalmente proporciona bom acabamento nas peças.

Há diversos tipos de rebites, sejam eles sólidos ou semiocos como pode ser observado na Figura 31.

Figura 31 – Tipos de rebites

TIPOS DE REBITE	FORMATO DA CABEÇA	EMPREGO
	Cabeça redonda larga	Largamente utilizados devido à resistência que oferecem.
	Cabeça redonda estreita	
	Cabeça escareada chata larga	Empregados em uniões que não admitem saliências.
	Cabeça escareada chata estreita	
	Cabeça escareada com calota	Empregados em uniões que admitem pequenas saliências.
	Cabeça tipo panela	
	Cabeça cilíndrica	Usados nas uniões de chapas com espessura máxima de 7 mm.

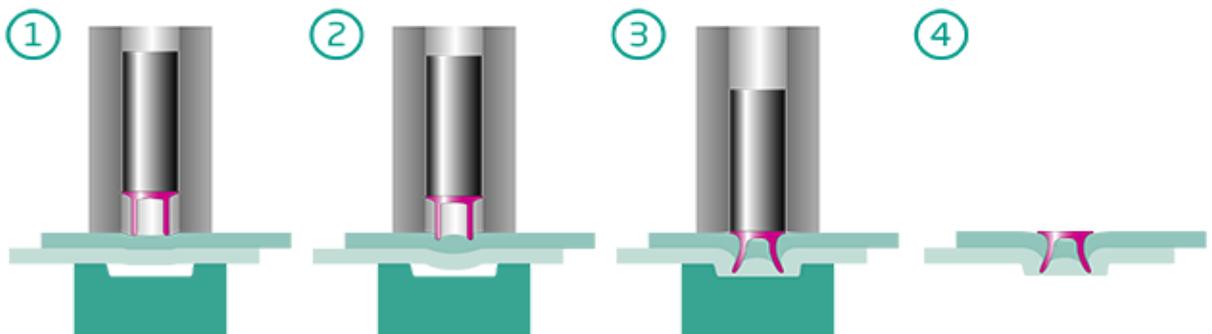
Fonte: Gordo (2000).

Na rebiteagem via impacto, há o uso de um martelo metálico, o qual, através do impacto, via ação direta ou com o uso de rotação, aplica uma força superior ao necessário para romper o limite de escoamento do material do rebite, para assim conformá-lo plasticamente, e unir as duas chapas necessárias. Ela pode ser feita manualmente, ou com auxílio de diferentes tecnologias pneumática, eletropneumáticas e hidráulicas. A força necessária para a deformação do rebite é calculada como segue:

$$F = P.A \quad (1)$$

Onde P é o limite de escoamento do material e A é a área de contato entre o cilindro pneumático e o rebite. A força calculada deve ser relativamente superior a encontrada na solução, já que é necessário garantir a conformação, pois os rebites, mesmo que sejam do mesmo material, possuem limites de escoamento diferentes entre si (FIGURA 32).

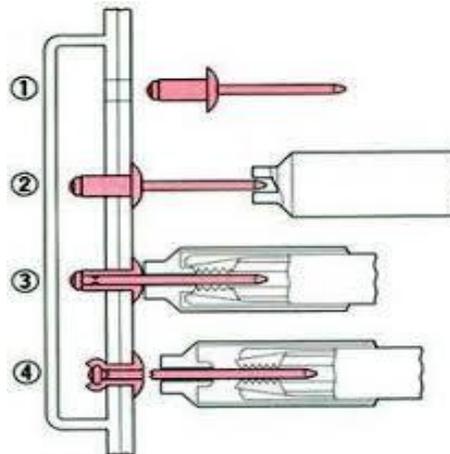
Figura 32 – Processo de rebiteagem via impacto



Fonte: Tox Pressotechnik (2022).

Na rebiteagem via repuxo, o rebite possui um mandril dentro da sua haste, o qual é encaixado na rebiteadeira para ser repuxado. Este tipo de rebiteagem é executado da seguinte maneira: o rebite é posicionado no furo da chapa; posteriormente a rebiteadeira puxa o mandril fazendo a cabeça do rebite expandir a extremidade da haste até seu travamento. Este rebite é chamado de rebite *POP*, devido ao barulho de quebra do mandril quando o rebite está totalmente deformado (FIGURA 33).

Figura 33 – Processo de rebitagem via repuxo



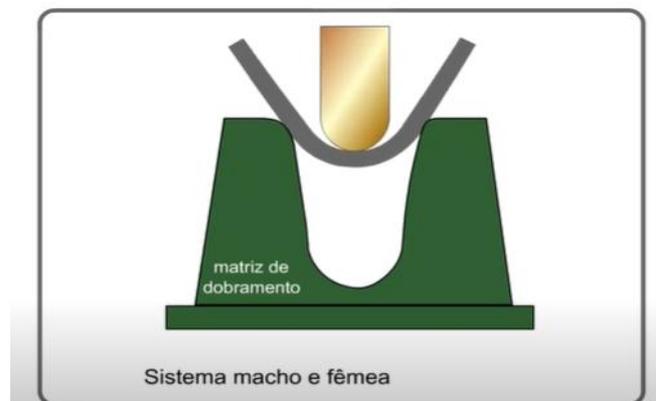
Fonte: Silo Tips (2022).

2.2.2 Dobramento

O dobramento é um processo de fabricação por conformação plástica, onde se aplica como o próprio nome diz, uma dobra no material, seja ele um estribo ou uma chapa, com um ângulo e espessura de dobra definidos. Há basicamente três tipos de dobramento, a saber: dobramento guiado, dobramento livre e dobramento semiguiado (CIMM, 2022).

No dobramento guiado, há um sistema de cutelo (prisma) e matriz, no qual se aplica uma força no prisma, que por sua vez deforma o material no formato da matriz, como observado na Figura 34 (CIMM, 2022).

Figura 34 – Processo de dobramento guiado.



Fonte: Cimm (2022).

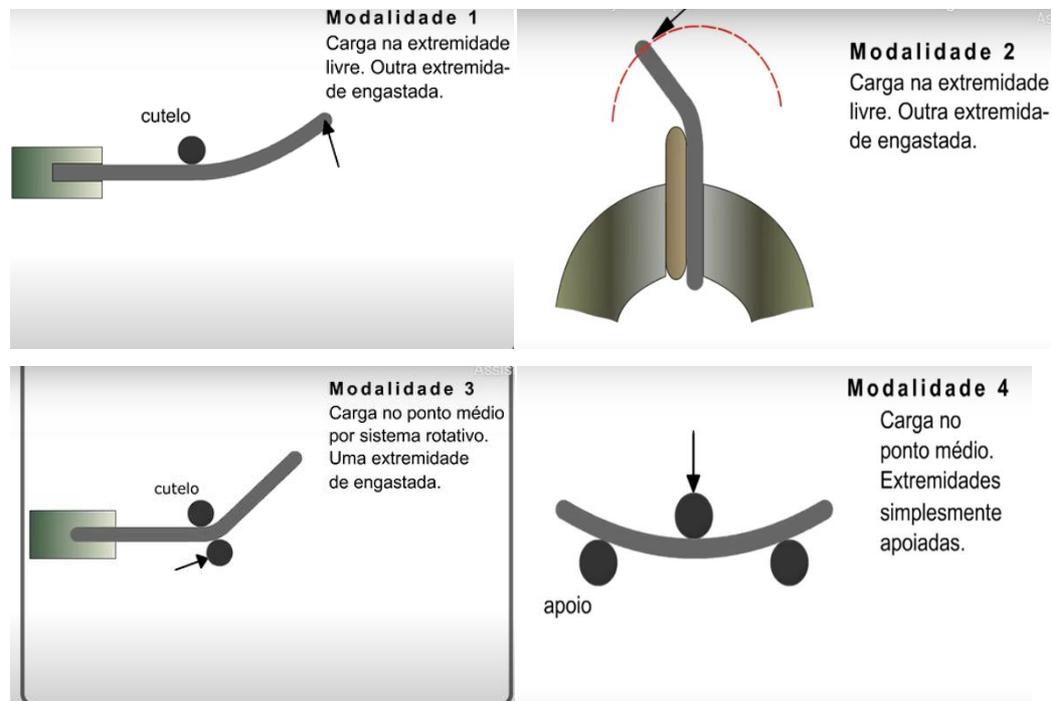
Este foi o tipo de dobramento escolhido para ser utilizado na empresa sendo a força necessária para executá-lo calculada da seguinte maneira (LOPES, 2019).

$$F = \frac{C.e^2.Le.Fc}{l} \quad (2)$$

Onde C é o comprimento de dobra desejado, e a espessura desejada, Le o limite de escoamento do material, Fc o fator de correção (tipicamente da ordem de 4/3) e l a largura da matriz.

O dobramento semiguiado, por outro lado, é bastante similar ao anterior. Sendo a única diferença o fato que neste tipo de dobra, uma das extremidades é engastada. Há diversas formas de realizar este tipo, como pode-ser observado na Figura 35.

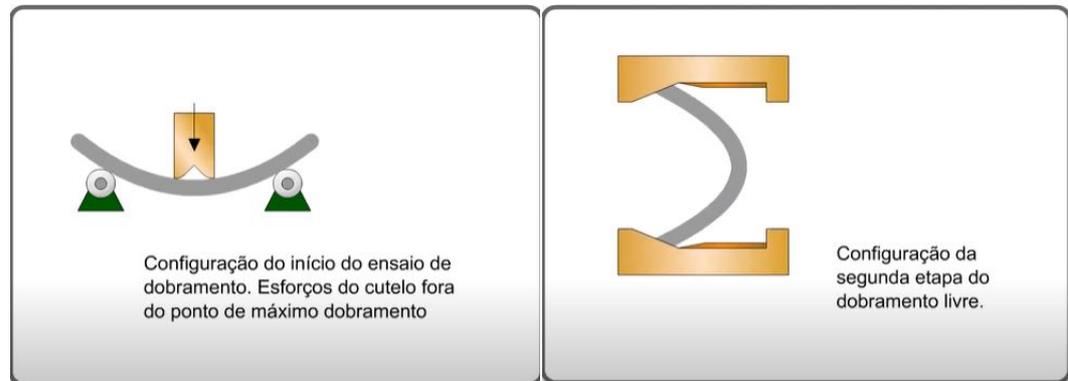
Figura 35 – Processos de dobramento semiguiado.



Fonte: Cimm (2022).

No dobramento livre, por fim, não há restrição quanto à forma de deformação e o apoio é feito por roletes ao invés de uma matriz. Ele se divide em duas etapas: na primeira etapa tem-se um comportamento similar ao dobramento guiado, onde uma força é aplicada no cutelo para deformar o material no primeiro ângulo desejado; posteriormente a dobra se dá pela aproximação forçada das suas extremidades. O processo pode ser observado na Figura 36 (CIMM, 2022).

Figura 36 – Processo de dobramento livre.



Fonte: CIMM (2022).

2.3 Pneumática

O fluido usado na geração de trabalho na pneumática, i.e., o ar apresenta como características básicas: compressibilidade, elasticidade, difusibilidade e expansibilidade. O ar possui peso e tem sua massa específica diminuída com a elevação de temperatura (PARKER, 2020).

Em um sistema pneumático, o primeiro elemento a ser idealizado é o compressor, o qual tem a função de elevar a pressão do ar e conseqüentemente proporcionar um aumento da força utilizada nos acionamentos (é necessário que o compressor tenha a capacidade de fornecer ar comprimido para todas as máquinas pneumáticas da fábrica). Em seguida deve-se selecionar a unidade de condicionamento a ser usada, identificar a quantidade de cilindros pneumáticos necessários ao processo e por fim, projetar o sistema para que o processo seja efetivo, atentando-se aos diferentes tipos de válvulas existentes.

2.3.1 Unidade de condicionamento (Lubrefil)

A unidade de condicionamento (Lubrefil) possui três funções no sistema pneumático: filtrar contaminantes presentes no ar comprimido, regular a pressão de ar e lubrificar os componentes com óleo (FIGURA 37).

Figura 37 – Unidade de Condicionamento (Lubrefil)



Fonte: Parker (2000).

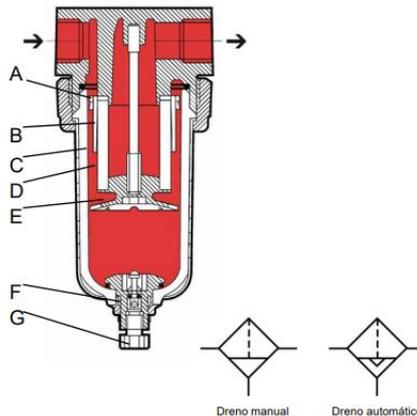
Os principais contaminantes presentes no ar comprimido são: particulados sólidos, água e óleo. Ao entrar no corpo do filtro do Lubrefil, o ar comprimido flui através do defletor superior causando um turbilhonamento do ar, através do qual as partículas sólidas e umidade presentes no mesmo são lançadas contra a parede do copo (FIGURA 38). Pela ação da gravidade, estes contaminantes escorrem pela parede do copo até chegar ao defletor inferior que separa os contaminantes maiores. Após esta primeira filtragem, o ar comprimido flui através do elemento filtrante, onde as menores partículas ficam retidas. Por fim, o ar retorna ao sistema pneumático, ao passo que os contaminantes se depositam no fundo do copo. Antes que a quantidade de contaminantes atinja um nível que possa recontaminar o ar comprimido, é necessário o uso de um dreno manual ou automático para que o filtro do Lubrefil seja limpo (OTTOSISTEMAS, 2012).

Figura 38 – Filtro de ar

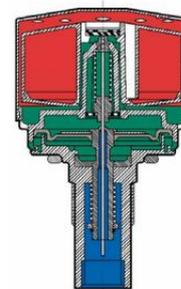
• Filtragem de ar

Secção de um filtro de ar comprimido

- A - Defletor superior
- B - Anteparo
- C - Copo
- D - Elemento filtrante
- E - Defletor inferior
- F - Dreno manual
- G - Manopla



Dreno automático



Fonte: Parker (2000).

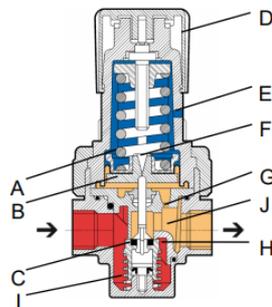
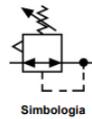
A regulagem de pressão na unidade Lubrefil se dá por meio de um êmbolo balanceado que permite que a pressão no sistema seja sempre a mesma independente da pressão de entrada (FIGURA 39). Em geral, um manômetro permite o monitoramento e ajuste da pressão que está sendo regulada (OTTOSISTEMAS, 2012).

Figura 39 – Regulador de pressão.

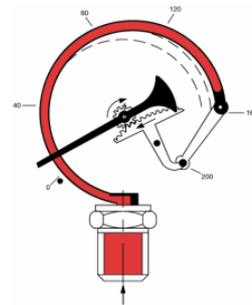
• Regulador

Secção de um regulador de pressão com escape

- A - Mola
- B - Diafragma
- C - Válvula de assento
- D - Manopla
- E - Orifício de exaustão
- F - Orifício de sangria
- G - Orifício de equilíbrio
- H - Passagem do fluxo de ar
- I - Amortecimento
- J - Comunicação com manômetro



Manômetro tipo tubo de Bourdon



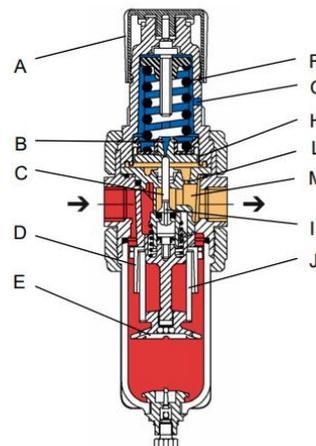
Fonte: Parker (2000).

Na unidade Lubrefil, o filtro e o regulador são geralmente combinados, como observado na Figura 40.

Figura 40 – Filtro regulador.

• Refil – Filtro regulador

- A - Manopla
- B - Orifício de sangria
- C - Válvula de assento
- D - Defletor superior
- E - Defletor inferior
- F - Mola
- G - Orifício de exaustão
- H - Diafragma
- I - Passagem do fluxo de ar
- J - Elemento filtrante
- L - Orifício de equilíbrio
- M - Comunicação com o manômetro



Fonte: Parker (2000).

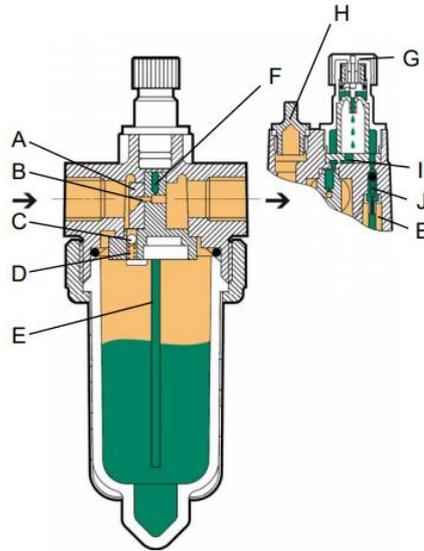
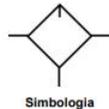
Por fim, o lubrificador da unidade de condicionamento protege os elementos móveis do sistema pneumático quanto a desgastes mecânicos, na medida que pinga gotículas de óleo automaticamente no ar pressurizado (FIGURA 41).

Figura 41 – Lubrificador.

• Lubrificador

Secção de um lubrificador

- A - Membrana de restrição
- B - Orifício venturi
- C - Esfera
- D - Válvula de assento
- E - Tubo de sucção
- F - Orifício superior
- G - Válvula de regulagem
- H - Bujão de reposição de óleo
- I - Canal de comunicação
- J - Válvula de retenção



Fonte: Parker (2000).

2.3.2 Atuadores pneumáticos

Segundo Moreira (2012) cilindro pneumático é um atuador mecânico responsável por aplicar uma força em um percurso linear. Ele é composto por três partes principais sendo elas: um tubo cilíndrico, um êmbolo e uma haste conectada ao êmbolo. Uma das extremidades (cabeçote traseiro) do cilindro é fechada, e a outra extremidade (cabeçote dianteiro) possui um orifício um pouco maior que o diâmetro do tubo cilíndrico responsável por aplicar a força (FIGURA 42).

Figura 42 – Cilindro pneumático padrão

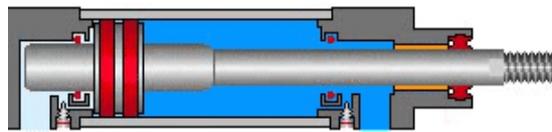


Fonte: Mti Brasil (2018).

Os diversos diferentes tipos de atuadores pneumáticos são:

- Cilindro de dupla ação: é o mais comumente utilizado na indústria, sendo o ar comprimido usado para mover o cilindro tanto para fins de extensão quanto de retração. Ele normalmente possui amortecimento ajustável, permitindo que o final de cada curso tenha sua velocidade diminuída a fim de evitar choques mecânicos e desgastes prematuros dos elementos móveis (FIGURA 43).

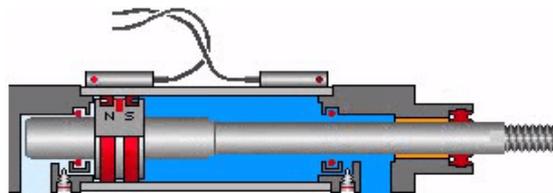
Figura 43 – Cilindro pneumático de dupla ação



Fonte: Mti Brasil (2018).

- Cilindro de dupla ação com pistão magnético: bastante similar ao anterior, exceto pelo fato de que pode-se determinar a posição exata do cilindro através de sensores acoplados no lado externo do mesmo e da existência de um êmbolo dotado de ímã. (FIGURA 44).

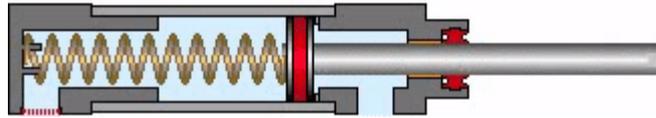
Figura 44 – Cilindro pneumático de dupla ação com pistão magnético.



Fonte: Mti Brasil (2018).

- Cilindro de simples ação com retorno por mola: como o próprio nome sugere, ele possui apenas o movimento de extensão e é geralmente empregado em aplicações que requerem um maior nível de segurança, já que a mola permite o cilindro recuar mesmo com falta de energia e/ou ar comprimido. Como desvantagem é relativamente mais caro que o de dupla ação, por possuir mais peças e ser mais complexo de se fabricar (FIGURA 45).

Figura 45 – Cilindro pneumático de simples ação com retorno por mola.



Fonte: Mti Brasil (2018).

- Cilindro sem haste: foi desenvolvido visando à economia de espaço, e seu funcionamento se dá por uma guia que se move linearmente sobre a extensão do cilindro, sem aumentar o tamanho deste. Ele possui particular emprego em aplicações que requerem altas velocidades de acionamento (FIGURA 46).

Figura 46 – Cilindro pneumático sem haste.



Fonte: Mti Brasil (2018).

- Mola pneumática: pode-se dizer que é a versão de simples ação do cilindro sem haste, onde a mola se estende quando há pressão, e retrai quando a pressão é removida. Embora possuam cursos curtos, elas requerem, em geral, um grande emprego de força no movimento (FIGURA 47).

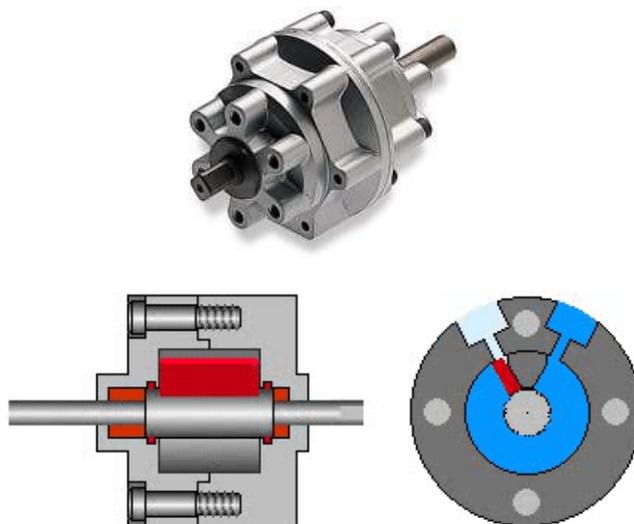
Figura 47 – Mola pneumática.



Fonte: Mti Brasil (2018).

- Cilindro rotativo de aleta: este cilindro realiza movimento rotatório na medida que suas aletas internas são pressionadas pelo ar comprimido. Ele exerce movimento rotatório limitado (de até 270 graus), o qual, contudo, pode ser regulado via pinos de ajuste (FIGURA 48).

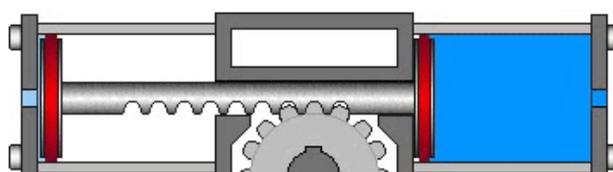
Figura 48 – Cilindro pneumático rotativo de aleta.



Fonte: Mti Brasil (2018).

- Cilindro rotativo de cremalheira: neste cilindro há a transformação do movimento linear de um pistão em movimento giratório, através de engrenagens internas. Ele normalmente é usado para comandar válvulas de processos maiores (FIGURA 49).

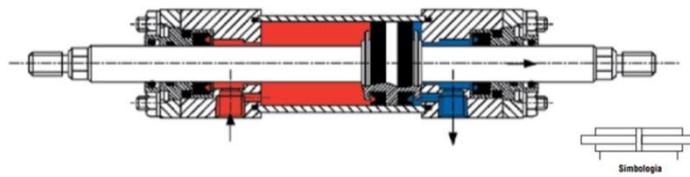
Figura 49 – Cilindro pneumático rotativo de cremalheira.



Fonte: Mti Brasil (2018).

- Cilindro com haste passante: este cilindro conta com hastes em seus dois lados, proporcionando força e movimento em ambas as direções. São normalmente empregados em correias transportadoras (FIGURA 50).

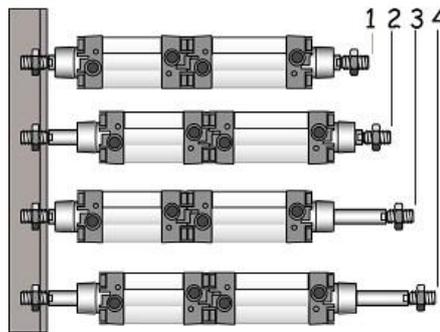
Figura 50 - Cilindro pneumático com haste passante



Fonte: Parker (2000).

- Cilindro com múltiplas posições: consiste basicamente, na união de dois ou mais cilindros, permitindo assim diferentes posições de atuação (FIGURA 51).

Figura 51 - Cilindro pneumático com múltiplas posições



Fonte: Mti Brasil (2018).

- Cilindro anti-giro: este possui guias que impedem que a haste gire no seu próprio eixo. É útil em algumas aplicações de posicionamento (FIGURA 52).

Figura 52 - Cilindro pneumático anti-giro.



Fonte: Mti Brasil (2018)..

- Cilindro com guia: é feito para suportar esforços contrários ao seu eixo, evitando que o mesmo se deforme (FIGURA 53).

Figura 53 – Cilindro pneumático com guia.



Fonte: Mti Brasil (2018).

- Cilindro com freio: neste cilindro, há uma trava montada em um dos cabeçotes que só é liberada quando ar comprimido é aplicado à mesma (FIGURA 54).

Figura 54 – Cilindro pneumático com freio.



Fonte: Mti Brasil (2018).

- Cilindro com curso ajustável: é um cilindro pneumático que pode ter o curso ajustado com o uso de um parafuso (FIGURA 55).

Figura 55 – Cilindro pneumático com curso ajustável.



Fonte: Klein Automação (2014).

2.3.3 Válvulas direcionais e auxiliares

Embora o cilindro pneumático seja o principal elemento de um sistema pneumático, até que ele seja acionado, há diversas válvulas que ditam como o seu funcionamento irá acontecer. Tais válvulas podem ser divididas em dois grandes grupos, a saber: válvulas direcionais e válvulas auxiliares.

As principais características de uma válvula direcional são a sua quantidade de posições (incluindo a posição inicial) e o número de vias. O número de posições é definido pela quantidade de manobras que uma válvula pode executar, e são normalmente identificadas na simbologia por quadrados (FIGURA 56).

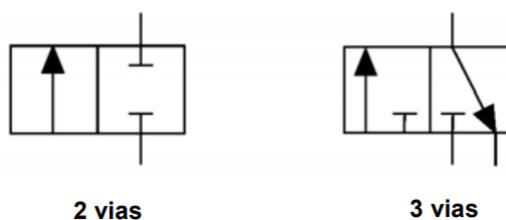
Figura 56 – Número de posições.



Fonte: Parker (2000).

O número de vias é definido pela quantidade de entradas e saídas que uma válvula possui. Estas são identificadas por traços externos ao quadrado indicativo da posição inicial da válvula, de forma que o símbolo de passagem indica duas vias e o símbolo de bloqueio indica uma via. É importante ressaltar que para se quantificar o número de vias analisa-se normalmente o quadrado da direita se a válvula for de duas posições e central caso seja de três posições (FIGURA 29).

Figura 57 – Número de vias.



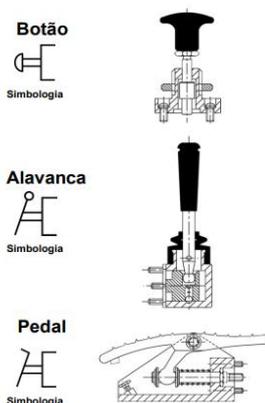
Fonte: Parker (2000).

A posição inicial para uma válvula de duas posições pode ser normal aberta (NA) ou normal fechada (NF). Na NA, a válvula em sua posição inicial permite a passagem de ar

comprimido e na NF, a válvula não permite essa passagem. Na válvula de três posições a posição inicial pode ser centro fechado (CF), centro aberto negativo (CAN) e centro aberto positivo (CAP). A válvula CF não permite passagem de ar comprimido, ao passo que a CAN redireciona o mesmo para a via de escape e no CAP para as vias de acionamento.

Além destas características das válvulas, pode-se classificá-las também quanto ao tipo de acionamento que se pretende empregar, a saber: força muscular, mecânica, pneumática, hidráulica e/ou elétrica. Válvulas de acionamento muscular podem ser operadas via botão, alavanca ou pedal e normalmente tem seu retorno por mola. Para colocá-las em funcionamento, basta usar a força física do operador para movimentar a alavanca ou pressionar botão ou mola (FIGURA 58).

Figura 58 – Válvulas com acionamento muscular.

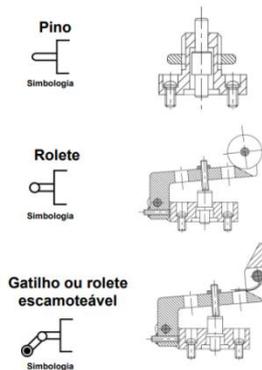


Fonte: Parker (2000).

Válvulas com acionamento mecânico operam através de um mecanismo, o qual, ao ser pressionado por algum movimento físico do sistema pneumático, normalmente por um cilindro, chaveia o seu elemento posterior. Estas válvulas são normalmente usadas em lógicas envolvendo início ou fim do curso dos pistões e são caracterizadas em três tipos: pino, rolete e gatilho.

A válvula pino é geralmente empregada quando há a necessidade do cilindro atuar axialmente sobre a válvula para que a mesma seja chaveada. A válvula rolete, por sua vez é usada quando o movimento do atuador é transversal. Neste caso o atuador bate no rolete e o movimenta para baixo chaveando a válvula. Tal tipo de acionamento mecânico é, em geral, recomendado, pois evita a compressão excessiva do mecanismo. O gatilho por fim, possui funcionamento idêntico ao rolete, exceto pelo fato que ele só comanda a válvula em um sentido do movimento do atuador (FIGURA 59).

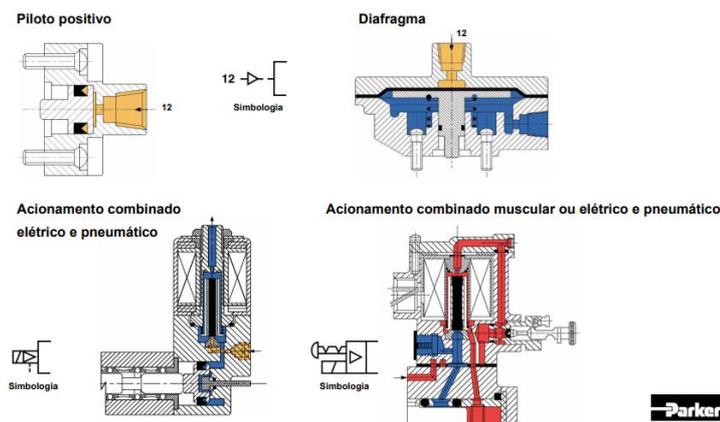
Figura 59 – Válvulas com acionamento mecânico.



Fonte: Parker (2000).

Os acionamentos pneumáticos e elétricos, como os nomes sugerem, dependem respectivamente da pressão do ar e da corrente elétrica, para chavear as válvulas e comandar a lógica de funcionamento do sistema. Nos acionamentos pneumáticos que dependem do ar comprimido do compressor para serem acionados, pode ser usado um diafragma para que haja menos contaminação na válvula. No acionamento elétrico por outro lado, emprega-se uma bobina/solenóide que possui um eletroímã no seu interior. Ao ser acionada eletricamente um campo magnético é gerado neste eletroímã o qual, proporciona movimento ao mesmo e chaveia a válvula correspondente (FIGURA 60).

Figura 60 – Válvulas com acionamento pneumático, elétrico e/ou combinado.

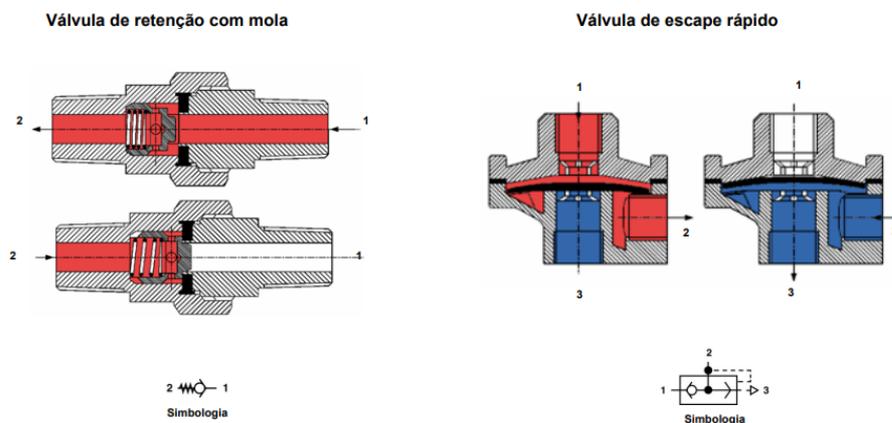


Fonte: Parker (2000).

As válvulas auxiliares são usadas para definir a lógica de funcionamento do sistema pneumático, controlar o fluxo/pressão de ar e desempenhar funções específicas. Os diversos tipos de válvulas auxiliares são discutidos a seguir.

A válvula de retenção com mola permite a passagem de ar comprimido apenas em uma direção, sendo normalmente usada em sistemas envolvendo levantamento de cargas. A válvula de escape rápido, por outro lado, é normalmente empregada diretamente conectada ao cilindro pneumático permitindo que o mesmo avance ou recue mais rapidamente que o normal. Esta válvula direciona o ar para avançar ou recuar o cilindro, sem que haja a necessidade do mesmo ter que passar por dentro da estrutura da válvula de controle direcional (FIGURA 61).

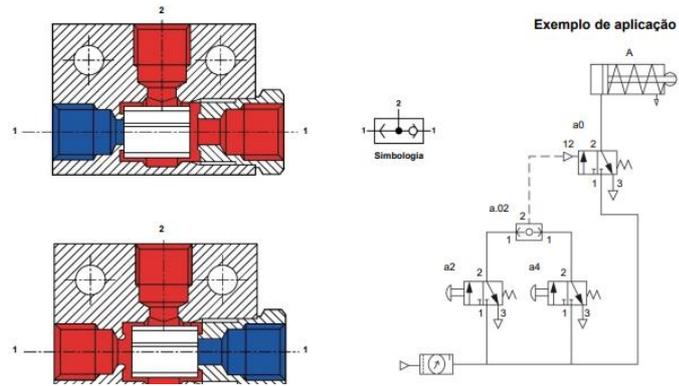
Figura 61 – Válvula de retenção com mola e válvula de escape rápido.



Fonte: Parker (2000).

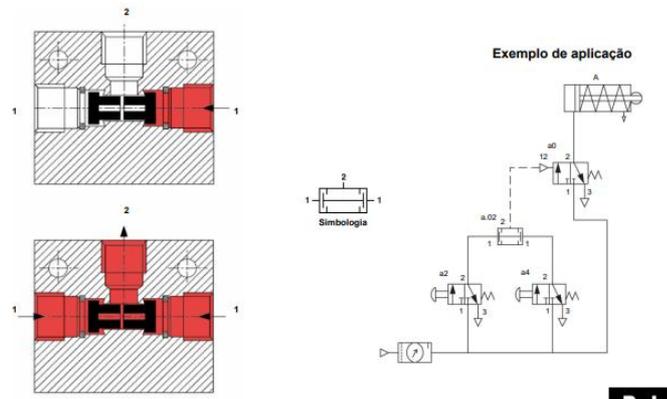
As válvulas auxiliares responsáveis pela implementação de lógicas booleanas são, a de isolamento (OU) e simultaneidade (E), as quais são normalmente usadas em operações com mais de um atuador, ou mais de um acionamento para uma válvula ou atuador. Na válvula de isolamento, quando há pressão em alguma de suas entradas, a esfera em seu interior move-se para o lado oposto bloqueando a passagem de ar de tal entrada (FIGURA 62). Já na válvula de simultaneidade, o mecanismo em seu interior só permite o chaveamento da válvula quando há pressão nas duas entradas. Caso haja pressão em apenas uma delas, não haverá passagem de ar para a saída (FIGURA 63).

Figura 62 - Válvula de isolamento/elemento OU.



Fonte: Parker (2000).

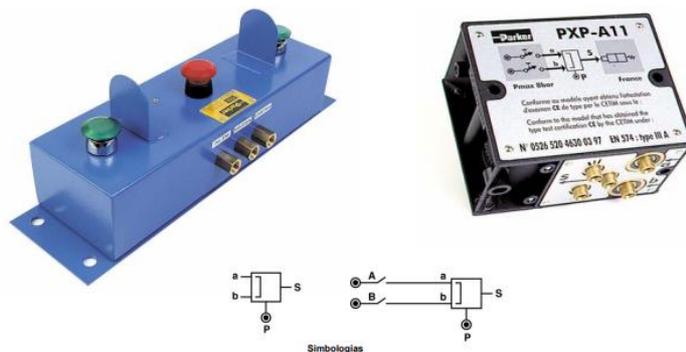
Figura 63 - Válvula de simultaneidade/elemento E.



Fonte: Parker (2000).

Outro exemplo de válvula auxiliar é o módulo de segurança bimanual, o qual funciona como uma válvula de simultaneidade mais sofisticada, onde a pressão nos dois pontos de entrada precisa ser aplicada concomitantemente para que haja o chaveamento da válvula (FIGURA 64).

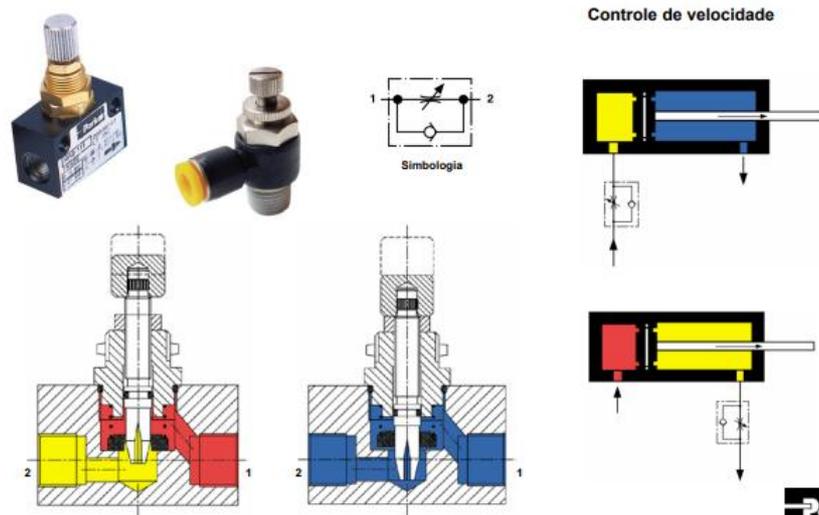
Figura 64 - Módulo de segurança bimanual.



Fonte: Parker (2000).

A válvula de controle de fluxo, por outro lado, permite que a velocidade de atuação dos atuadores do sistema pneumático seja controlada. Ela funciona como uma torneira: quanto mais fechada, menor a vazão e conseqüentemente menor a velocidade do atuador (FIGURA 65).

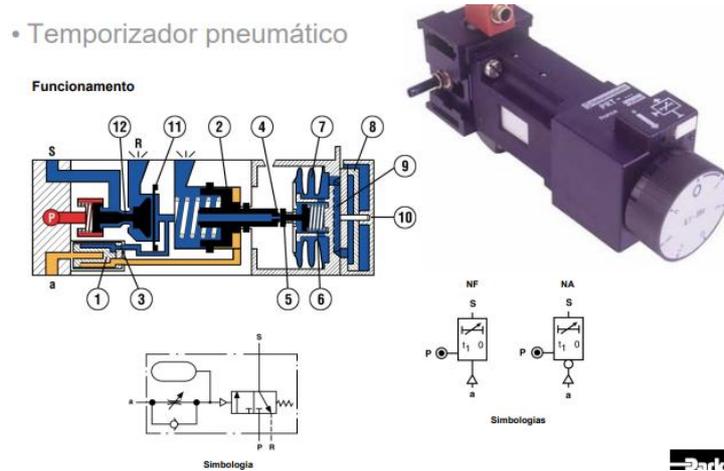
Figura 65 - Válvula de controle de fluxo.



Fonte: Parker (2000).

O temporizador pneumático é um acessório que realiza o acionamento ou desacionamento de uma válvula de controle direcional após o cumprimento de um requisito de tempo. Ele é constituído por uma válvula direcional 3/2 vias com retorno por mola, uma válvula de controle de fluxo e um reservatório de ar. Seu funcionamento se dá de acordo com o controle de fluxo do ar: quanto menor for o fluxo, mais o reservatório demorará a encher e conseqüentemente pilotar a válvula de controle direcional do temporizador. Quando, por outro lado, o fluxo for maior, o reservatório encherá mais rápido e assim a pilotagem da válvula direcional do temporizador também será mais veloz (FIGURA 66).

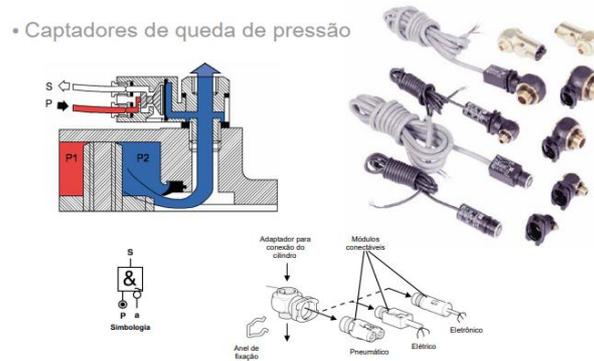
Figura 66 - Temporizador automático.



Fonte: Parker (2000).

Para que haja o retorno automático de um pistão, pode ser usado um captador de queda de pressão, o qual requer normalmente uma alimentação na rede pneumática. Quando o cilindro avança totalmente, o sensor do captador detecta uma queda de pressão, uma vez que sua entrada está conectada à saída do cilindro. Após esta detecção a saída do captador é chaveada e pilota a válvula direcional, recuando o cilindro (FIGURA 67).

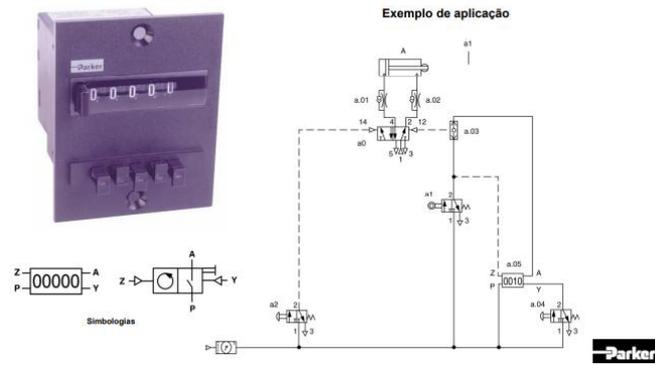
Figura 67 - Captador de queda de pressão.



Fonte: Parker (2000).

O elemento contador, diferentemente do temporizador, permite que seja feita uma contagem dos acionamentos ou desacionamentos de um pistão. Ao se atingir a contagem pré determinada, a saída do contador é chaveada, permitindo assim que seja feita uma atuação sobre o circuito, disparo de alarme, etc. Este elemento também permite que seja feito um *reset* na contagem, através da entrada *Y* observada na Figura 68.

Figura 68 - Contador pré determinado pneumático.



Fonte: Parker (2000).

3 METODOLOGIA

As atividades realizadas no âmbito do estágio envolveram dois dos processos de fabricação por conformação mecânica executados pela empresa, a saber, a rebitagem e o dobramento, os quais, até então, eram realizados por máquinas puramente manuais, onde através de uma alavanca se imprimia a força necessária para conformar o aço.

Uma vez verificado que a tecnologia pneumática atenderia às exigências da empresa, calculou-se as forças para conformar os materiais, simulou as através do *software* SolidWorks e o sistema pneumático foi projetado no *software* FluidSIM 5 *Demo*. O projeto foi encaminhado ao supervisor do estágio, após aprovação, os componentes pneumáticos fossem adquiridos, as máquinas manuais instrumentadas, e a automação idealizada para os processos da empresa implementada.

3.1 Atividades Realizadas

Em uma etapa inicial, investigou-se e verificou-se que a forma mais economicamente viável e simples de otimizar os processos e garantir a ergonomia dos mesmos, seria através do uso da tecnologia pneumática, já que a mesma é barata, robusta e eficiente para processos pequenos que não demandam um controle fino de velocidade, como os descritos anteriormente. Além disso, soma-se o fato de que a empresa já possui uma rede pneumática alimentada por dois compressores de ar, uma vez que a maior parte dos processos de fabricação da mesma, usa ar comprimido como energia.

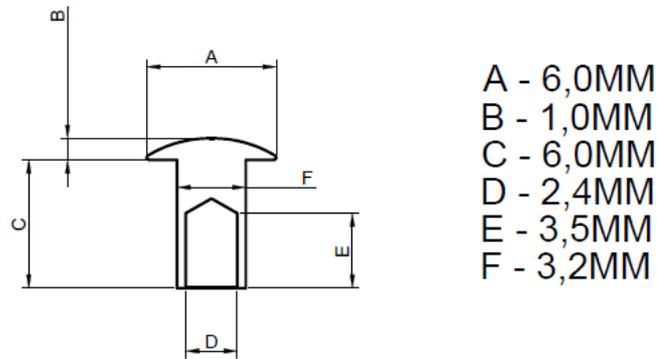
Escolhida a tecnologia, o supervisor definiu alguns requisitos que o sistema deveria possuir, a saber: (a) primeira foi que deveria ser utilizada uma válvula pedal para acionar o sistema, pois o operador precisa ter as duas mãos ocupadas para posicionar os metais a serem conformadas; (b) aproveitar as máquinas manuais já existentes na empresa, e, portanto, a rebitagem seria do tipo impacto e o dobramento seria do tipo prima/matriz; (c) o material do rebite deveria ser o aço 420 e o do estribo o aço 304; (d) por fim foi pedido que se reduzisse o máximo possível o custo dos equipamentos a serem adquiridos.

A primeira atividade relacionada diretamente ao projeto consistiu nos cálculos das forças necessárias para a conformação. De acordo com a equação (1), calculou-se a força para rebitagem, onde A foi calculado desconsiderando a área oca do rebite é:

$$A = \pi \cdot \left(\frac{D^2}{4} - \frac{(D - (D - e))^2}{4} \right) \quad (3)$$

Onde D é diâmetro do rebite e e sua espessura, de acordo com as especificações do rebite da Figura 69 tem-se:

Figura 69 – Especificações do rebite.



Fonte: Hirose.

$$e = F - D = 0.8 \text{ mm} \quad (4)$$

Logo

$$A = \pi \cdot \left(\frac{3.2^2}{4} - \frac{(3.2 - (3.2 - 0.8))^2}{4} \right) \quad (5)$$

$$A = \pi \cdot (2.56 - 1.44) \quad (6)$$

$$A = \pi \cdot 1.12 \quad (7)$$

$$A = 3.519 \text{ mm}^2 \quad (8)$$

De acordo com a equação (2) tem-se que:

$$F = PA \quad (9)$$

Onde $P = 450 \text{ MPa}$ é o limite de escoamento do aço inox 420.

E, portanto

$$F = 450 \text{ Mpa} \cdot 3.519 \text{ mm}^2 = 1583.55 \text{ N} = 161.422 \text{ kgf} . \quad (10)$$

Tendo a força sido calculada, foi consultada a Tabela 1 que indica que para uma pressão de trabalho variando de 7-10 bar, o menor cilindro que atende a força necessária é o de 63 mm.

Tabela 1 – Força do cilindro pneumático em kgf para diferentes diâmetros.

DIÂMETRO interno da camisa (mm)	Diâmetro haste (mm)	Rosca da haste	Rosca para conexões	FORÇA DO CILINDRO em kgf									
				2 bar		4 bar		6 bar		8 bar		10 bar	
				Extensão	Retração	Extensão	Retração	Extensão	Retração	Extensão	Retração	Extensão	Retração
10	4	M4x0,7	M5	1,6	1,3	3,2	2,7	4,8	4,0	6,4	5,4	8,0	6,7
12	6	M6x1,0	M5	2,3	1,7	4,6	3,5	6,9	5,2	9,2	6,9	11,5	8,6
16	6	M6x1,0	M5	4,1	3,5	8,2	7,0	12,3	10,6	16,4	14,1	20,5	17,6
20	8	M8x1,25	G 1/8"	6,4	5,4	12,8	10,8	19,2	16,1	25,6	21,5	32,0	26,9
25	10	M10x1,25	G 1/8"	10,0	8,4	20,0	16,8	30,0	25,2	40,0	33,6	50,1	42,0
32	12	M10x1,25	G 1/8"	16,4	14,1	32,8	28,2	49,2	42,3	65,6	56,4	82,0	70,5
40	16	M12x1,25	G 1/4"	25,6	21,5	51,3	43,1	76,9	64,6	102,5	86,1	128,1	107,6
50	20	M16x1,5	G 1/4"	40,0	33,6	80,1	67,3	120,1	100,9	160,2	134,5	200,2	168,2
63	20	M16x1,5	G 3/8"	63,6	57,2	127,1	114,3	190,7	171,5	254,3	228,7	317,9	285,8
80	25	M20x1,5	G 3/8"	102,5	92,5	205,0	185,0	307,5	277,5	410,0	370,0	512,6	462,5
100	25	M20x1,5	G 1/2"	160,2	150,2	320,3	300,3	480,5	450,5	640,7	600,7	800,9	750,8
125	32	M27x2,0	G 1/2"	250,3	233,9	500,5	467,7	750,8	701,6	1.001,1	935,5	1.251,4	1.169,4
160	40	M36x2,0	G 3/4"	410,0	384,4	820,1	768,8	1.230,1	1.153,3	1.640,2	1.537,7	2.050,2	1.922,1
200	40	M36x2,0	G 3/4"	640,7	615,1	1.281,4	1.230,1	1.922,1	1.845,2	2.562,8	2.460,3	3.203,5	3.075,3
250	50	M42x2,0	G 1"	1.001,1	961,0	2.002,2	1.922,1	3.003,3	2.883,1	4.004,4	3.844,2	5.005,5	4.805,2
320	63	M48x2	G 1"	1.640,2	1.576,6	3.280,4	3.153,2	4.920,6	4.729,8	6.560,7	6.306,5	8.200,9	7.883,1

Fonte: Mti Brasil (2018).

O comprimento da dobra tem aproximadamente 6 mm e a espessura de dobra possui valor próximo ao diâmetro do estribo de 4.7 mm, como pode ser observado na Figura 70.

Figura 70 – Estribo dobrado.



Fonte: Do autor (2022).

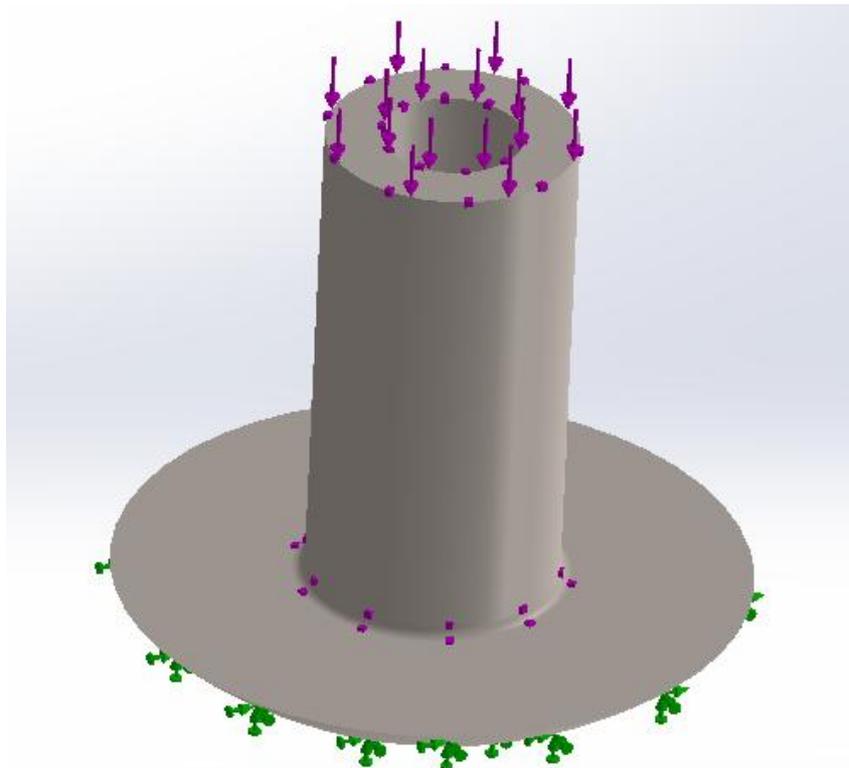
O limite máximo de escoamento do aço 304 é de 350 MPa, e a largura da matriz é de 35 mm. Logo tem-se através da equação (2) que:

$$F = \frac{6.4.7^2.350.1.33}{35} = 1762.78 \text{ N} = 179,69 \text{ kgf} \quad (11)$$

De acordo com a Tabela 1, o menor cilindro que atende a essa força é o cilindro de 63 mm.

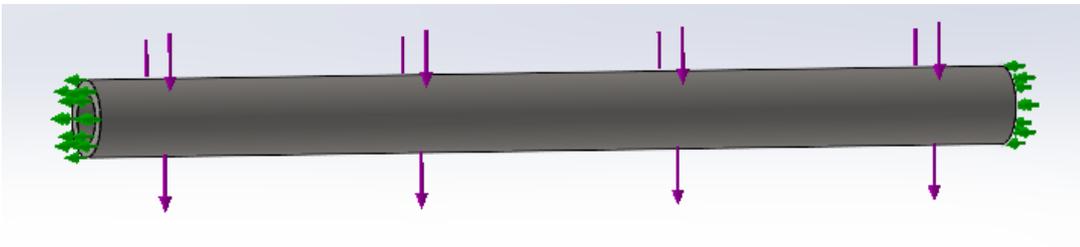
Visando verificar se as forças calculadas conseguiriam de fato deformar os materiais, foi elaborada uma simulação no *software* SolidWorks. Para a rebitagem, foi encontrado no SolidWorks, um rebite com aproximadamente as mesmas especificações dos usados na rebitadeira. Já para a dobramento foi criado um estribo com as mesmas especificações do usado na empresa (FIGURAS 71 e 72). Para executar a simulação é necessário primeiramente definir o tipo de simulação, em seguida aplicar o material da peça e fixar a peça onde ela normalmente é fixada (no rebite se considera a base). O estribo é apoiado na matriz e dobrado de forma guiada, onde se move a matriz de encontro a um cilindro de diâmetro superior ao estribo, para que possa dobrá-lo em um ângulo de 90°, devido ao comportamento elástico do material a matriz possui um ângulo de dobra aproximado de 97°. Posteriormente às fixações dos elementos é criada a malha e aplicada o tipo e intensidade da força calculada.

Figura 71 – Rebite da biblioteca do SolidWorks.



Fonte: Do Autor (2022).

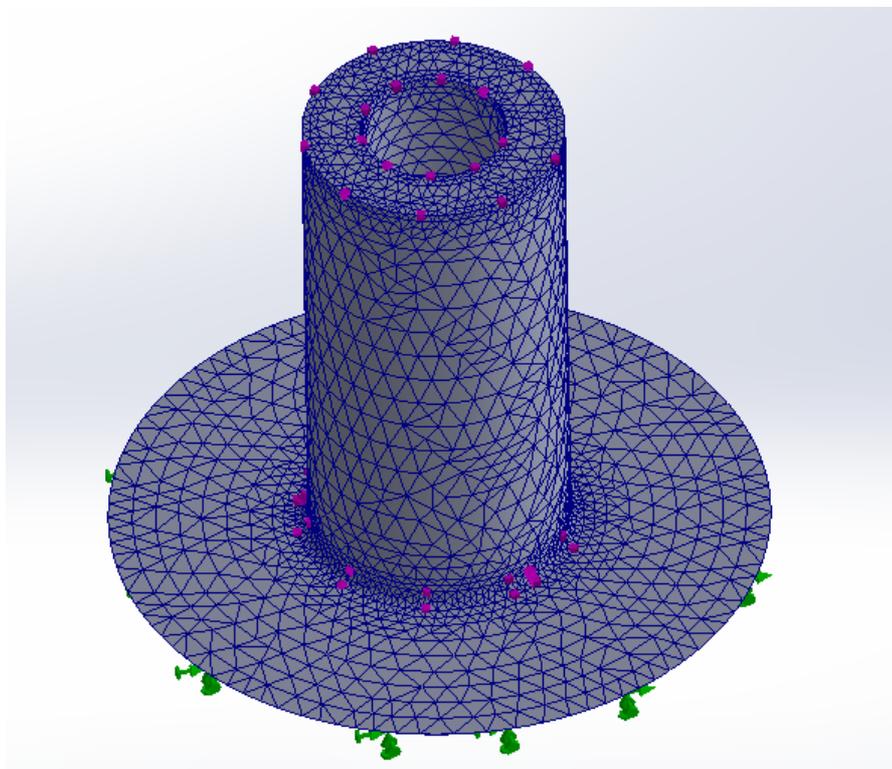
Figura 72 – Estribo criado no SolidWorks.



Fonte: Do Autor (2022).

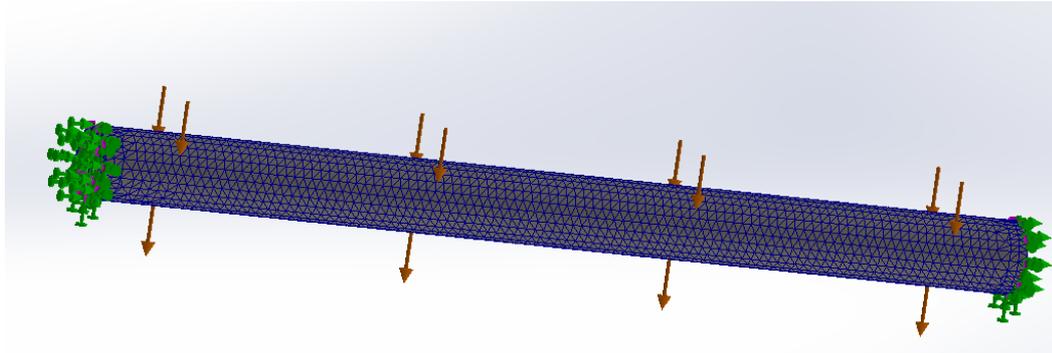
Para as malhas, foi necessário aplicar primeiramente uma configuração mais geral em toda peça, com tamanho de (12 ± 0.6) mm de aresta nos polígonos da malha, para em seguida, se implementar um controle mais refinado nas arestas, com tamanho de 0.6 mm, o tamanho mínimo que o computador conseguia processar os cálculos do *software* em tempo hábil. Ao se calcular as tensões nas arestas, ocorrem ângulos de 90° que fazem com que surjam tensões muito além das obtidas na prática, devido aos cálculos envolvendo cossenos do SolidWorks (FIGURAS 73 e 74).

Figura 73 – Malha gerada no rebite.



Fonte: Do Autor (2022).

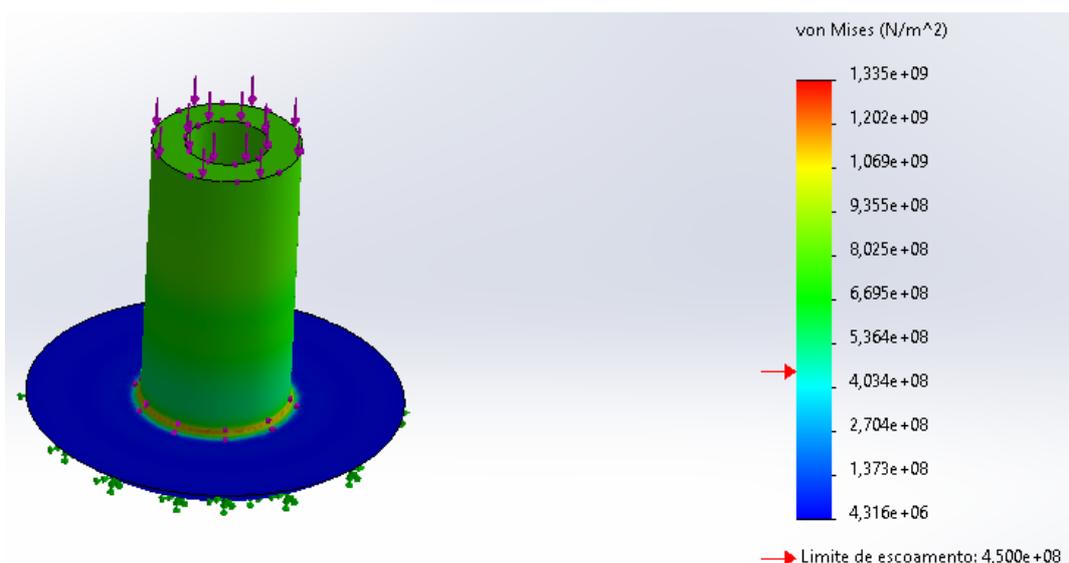
Figura 74 – Malha gerada no estribo.



Fonte: Do Autor (2022).

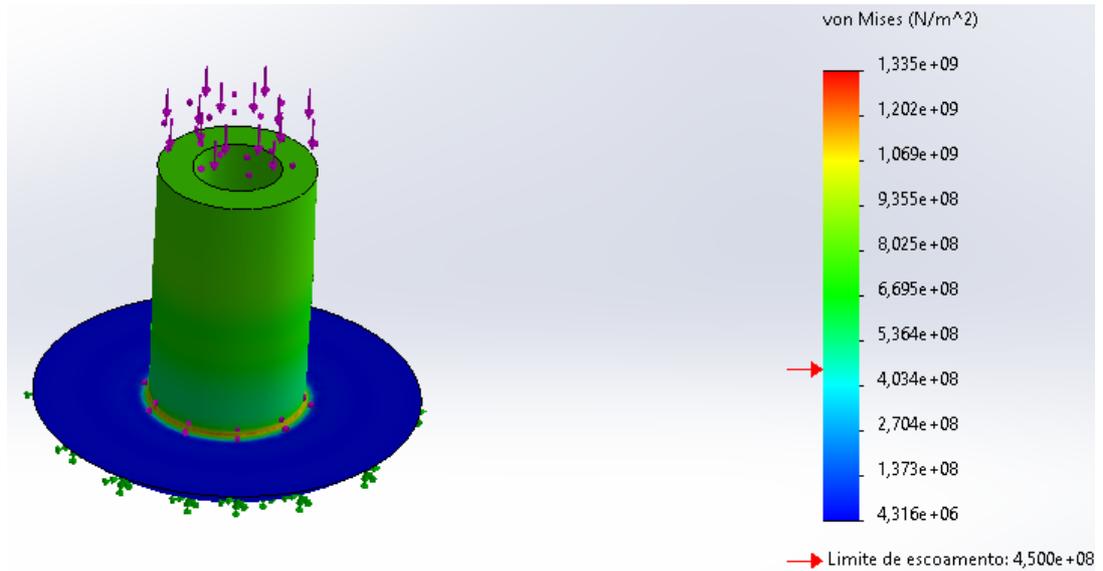
A simulação para o rebite foi conduzida usando uma força de 1700 N, levemente superior ao calculado, e, como resultado, observou-se os comportamentos esperados. Toda a parte do rebite que requeria uma força acima do limite de escoamento foi conformada, como pode ser verificado na comparação da Figura 75 com a Figura 76. Nestas figuras, as flechas indicativas de onde ocorreu a deformação ficam espaçadas, comprovando que houve compressão no rebite. Toda a cor acima da flecha do limite de escoamento indicou onde o rebite foi conformado aplicando-se a força de 1700 N. O esperado neste tipo de processo é que todo o corpo cilíndrico do rebite seja pressionado o máximo possível para a fixação das peças.

Figura 75 – Simulação de compressão sofrida pelo rebite.



Fonte: Do Autor (2022).

Figura 76 – Deformação do rebite.

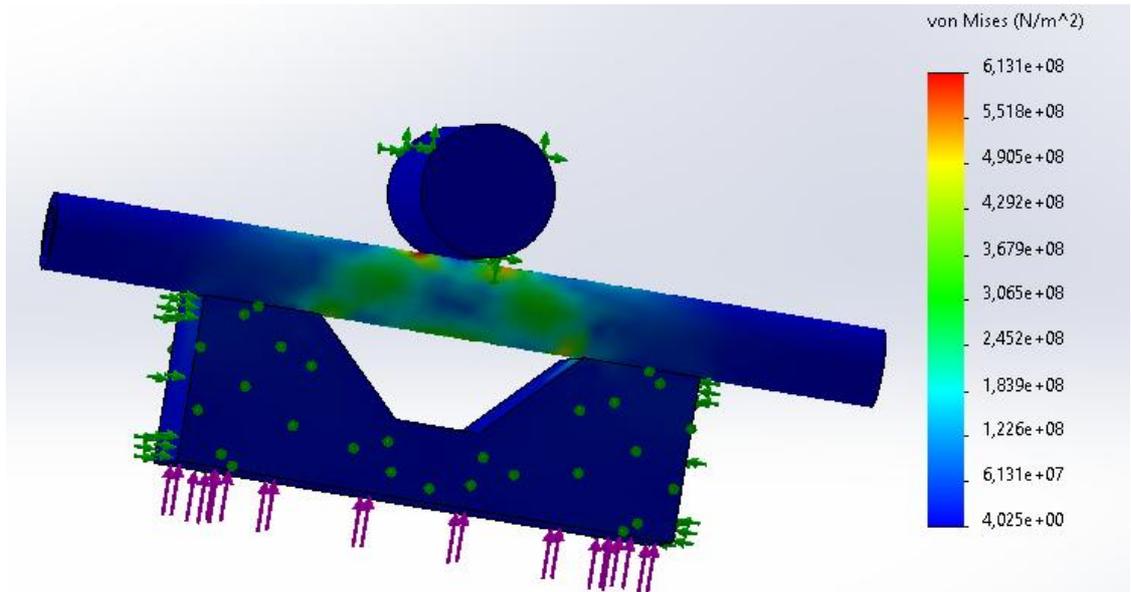


Fonte: Do Autor (2022).

É importante notar que o problema de refino da malha nas arestas é difícil de ser resolvido completamente, como pode ser observado principalmente no final do cilindro do rebite, onde há uma tensão significativamente superior ao limite de escoamento do material (Figura 76), para amenizar estes efeitos é necessário reduzir ao máximo o tamanho dos polígonos da malha, contudo, precisa-se de um grande poder computacional fora dos padrões de uma máquina pessoal. Normalmente para simulações complexas e refinadas em universidades e empresas de grande porte usa-se um *cluster*, ele possui elevado custo financeiro, e a principal vantagem encontrada neste sistema, é que o mesmo conecta diversos computadores para que trabalhem como um só, dividindo entre eles todo o processamento necessário em um processo computacional, economizando drasticamente o tempo gasto.

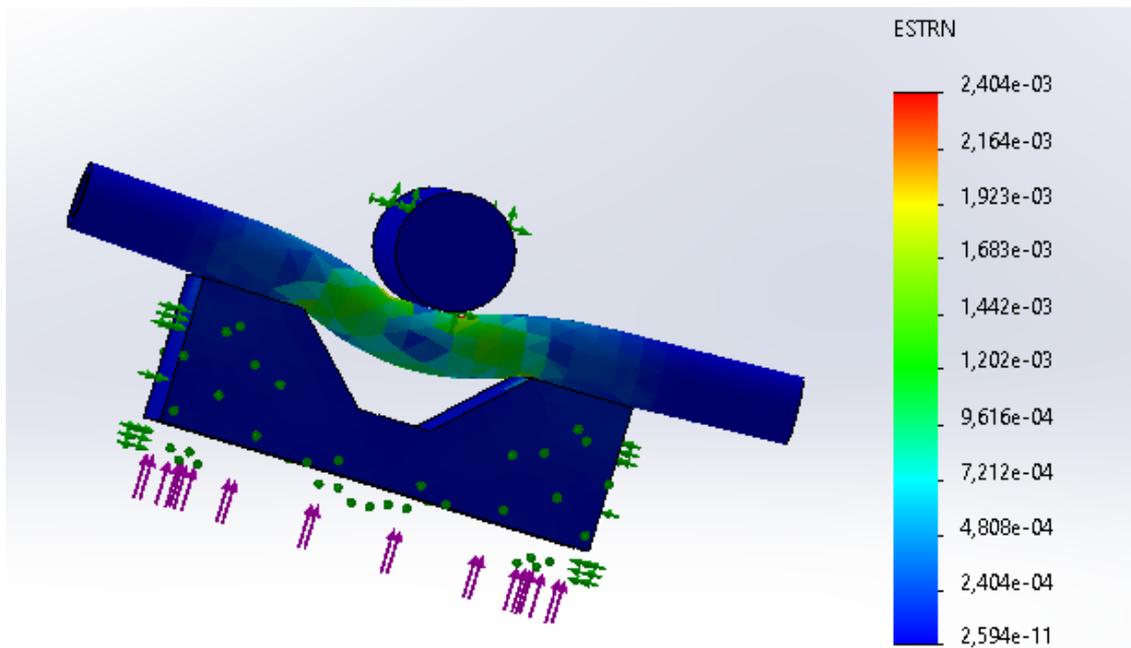
Para a simulação do estribo definiu-se uma força de 1800 N, também levemente superior ao calculado, nesta simulação foi necessário inserir o sistema de cutelo e matriz, pois o estribo precisa estar apoiado para a dobra e precisa ser conformado no formato do pino. Ao contrário da simulação com o rebite, não se analisou o limite de escoamento para verificar se a conformação estava adequada, a análise se baseou nos pontos onde a tensão é maior (cor verde a vermelha), os quais deverão se conformar na direção do pino da dobradeira, como ressaltado na comparação da Figura 77 com a Figura 78, é importante ressaltar que toda tensão aplicada nesta simulação foi inferior ao limite de ruptura do material de 700 MPa, e, portanto, a simulação indica que não haverá fraturas na peça.

Figura 77 – Simulação de tensão sofrida pelo estribo.



Fonte: Do Autor (2022).

Figura 78 – Deformação do estribo.



Fonte: Do Autor (2022).

4 RESULTADOS E ANÁLISES

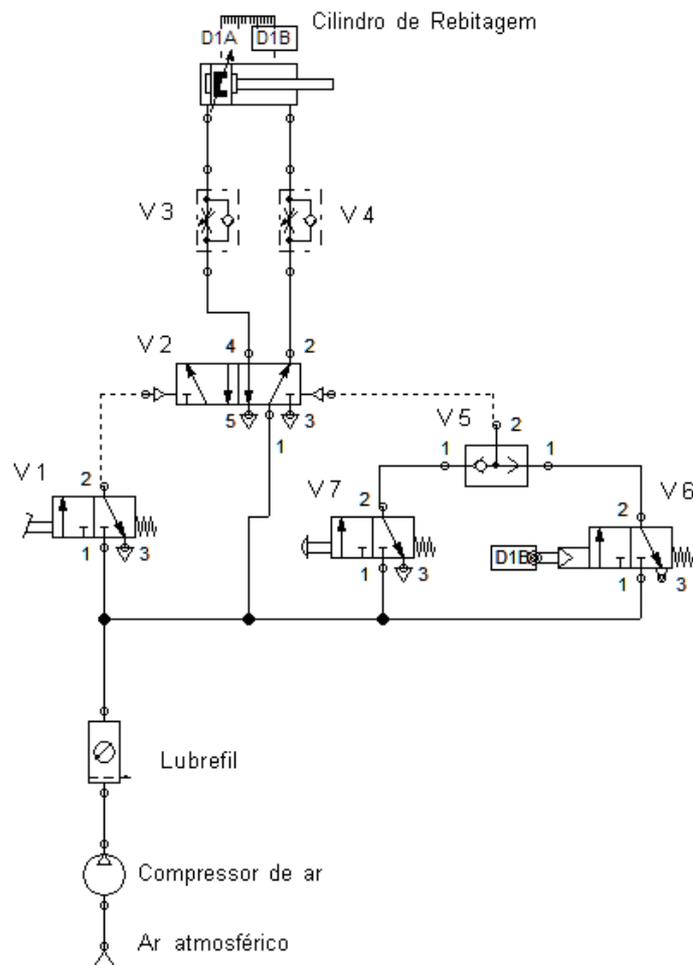
Conforme mencionado anteriormente empregou-se o *software* FluidSIM *Demo* para projeto do circuito pneumático, o qual foi o mesmo tanto para a rebidadeira quanto para a dobradeira (FIGURA 76).

Observou-se primeiramente, que haveria a necessidade de apenas um cilindro para cada projeto, uma vez que se tratam sistemas simples de avanço e retorno, sem a necessidade de outro cilindro auxiliar para fixação. As válvulas escolhidas para cada sistema como um todo foram:

- 1 cilindro pneumático de dupla ação.
- 1 válvula direcional 3/2 vias (V1) para realizar o comando.
 - A via 1 da válvula conecta-se à rede pneumática, a via 2 aciona a válvula piloto e a via 3 é a de escape.
 - O acionamento é por pedal mecânico e o retorno por mola.
- 1 válvula duplo piloto pneumático 5/2 vias (V2) para controlar o pistão.
 - A via 1 conecta-se a rede pneumática, as vias 2 e 4 conectam-se cada qual a uma válvula de controle de fluxo, a via 3 é a de escape e a via 5 conecta-se à válvula de detecção de queda de pressão.
 - O acionamento e retorno são feitos por piloto pneumático
- 2 válvulas de controle de vazão unidirecionais (V3 E V4) para regular o fluxo de ar no avanço e retorno do cilindro.
- 1 válvula de isolamento (V5) para fazer lógica OU com botão de segurança.
 - A via 1 da válvula conecta-se à válvula botão, a via 2 aciona a válvula de controle de fluxo que retorna o cilindro e a via 3 conecta-se a válvula de detecção de queda de pressão.
- 1 válvula 3/2 vias de detecção de queda de pressão (V6) através de um sensor.
 - A via 1 da válvula conecta-se a rede pneumática, a via 2 aciona a válvula de controle de fluxo para o retorno do cilindro após detectar a queda de pressão advinda do avanço total do pistão e via 3 é a de escape.
- 1 válvula 3/2 vias (V7) para recuar o pistão caso o sensor de detecção falhe.

- A via 1 da válvula conecta-se à rede pneumática, a via 2 aciona a válvula de isolamento e a via 3 é a de escape.
- Acionamento por botão e retorno por mola.
- 1 bloco distribuidor para conectar todas as válvulas necessárias no compressor de ar.
- 1 unidade de condicionamento Lubrefil conectada diretamente aos compressores para lubrificar, regular e filtrar o ar comprimido.
- Garrafas de óleo lubrificante de 1L.

Figura 79 – Esquemático do sistema pneumático no *software* FluidSIM.



Fonte: Do Autor (2022).

Ressalta-se que no esquemático da Figura 79 há uma válvula rolete ao invés do captador de queda de pressão. Isso se deve à ausência do mesmo nas bibliotecas do *software*, porém o funcionamento do circuito não sofre alteração, na válvula rolete (V6) está designado uma etiqueta, a qual o fim de curso do cilindro, para posterior chaveamento a válvula piloto,

no captador de queda de pressão o funcionamento é praticamente o mesmo, ao detectar a queda de pressão ao final do curso do cilindro, o mesmo chaveará da mesma forma o cilindro de rebitagem.

O preço de cada componente foi estimado usando diferentes sites que vendem elementos pneumáticos, a saber, Mercado Livre, PahCautomação, Polybelt, Meu Compressor, Rigel Pneumáticos, ViewTech, Automação24, Recopeças, Versátil Automação, Budin Ferramentas, Hidráulica Tóquio, Cadiriri, Loja Politone, Carajás Online, e Loja do Mecânico. O preço médio de cada item, calculado como base em, no mínimo, dois orçamentos, é ilustrado na Tabela 2:

Tabela 2 – Valores médios das peças do sistema pneumático projetado.

Peças	Preço médio
Cilindro pneumático 63 mm	402,88
Válvula pedal	168,25
Válvula piloto	82,44
Válvulas reguladoras de fluxo	202,42
Válvula de isolamento	59,66
Válvula detector queda de pressão	262,16
Válvula botão	177,16
Bloco Distribuidor	73,20
Lubrefil	1474,43
Total rebitadeira	2184,87
Total dobradeira	2184,87

Fonte: Do Autor (2022).

Posterior à escolha do circuito pneumático necessário para os processos, foi idealizado os projetos dos corpos das máquinas. Nesta etapa foi observado que bastaria adaptar as máquinas pré-existentes para que elas conseguissem suportar o circuito pneumático, de modo que o mesmo ficasse parcialmente escondido para evitar acidentes e desgastes com o tempo.

O cálculo do gasto com óleo lubrificante estimado por dia, mês e ano pode ser visto na Tabela 3. Este cálculo foi baseado supondo-se um gotejamento 5 gotas de óleo por minuto na rede pneumática, cada gota de óleo tem volume aproximado 0,2 mL; logo, deverá ser inserido na rede pneumática 1 mL de óleo por minuto e 60 mL por hora. Em média a rede pneumática

opera 10 horas e meia por dia na empresa, portanto serão 630 mL gastos ao final do dia (ZANATTA, 2020).

Tabela 3 – Preço médio de óleo gasto em diferentes períodos de tempo.

Gastos com óleo	Preço médio
Unidade de garrafa de óleo lubrificante 1L	36,12
Óleo gasto em um dia	22,76
Óleo gasto em um mês (22 dias úteis)	500,64
Óleo gasto em um ano	6008,31

Fonte: Do Autor (2022).

Com todas as etapas concluídas, foram encaminhados ao supervisor do estágio e ao dono da empresa os elementos necessários a serem adquiridos, para que em tempo hábil (não englobado, contudo, dentro do período de estágio do autor), as máquinas pneumáticas fossem construídas.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Após cerca de 16 semanas de estágio na empresa Hirose pôde-se projetar as melhorias de processo propostas pela mesma, atendendo a todas as especificações exigidas. Os funcionários que operam as máquinas manuais mostraram-se satisfeitos com a ergonomia e praticidade que o projeto proporcionará.

Os principais objetivos foram atendidos, uma vez que o tempo gasto em cada processo pneumático tende a ser significativamente menor do que no processo puramente manual. Por fim, o custo de aquisição das peças mostrou-se relativamente baixo, uma vez que o projeto buscou ser o mais simples possível e ao mesmo tempo eficiente. No longo prazo, o custo de manutenção será baixo, pois a tecnologia pneumática possui robustez elevada e suporta os impactos do ambiente e do uso contínuo ao longo de vários anos.

O *software* SolidWorks permitiu que para processos simples de compressão mecânica, pudessem ser simulados, bem como analisada a deformação de seus materiais. Além disso, o uso do *software* facilitou o desenho da peça, na medida em que possui uma vasta biblioteca de materiais e elementos de simulação.

O uso de um sistema pneumático simples permitiu que qualquer operador minimamente instruído, consiga entendê-lo e assim operar as máquinas eficientemente, bem como adaptá-las para processos de fabricação futuros, os quais possam ser mais complexos.

Por fim, o estágio em si permitiu ao aluno aplicar conhecimentos que foram vistos na Universidade em disciplinas relacionadas à física básica, mecânica dos fluidos, tecnologia de materiais, processos de fabricação e instrumentação e pôde ser concluído de forma satisfatória para todas as partes envolvidas.

REFERÊNCIAS

BENTO, D.A. **Fundamentos de resistência dos materiais** . Apostila GEMM/CEFETSC, 2003.

BIOPDI. **Ensaio de Tração**. Biopdi, 2022. Disponível em: <https://biopdi.com.br/artigos/ensaio-de-tracao/#:~:text=Limite%20de%20proporcionalidade%3A%20%20C3%89%20o,material%20n%C3%A3o%20apresenta%20mais%20linearidade>. Acesso em: 26/08/2022.

CHIAVERINI, V. **Tecnologia Mecânica: Estrutura e Propriedades das Ligas Metálicas**. 2ª Ed. São Paulo: McGraw-Hill Ltda, 1986.

CIMM. **Classificação dos tipos de dobramento**. CIMM, 2022. Disponível em: https://www.cimm.com.br/portal/material_didatico/6593-classificacao-dos-tipos-de-dobramento/#:~:text=Os%20testes%20de%20dobramento%20podem,de%20dobramento%20guiado%20e%20semiguado. Acesso em: 29/06/2022.

CRVINDUSTRIAL PARAFUSOS. **Rebites: principais tipos e aplicações**. CRVINDUSTRIAL, 2018. Disponível em: <https://www.crvindustrial.com/blog/rebite-principais-tipos-e-aplicacoes>. Acesso em: 28/06/2022.

GORDO, N. FERREIRA, J. **Elementos de Máquinas -1-**. Apostila TELECURSO 2000.

GROOVER, M. P. **Introdução aos Processos de Fabricação**. 1ª Ed. Rio de Janeiro: LTC, 2014;

KLEINAUTOMACAO. **Cilindro com curso regulável**. Klein automação, 2014. Disponível em: <http://www.kleinautomacao.com.br/br/produtos/pneumatica/cilindros-pneumaticos/cilindro-com-curso-regulavel/>. Acesso em: 06/07/2022

LOPES, A. **Operação de dobrar por prisma – cálculos e conceitos**. Youtube, 2019 Disponível em: https://www.youtube.com/watch?v=95fJ5_TvJXU. Acesso em: 29/06/2022.

LUZ, G. **O que é limite de escoamento?** (Gráfico, Cálculo e Exemplos). Blog Materiais, 2017. Disponível em: <https://www.materiais.gelsonluz.com/2017/10/o-que-e-limite-de-escoamento.html>. Acesso em: 28/06/2022.

MOREIRA, I. S. **Sistemas Pneumáticos**. 2ª Ed. São Paulo: SENAI-SP, 2012.

MTIBRASIL. **Guia completo do cilindro pneumático**. Mti Brasil, 2018. Disponível em: <https://www.mtibrasil.com.br/guia-do-cilindro-pneumatico.php>. Acesso em: 06/07/2022

OTTO SISTEMAS HIDRÁULICOS. **A utilização do Lubrefil no tratamento do Ar**. OTTO SISTEMAS, 2012. Disponível em: <https://ottosistemas.com.br/noticias.php?ler=NDaw>. Acesso em 07/07/2022.

PARKER, HANNIFIN. **Tecnologia Pneumática Industrial**. Apostila M1001 BR. Agosto de 2000.

QUANT, J. **How to Calculate Shear Rivets**. Ehow, 2011. Disponível em: https://www.ehow.com/how_7946322_calculate-shear-rivets.html. Acesso em: 01/07/2022

SMITH, W. F. **Princípios de ciência e engenharia de materiais**. 3ª Ed. Lisboa: McGraw-Hill, 1998.

TOXPRESSOTECHNIK. **Rebite semioco**. TOX Pressotechnik, 2019. Disponível em: <https://br.tox-pressotechnik.com/aplicacoes/uniao-com-elementos/rebite-semioco/> Acesso em: 28/06/2022.

ZANATTA, E. **Lubrificação em sistemas pneumáticos**. Youtube, 2020. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=NTt4FYRmFyU&t=287s>.