

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CAMPUS CACHOEIRA DO SUL
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

Bernardo Fogliatto Choaire

**ANÁLISE DO PLANEJAMENTO E DESENVOLVIMENTO DE UMA
MÁQUINA EXPANSORA DE TUBOS**

Cachoeira do Sul, RS
2022

Bernardo Fogliatto Choaire

**ANÁLISE DO PLANEJAMENTO E DESENVOLVIMENTO DE UMA
MÁQUINA EXPANSORA DE TUBOS**

Trabalho de conclusão de curso, apresentado ao Curso de Engenharia Mecânica, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS) – Campus Cachoeira do Sul, como requisito parcial para obtenção do título de **Engenheiro Mecânico**.

Orientadora: Prof. Dra. Camila dos Santos Torres

Cachoeira do Sul, RS
2022

Bernardo Fogliatto Choaire

**ANÁLISE DO PLANEJAMENTO E DESENVOLVIMENTO DE UMA
MÁQUINA EXPANSORA DE TUBOS**

Trabalho de conclusão de curso, apresentado ao Curso de Engenharia Mecânica, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS) – Campus Cachoeira do Sul, como requisito parcial para obtenção do título de **Engenheiro Mecânico**.

Aprovado em 15 de fevereiro de 2022:

Camila dos Santos Torres, Dra. (UFSM)
(Presidente/Orientadora)

Ederval de Souza Lisboa, Dr. (UFSM)

Cristiano Frandalozo Maidana, Dr. (UFSM)

Cachoeira do Sul, RS
2022

DEDICATÓRIA

*Aos meus pais Fernando e Adriana, por todo apoio, conhecimento e ensinamentos passados,
e por sempre me incentivarem a seguir meus sonhos.*

AGRADECIMENTOS

A minha orientadora e Prof. Dr. Camila dos Santos Torres, pelas orientações passadas, pelo apoio e incentivo ao longo deste trabalho.

Aos meus colegas, amigos e familiares que de alguma forma contribuíram na minha formação e realização deste trabalho.

Ao professor Anderson Dal Molin por participar da banca avaliadora na primeira etapa deste trabalho.

Aos professores Cristiano Frandalozo Maidana e Ederval de Souza Lisboa, avaliadores deste trabalho.

RESUMO

ANÁLISE DO PLANEJAMENTO E DESENVOLVIMENTO DE UMA MÁQUINA EXPANSORA DE TUBOS

AUTOR: Bernardo Fogliatto Choaire

ORIENTADORA: Prof. Dra. Camila Dos Santos Torres

Máquinas e ferramentas que auxiliam no processo de conformação mecânica estão presentes na maior parte da indústria metalmeccânica e visam alterar a geometria do material por meio de forças aplicadas. Devido a necessidade de um maquinário para expandir tubos de baixo valor, foi planejado e desenvolvido uma máquina utilizando um sistema hidráulico e ferramental com intuito de ser durável, funcional e simples. O presente trabalho tem como objetivo analisar o planejamento e desenvolvimento de uma máquina expansora de tubos, utilizada na indústria metalmeccânica para produção de centenas de peças por dia. Primeiramente foi realizada uma análise do material utilizado na conformação mecânica, com isto é possível avaliar qual deverá ser o projeto hidráulico para o maquinário. Em um segundo momento foi avaliada a parte estrutural, visando uma máquina compacta e robusta que ocupe o menor espaço possível no ambiente e suporte o esforço exercido ao conformar o material. Após a conclusão dessas duas etapas foi feito o planejamento e desenvolvimento do ferramental necessário para realizar a expansão dos tubos, e por fim, mostrar os resultados obtidos durante todo processo.

Palavras-chave: Expansora de tubos. Conformação mecânica. Maquinário.

ABSTRACT

ANALYSIS OF THE PLANNING AND DEVELOPMENT OF A TUBE EXPANDER MACHINE

AUTHOR: Bernardo Fogliatto Choaire
ADVISOR: Prof. Dra. Camila Dos Santos Torres

Machines and tools that assist in the mechanical conformation process are present in most metal-mechanical industries and aim to change the material's geometry through applied forces. Due to the need for machinery to expand tubes with low amount invested, a machine was planned and developed using a simple hydraulic system and tooling in order to be durable and functional. The present work aims to analyze the planning and development of a tube expander machine, used in the metal-mechanical industry for the production of hundreds of parts per day. First, an analysis of the material used in the mechanical conformation will be carried out, so, it is possible to evaluate what the hydraulic project for the machinery should be. In a second moment, the evaluation of the structural part will be carried out, aiming at a compact and robust machine that occupies the least space possible in the environment and supports the effort exerted when shaping the material. After completing these two steps, the planning and development of the necessary tooling to carry out the expansion of the tubes will be carried out, and finally, show the results obtained during the process.

Keywords: Tube expander machine. Mechanical conformation. Machinery.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Processos de conformação.....	14
Figura 2 – Fluxograma das etapas de desenvolvimento do trabalho.	22
Figura 3 – Medidas do tubo após a expansão.....	23
Figura 4 – Vista isométrica da estrutura.....	28
Figura 5 – Dimensões da estrutura.....	29
Figura 6 – Medidas principais da primeira peça do ferramental.....	31
Figura 7 – Secções da primeira peça do ferramental.....	32
Figura 8 – Medidas principais da segunda peça do ferramental.....	32
Figura 9 – Primeira peça do ferramental após ser dividida em secções.....	33
Figura 10 – Funcionamento do Ferramental.....	33
Figura 11 – Montagem da estrutura da máquina.....	34
Figura 12 – Primeiros ferramentais produzidos.....	35
Figura 13 – Montagem final.....	36
Figura 14 – Placas batente.....	36
Figura 15 – Tubo antes da expansão (a) e o tubo após a expansão (b).....	37

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Características e aplicações dos materiais.	18
Quadro 2 – Propriedades mecânicas de aços-carbono.	19
Quadro 3 – Propriedades importantes na ferramenta em função do mecanismo de falha.	21
Quadro 4 – Especificação do tubo.	23
Quadro 5 – Especificação do tubo da estrutura.....	27
Quadro 6 – Especificação das chapas da estrutura.....	27
Quadro 7 – Propriedades mecânicas do material do ferramental.....	29

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	11
1.1	OBJETIVO GERAL	12
1.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	12
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	13
2.1	FUNDAMENTOS DA CONFORMAÇÃO PLÁSTICA	13
2.2	TEMPERATURA DE CONFORMAÇÃO	15
2.3	ATRITO E LUBRIFICAÇÃO	15
2.3.1	Lubrificação hidrodinâmica	16
2.3.2	Lubrificação de fronteira	17
2.3.3	Lubrificação Sólida.....	17
2.4	ELEMENTOS DA MÁQUINA.....	17
2.4.1	Estrutura.....	18
2.4.2	Sistema Hidráulico.....	19
2.4.3	Ferramental.....	20
3	METODOLOGIA	22
3.1	DIMENSIONAMENTO HIDRÁULICO.....	23
3.1.1	Definição do cilindro hidráulico	26
3.1.2	Definição da bomba e motor	26
3.1.3	Definição do comando hidráulico.....	26
3.2	DIMENSIONAMENTO ESTRUTURAL	27
3.2.1	Seleção dos materiais para estrutura	27
3.2.2	Definição das dimensões da estrutura.....	27
3.3	SELEÇÃO DO MATERIAL DO FERRAMENTAL.....	29
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	31
4.1	GEOMETRIA DO FERRAMENTAL.....	31
4.1.1	Desenvolvimento do ferramental.....	31
4.2	MONTAGEM DA MÁQUINA	33
5	CONCLUSÕES FINAIS	38
6	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	39
	REFERÊNCIAS	40

1 INTRODUÇÃO

A indústria de máquinas e equipamentos é o setor-chave no processo de industrialização e desenvolvimento econômico de um país, fornecendo máquinas e equipamentos que transformam as condições de produção da agricultura e industrial. Além disso, essa indústria é importante para o desenvolvimento econômico porque incorpora novos conhecimentos tecnológicos ao processo produtivo, por meio da introdução de novos bens de capital que elevam a produtividade e a eficiência do sistema econômico (MARSON, 2014).

Mesmo no auge da pandemia, a indústria responsável por fazer girar a engrenagem de todas as outras indústrias não parou, mesmo enfrentando escassez de matéria-prima (BECKHEUSER, 2021). Com o aumento do volume de peças a serem produzidas, se tem a necessidade de mão de obra e maquinário que suporte esta demanda, tendo em vista que máquinas são capazes de acelerar o processo de produção, havendo assim, uma maior produtividade e padronização do produto tem-se a necessidade de projetar e desenvolver um maquinário que atenda aos requisitos propostos, que seriam, baixo custo de fabricação e manutenção e alta produtividade.

Dentre as diversas etapas para se desenvolver uma máquina ou produto, uma das principais é o desenho técnico e a modelagem tridimensional, nesta etapa é possível ter ideia de como ficará o projeto com uma melhor visualização do que está sendo projetado, assim como materiais e insumos que serão necessários para a fabricação da máquina, além disso, caso seja necessário realizar alguma manutenção, os desenhos auxiliam na troca e produção de componentes. Ao executar a modelagem tridimensional, deve-se levar em conta o material que será utilizado, para ter um baixo custo e um alto rendimento, uma vez que materiais que não sejam comuns no mercado, podem ter um valor elevado e em alguns casos podem ser substituídos por materiais que possuem uma maior rotatividade, alterando apenas algumas medidas no projeto e baixando o custo.

Para a parte estrutural da máquina expansora de tubos, chapas e tubos retangulares de aço carbono foram considerados. O aço carbono é uma das ligas metálicas mais utilizadas na indústria, pois é um material com um ótimo custo-benefício, sendo muito versátil e durável.

De acordo com (Tschiptschin, s.i.), o aço é de longe o material mais amplamente empregado na fabricação de bens de consumo e bens de produção, nas indústrias, na fabricação de máquinas, veículos automotores, na construção civil, etc.

Ao projetar a estrutura da máquina, a posição de trabalho do operador, o espaço que irá ocupar e o esforço que deverá suportar, são também pontos importantes, além disso, a estrutura

deve armazenar todos os componentes do sistema hidráulico utilizado e suportar os esforços gerados ao conformar o material.

Sabendo o diâmetro e espessura do tubo que necessita ser expandido é possível projetar o ferramental necessário, esta é uma das etapas mais importantes e decisivas, pois sendo mal projetado, o ferramental não irá garantir um padrão ao conformar as peças, além do tempo de vida útil do mesmo, que será reduzido se fabricado com materiais que não são adequados para este tipo de uso.

Desse modo, duas peças usinadas foram desenvolvidas para realizar a expansão do tubo onde temos um eixo usinado, em forma de cone, para que se consiga ter um aumento no diâmetro do eixo de forma progressiva, este que por sua vez passa por dentro de uma outra peça usinada, e altera o diâmetro externo desta ferramenta que se encontra dentro do tubo à medida que o diâmetro do eixo aumenta.

1.1 OBJETIVO GERAL

O trabalho tem como objetivo geral descrever e analisar as etapas realizadas no planejamento e também desenvolvimento de uma máquina expansora de tubos utilizada na indústria metal mecânica para conformação de tubos utilizados na montagem de escapamentos de máquinas agrícolas.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os objetivos específicos a serem realizados neste trabalho são:

- Realizar revisão bibliográfica a respeito da conformação;
- Elaborar desenhos técnicos para componentes da máquina;
- Descrever as etapas realizadas para conclusão do projeto;
- Avaliar possíveis melhorias no projeto.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo serão apresentados os conceitos utilizados para realização do trabalho, e quais foram as pesquisas na literatura que contribuíram para o desenvolvimento do projeto como um todo.

2.1 FUNDAMENTOS DA CONFORMAÇÃO PLÁSTICA

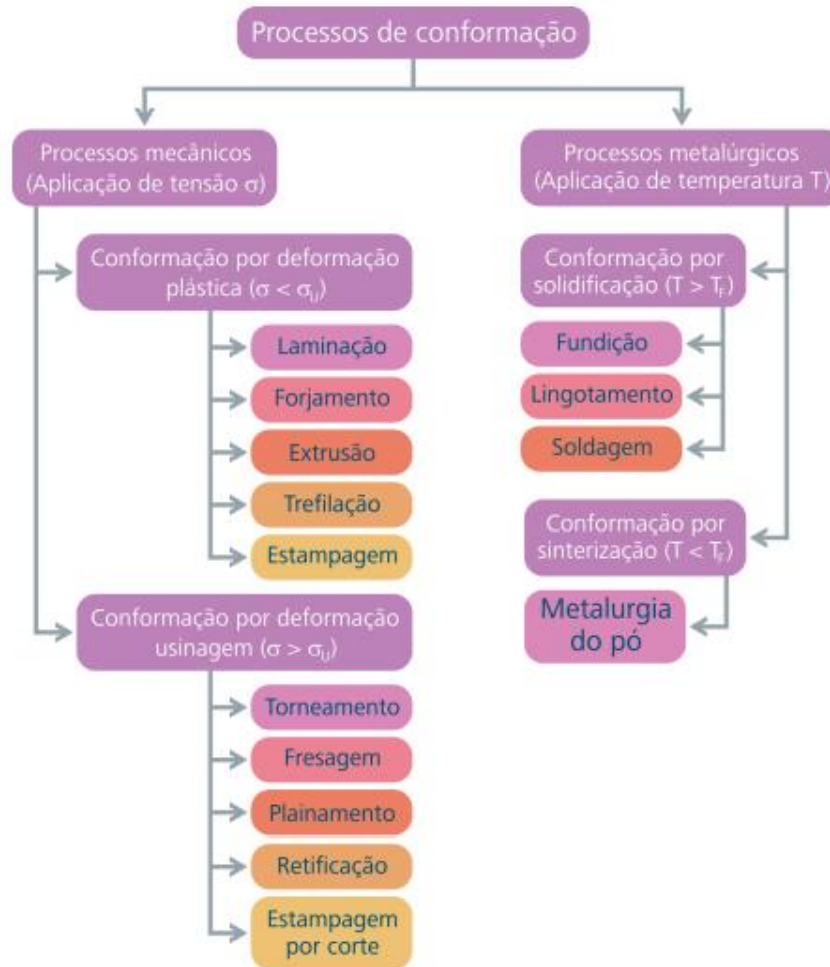
A conformação plástica é um conjunto de processos de manufatura que usa a deformação plástica para mudar a forma do metal. A deformação é resultado do uso de uma ferramenta, geralmente uma matriz, que aplica tensões que excedem o limite de escoamento do metal. O metal, então, deforma e toma a forma determinada em parte ou quase totalmente pela geometria da matriz (KIMINAMI et al., 2015).

Uma peça metálica, quando submetida a uma tensão de tração, após um primeiro estágio de deformação elástica atinge um nível de tensão a partir do qual o metal passa a se deformar plasticamente. Distinto da deformação elástica, que desaparece quando a tensão que a causa é retirada, a deformação plástica é permanente (KIMINAMI et al., 2015).

Os processos de conformação plástica praticados pela indústria de transformação exigem cada vez mais, uma boa plasticidade dos materiais. Neste segmento industrial, os materiais devem se deformar facilmente, mantendo-se resistentes o suficiente para suportar os esforços devidos aos estiramentos e dobramentos sucessivos requeridos pelo processo de conformação. É desejável, portanto, que seja estabelecido um bom compromisso entre a conformabilidade (usinabilidade) e a resistência mecânica. A conformabilidade é a capacidade dos materiais deformarem-se plasticamente em um processo de conformação sem ruptura (FERREIRA, 2010).

Temos diversos processos de conformações que são utilizados nas indústrias, cada um com sua finalidade, podemos classificar os processos de conformação dos metais de acordo com a Figura 1, a seguir:

Figura 1 – Processos de conformação.



Fonte: Adaptação de ROCHA (2012).

Na conformação por deformação plástica, processo no qual a expansão de um tubo se encaixa, temos que levar em conta alguns parâmetros importantes. Os parâmetros mais importantes para os processos de conformação plástica são a temperatura e a taxa de deformação. Ambos exercem forte influência sobre a tensão de escoamento (FERREIRA, 2010).

Kiminami (2015) nos diz que o aumento de temperatura reduz o limite de escoamento (resistência mecânica) e aumenta a ductilidade (deformação), que é a medida da capacidade de deformação plástica de um material metálico até a ruptura.

Um material frágil experimenta pouca ou nenhuma deformação até o instante da ruptura, enquanto que os materiais dúcteis deformam consideravelmente antes da ruptura (FREDEL, 2015)

2.2 TEMPERATURA DE CONFORMAÇÃO

Em relação à temperatura de trabalho, os processos de conformação podem ser classificados em processos com trabalho mecânico a frio e com trabalho mecânico a quente. Quando a temperatura de trabalho é maior que a temperatura que provoca a recristalização do metal, o processo é denominado como trabalho a quente e, abaixo dessa temperatura, o trabalho é denominado como a frio. No trabalho mecânico a frio, provoca-se o aparecimento no metal do chamado efeito de encruamento, ou seja, o aumento da resistência mecânica com a deformação plástica. O trabalho mecânico a frio permite aumentar a resistência mecânica de certos metais não-ferrosos que não são endurecíveis por tratamentos térmicos. No trabalho mecânico a quente, a deformação plástica é realizada numa faixa de temperatura, e durante um determinado tempo o encruamento é eliminado pela recristalização do metal (ROCHA, 2012).

Na conformação a frio, que é realizada à temperatura ambiente ou um pouco acima dela para a grande maioria dos metais e ligas de engenharia, a conformabilidade é bastante limitada. Devido ao encruamento (fenômeno pelo qual um metal dúctil se torna mais duro e mais resistente quando submetido à deformação plástica), são necessárias alta potência e forças para deformar o material, cujo grau de deformação é limitado. Para maiores graus de deformação além daquele realizado, um tratamento térmico de recozimento é necessário para a recuperação da ductilidade e, assim, possibilitar maiores deformações, o que aumentam o custo (KIMINAMI et al., 2015).

Para a expansão de tubos, a conformação a frio se torna uma opção mais viável, visto que, ao conformar a quente, teríamos que adicionar um ou mais processos na fabricação de um componente que precisa ser expandido, tendo a necessidade de aquecer o material para então conformá-lo, aumentando o tempo necessário para se produzir uma peça e também seu custo final. A conformação a quente seria aconselhável para casos onde é necessária uma grande deformação no material, diminuindo a possibilidade de ruptura ou fraturas críticas em sua estrutura (HELMAN e CETLIN, 2005).

2.3 ATRITO E LUBRIFICAÇÃO

Denomina-se “atrito por contato” o mecanismo pelo qual se desenvolvem forças na superfície de dois corpos em contato, que se traduzem numa resistência ao deslizamento de um corpo sobre o outro. Ainda que estas forças que se desenvolvem durante o processo de deslizamento se encontrem sempre presentes, quaisquer que sejam os materiais em contato, os

mecanismos físico-químicos responsáveis por elas parecem depender da natureza de tais materiais (HELMAN e CETLIN, 2005).

A utilização de lubrificação adequada para realizar a conformação de tubos, tem como principal objetivo diminuir o desgaste entre as ferramentas de expansão e facilitar o deslizamento entre as ferramentas, conseqüentemente diminuindo o esforço necessário para se realizar a conformação.

Na conformação mecânica dos metais, o atrito está presente em todos os processos, sendo, geralmente, considerado nocivo. Entre os aspectos relevantes da conformação mecânica mais diretamente ligada ao atrito, pode-se assinalar:

- Alteração, geralmente desfavorável, dos estados de tensão necessários para deformação;
- Produção de fluxos irregulares de metal durante o processo de conformação; aparecimento de tensões residuais no produto;
- Influência sobre a qualidade superficial dos produtos;
- Aumento do desgaste de ferramentas;
- Aumento do consumo de energia necessária à deformação (HELMAN e CETLIN, 2005).

O uso de lubrificantes entre as superfícies metálicas em um processo de conformação mecânica permite a redução do atrito e desgaste, podem distinguir-se quatro tipos de lubrificação: hidrodinâmica, de fronteira, sólida e o atrito seco (ausência de lubrificantes) (COSTA et al., 2017).

2.3.1 Lubrificação hidrodinâmica

Segundo Budynas e Nisbett (2011), lubrificação hidrodinâmica significa que as superfícies de carregamento de carga do mancal se encontram separadas por um filme relativamente espesso de lubrificante, a fim de prevenir o contato metal-metal. A lubrificação hidrodinâmica não depende da introdução de lubrificante sob pressão, embora isso possa ocorrer, mas requer, sim, a existência de um suprimento adequado em todos os momentos. A pressão de filme é criada pela superfície móvel puxando o lubrificante para a zona em forma de cunha, a uma velocidade suficientemente alta a fim de criar a pressão necessária para separar as superfícies.

2.3.2 Lubrificação de fronteira

A lubrificação de fronteira caracteriza-se pelo lubrificante não ser capaz de assegurar uma película contínua ao longo da interface de contato entre as duas superfícies. Dependendo da espessura e da resistência relativa da película de lubrificante, na prática, o coeficiente de atrito pode variar entre $0,1 < \mu < 0,4$. Lubrificantes de extrema pressão foram desenvolvidos para superar os problemas de falta de eficiência dos lubrificantes orgânicos, característicos de lubrificação, com regimes de elevada pressão e temperaturas (COSTA et al., 2017).

2.3.3 Lubrificação Sólida

Na maioria das aplicações tribológicas, lubrificantes líquidos ou graxas são utilizados para combater o atrito e o desgaste, mas quando as condições se tornam muito severas (ou seja, temperaturas muito elevadas ou muito baixas, ambiente em vácuo, radiação, pressões de contato extremas, limpeza e higiene, alimentos e farmacêuticos, etc.), os lubrificantes sólidos podem ser a única opção para controlar o atrito e o desgaste (ERDEMIR, 2001).

Lubrificantes sólidos são aplicados na interface ferramenta e peça, e apesar de permanecerem secas, a película formada ainda separa as superfícies evitando o contato metálico. A ancoragem desse tipo de lubrificante pode ser puramente mecânica ou por reações químicas, não interessando se o lubrificante será aplicado sobre a peça ou sobre a ferramenta (SILVA, 2007).

2.4 ELEMENTOS DA MÁQUINA

A consideração do custo tem um papel de tal importância no processo de decisão de um projeto que facilmente pode-se despendar tanto tempo no estudo do fator custo quanto aquele dedicado ao estudo de toda a matéria do projeto (BUDYNAS e NISBETT, 2016).

Buscando um baixo custo, aliado à um bom desempenho e baixa manutenção, a escolha dos materiais e componentes para montagem da máquina, é de grande importância no projeto, uma vez que uma escolha errada afetaria o funcionamento e durabilidade da máquina.

2.4.1 Estrutura

As formas mais usuais de metais ferrosos são o aço e o ferro fundido, sendo o aço, atualmente, o mais importante. Aços e o ferros fundidos são ligas de ferro e carbono, com outros elementos de dois tipos: elementos residuais decorrentes do processo de fabricação, como silício, manganês, fósforo e enxofre, e elementos adicionados com o intuito de melhorar as características físicas e mecânicas do material denominados elementos de liga (PFEIL e PFEIL, 2008).

Tendo como principais opções o ferro fundido e o aço carbono para fabricação estrutural da máquina expansora de tubos, alguns aspectos a respeito de cada material foram levados em conta na escolha. No Quadro 1, é apresentado as características e aplicações ao se utilizar ferro fundido ou aço na parte estrutural da máquina.

Quadro 1 – Características e aplicações dos materiais.

(continua)

Material	Característica	Aplicações
Ferro fundido cinzento	Fácil moldagem, resistência ao desgaste, bom amortecimento de vibrações.	Estrutura de máquinas operatrizes, virabrequins, rotores.
Ferro fundido nodular	Excelente resistência mecânica, tenacidade e ductilidade.	Peças sujeitas à pressão e que resistam ao choque.
Ferro fundido branco	Alta dureza, alta fragilidade, difícil usinagem.	Estrutura de máquinas operatrizes, virabrequins, rotores.
Ferro fundido maleável	Melhor usabilidade entre os ferros fundidos, boa resistência à corrosão, boa ductilidade.	Barras de ligação, engrenagens de transmissão, conexão de tubulações.
Aço baixo carbono ($C \leq 0,29\%$)	Usinável e soldável, além de apresentar baixo custo de produção.	Chapas automobilísticas, perfis estruturais, placas para produção de tubos e construção civil.
Aço médio carbono ($0,30 \leq C \leq 0,59\%$)	Possui maior resistência e dureza e menor tenacidade e ductilidade do que o aço baixo carbono.	Rodas e equipamentos ferroviários, engrenagens, virabrequins e outras peças de máquinas.

(conclusão)

<p>Aço alto carbono ($0,60 \leq C \leq 2,00\%$)</p>	<p>Geralmente, são utilizados temperados ou revenidos, possuindo propriedades de manutenção de um bom fio de corte.</p>	<p>Talhadeiras, punções de matrizes e instrumentos de corte.</p>
--------------------------------------------------------------------	-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	------------------------------------------------------------------

Fonte: Adaptação de Pfeil e Pfeil (2008) e Zolin (2011).

Em estruturas usuais de aço, utilizam-se aços com baixo teor de carbono, que podem ser soldados sem precauções especiais (PFEIL e PFEIL, 2008).

Tendo como opção mais viável para a parte estrutural da máquina expansora de tubos, se optou pelo uso de aço com baixo teor de carbono, uma vez que este material possibilita a utilização de tubos industriais e chapas de aço carbono, além de ser soldável, facilitando a união de componentes.

De acordo com Pfeil e Pfeil (2008), os principais tipos de aço-carbono usados em estruturas, segundo os padrões da ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas), da ASTM (*American Society for Testing and Materials*) e das normas europeias EN, são os apresentados no Quadro 2.

Quadro 2 – Propriedades mecânicas de aços-carbono.

Especificação	Teor de carbono %	Limite de escoamento (MPa)	Resistencia à ruptura (MPa)
ABNT MR250	Baixo	250	400
ASTM A36	0,25-0,29	250	400-500
ASTM A325	Médio	635	825
EM S235	Baixo	235	360

Fonte: Adaptação de Pfeil e Pfeil (2008).

2.4.2 Sistema Hidráulico

Os sistemas hidráulicos são necessários principalmente quando precisamos multiplicar uma força a ser aplicada, utilizando-se de um líquido sob pressão para tal finalidade (SIMÕES, 2016). Tendo como componentes principais o motor elétrico, a bomba hidráulica, o reservatório de óleo, o cilindro hidráulico e a válvula de comando, a escolha de cada um destes para

montagem do sistema, tem grande importância para se garantir um sistema funcional e duradouro.

A bomba hidráulica é um componente do sistema hidráulico, cuja função é transformar em energia hidráulica a energia mecânica do motor acoplado, visando transportar o fluido ou produzir movimento em outros componentes (cilindro ou motores hidráulicos) (MELCONIAN, 2017).

De acordo com Palmieri (1997), o fluido utilizado em um sistema hidráulico deve ser armazenado de tal forma que ele nunca seja insuficiente ou excessivo. O reservatório, portanto, deve suprir tanto as necessidades mínimas como máximas do sistema.

Os cilindros hidráulicos são componentes de circuitos hidráulicos ou eletro-hidráulicos que possuem a característica de movimento linear do êmbolo (avanço e retorno) visando realizar um determinado trabalho (MELCONIAN, 2017).

Para Palmieri (1997), a função de uma válvula de comando em um sistema hidráulico é permitir fluxo livre de fluido em um sentido (no sentido de afastar o pistão ou esfera de sua sede) e impedir o fluxo no sentido contrário, ou mesmo, permiti-lo, quando desejado.

2.4.3 Ferramental

Yoshida (2008) diz que temos cinco tipos básicos de mecanismos de falha de ferramentas em conformação a frio:

- Desgaste
- Lascamento
- Deformação plástica
- Trinca catastrófica
- Caldeamento

Sabendo que um dia o ferramental usado irá sofrer alguma falha, se espera que aconteça o desgaste das peças, pois de acordo com Yoshida (2008), se todas as variáveis estiverem sob controle, e forem utilizados todos os procedimentos da forma mais otimizada possível, este deverá ser o mecanismo através do qual a ferramenta será perdida. Desta forma, a ferramenta terá o maior tempo de duração possível, ao contrário dos demais mecanismos de falha que podem levar a perda do ferramental com pouco tempo de uso.

No Quadro 3, é possível observar as propriedades que são importantes na ferramenta para se evitar cada tipo de falha.

Quadro 3 – Propriedades importantes na ferramenta em função do mecanismo de falha.

Causas de falha	Propriedades importantes na ferramenta
Desgaste Abrasivo	Alta dureza Elevado número de carbonetos Alta dureza dos carbonetos Carbonetos massivos
Desgaste Adesivo	Alta dureza Baixo coeficiente de atrito entre ferramenta e peça Alta ductilidade
Lasqueamento	Alta ductilidade
Deformação Plástica	Alta dureza
Trinca Catastrófica	Baixa dureza Alta tenacidade microestrutural
Caldeamento	Baixo coeficiente de atrito

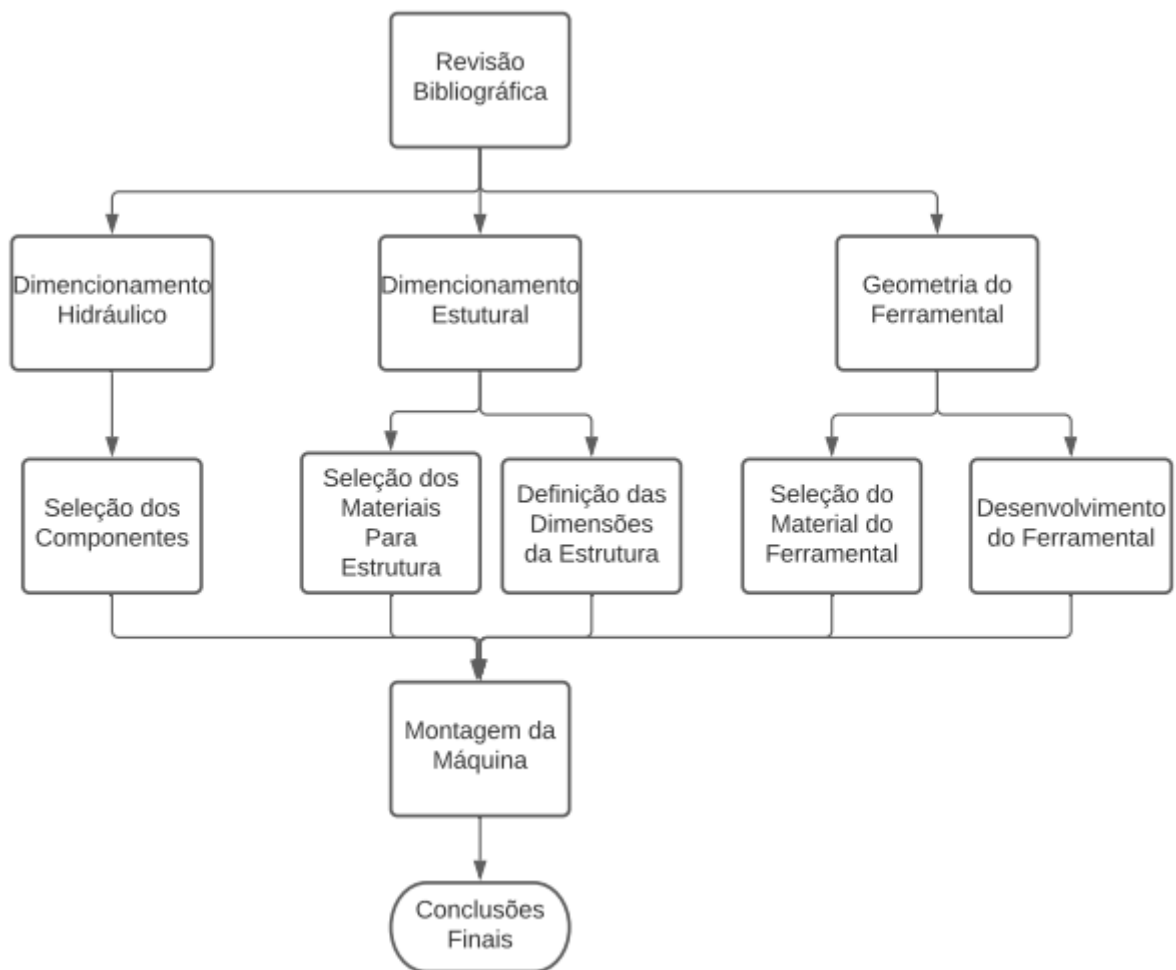
Fonte: Adaptação de Yoshida (2008).

3 METODOLOGIA

A metodologia adotada para este projeto partiu de um estudo abordando a conformação mecânica, funcionamento, dimensionamento e desenvolvimento de uma máquina expansora de tubos.

Primeiramente foi feita uma pesquisa na literatura, com intuito de entender como as escolhas feitas no decorrer do projeto afetam no desempenho da máquina. A segunda etapa tem como objetivo mostrar como foi desenvolvido as partes e componentes da máquina, e por fim, mostrar os resultados obtidos em todo o processo. A Figura 2 apresenta as etapas aplicadas no desenvolvimento desse trabalho.

Figura 2 – Fluxograma das etapas de desenvolvimento do trabalho.



Fonte: Autor (2021).

3.1 DIMENSIONAMENTO HIDRÁULICO

Para fazer o dimensionamento hidráulico, primeiramente foi necessário calcular a força que este sistema precisaria ter para realizar a expansão de um tubo de alumínio, no Quadro 4, podemos observar as propriedades do mesmo.

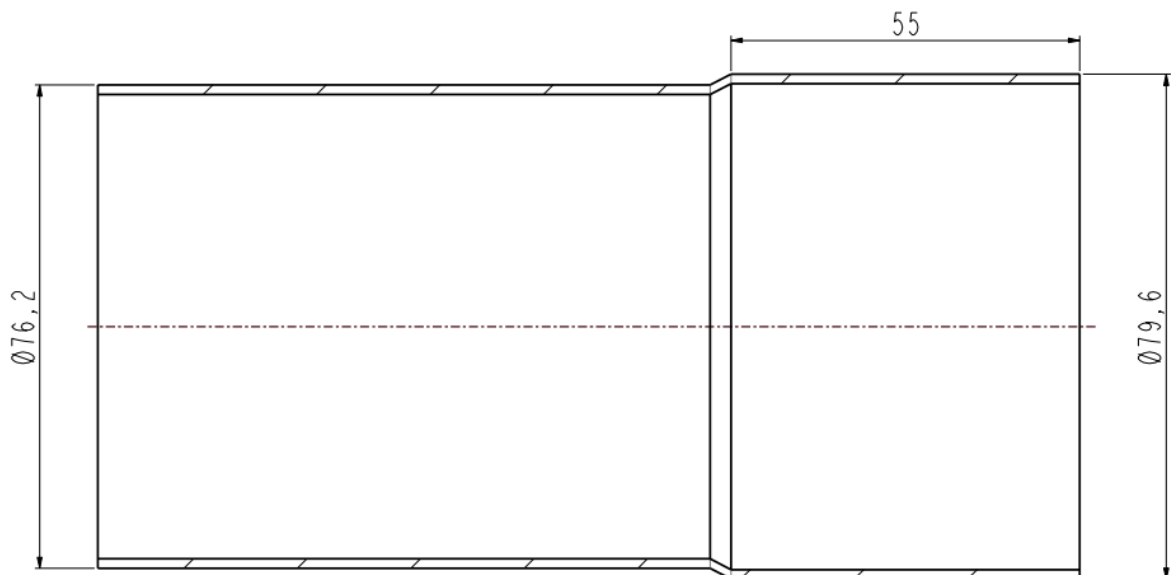
Quadro 4 – Especificação do tubo.

Especificação	Diâmetro (mm)	Parede (mm)	Limite de escoamento (MPa)	Limite de resistência à tração (MPa)
ASTM A463	76,2 mm	1,5 mm	120 - 220	260 - 350

Fonte: Autor (2022)

A partir destes dados, foi calculado uma força aproximada necessária para expandir o tubo para o diâmetro de 79,6 mm em um comprimento de 55 mm a partir da face, na Figura 3 temos as medidas do tubo após a expansão.

Figura 3 – Medidas do tubo após a expansão.



Fonte: Autor (2022)

Com as medidas e especificações do material, foi possível fazer uma estimativa da força de repuxo necessária para a expansão do tubo. Para isso se utilizou o cálculo do repuxo para uma chapa, abaixo temos o desenvolvimento deste cálculo.

- Como o cálculo será feito para uma chapa e estamos utilizando um tubo, foi feito a planificação da parte do tubo onde será realizada a expansão, então para um tubo de 79,6 mm de diâmetro e 55 mm de comprimento, temos uma chapa planificada de aproximadamente 243x55 mm (13365 mm²).
- Utilizando o cálculo simplificado da força de estampagem, que se dá pela expressão abaixo:

$$F = \pi \cdot d \cdot e \cdot \sigma \cdot \left[1,2 \left(\frac{\beta - 1}{\beta_{max} - 1} \right) \right] \quad [1]$$

Sendo:

F- Força de repuxo (kgf)

d- Diâmetro do punção (mm)

e- Espessura da chapa (mm)

σ - Limite de resistência a tração (MPa)

β - Severidade do repuxo

β_{max} - Severidade máxima

D- Diâmetro do blank (chapa de onde se originará o componente) (mm)

h- Profundidade do repuxo (mm)

Podemos encontrar β , β_{max} e D a partir das equações abaixo.

$$\beta = \frac{D}{d} \quad [2]$$

$$\beta_{max} = 2,15 - 0,001 \cdot \left(\frac{d}{e} \right) \quad [3]$$

$$D = \sqrt{d^2 + 4 \cdot d \cdot h} \quad [4]$$

- Para utilizar a equação, assumiu-se a chapa como sendo um círculo de 130,5 mm de diâmetro possuindo uma área de aproximadamente 13375,5 mm², com isso podemos encontrar o diâmetro do blank, severidade do repuxo e severidade máxima a partir das equações abaixo:

$$D = \sqrt{130,5^2 + 4.130,5.1,7} \cong 133,86mm$$

$$\beta = \frac{133,86}{130,5} \approx 1,025747$$

$$\beta_{max} = 2,15 - 0,001 \cdot \left(\frac{130,5}{1,5}\right) = 2,063$$

Substituindo na equação [1] temos:

$$F = \pi \cdot 130,5 \cdot 1,5 \cdot 350 \cdot \left[1,2 \left(\frac{1,025747 - 1}{2,063 - 1}\right)\right] \cong 6255,965 \text{ kgf}$$

Como este é um cálculo teórico e não está sendo considerado as perdas existentes no processo, o sistema hidráulico deverá ter uma força maior que 6255,965 kgf.

Para calcular a força no avanço e recuo do pistão podemos utilizar as equações abaixo:

$$Fa = P \cdot \left(\frac{d_2^2 \cdot \pi}{4}\right) \quad [5]$$

$$Fr = P \cdot \left(\frac{d_2^2 - d_1^2 \cdot \pi}{4}\right) \quad [6]$$

Onde:

Fa – Força no avanço (kgf)

Fr – Força no recuo (kgf)

P – Pressão no sistema (bar)

d₂- Diâmetro do corpo do cilindro hidráulico (cm)

d₁- Diâmetro da haste do cilindro hidráulico (cm)

Sabendo que será utilizado um pistão com uma haste de 5,58 cm de diâmetro e 12,7 cm de diâmetro de corpo, com o sistema hidráulico trabalhando em uma pressão de 150 bar, podemos encontrar a força de avanço e recuo do pistão:

$$F_a = 150 \cdot \left(\frac{12,7^2 \cdot \pi}{4} \right) \cong 19000 \text{kgf}$$

$$F_r = 150 \cdot \left(\frac{(12,7^2 - 5,58^2) \cdot \pi}{4} \right) \cong 15333 \text{kgf}$$

3.1.1 Definição do cilindro hidráulico

O cilindro hidráulico irá definir a força exigida e a partir da definição do mesmo, os demais componentes do sistema foram selecionados. O atuador utilizado possui diâmetro da haste de 5,58 cm, diâmetro do cilindro de 12,7cm e curso de 30 cm.

3.1.2 Definição da bomba e motor

A bomba hidráulica escolhida para o sistema foi uma de engrenagens com uma pressão máxima de até 300 bar, mas para o projeto será utilizado uma pressão de 150 bar, caso seja necessário aumentar a pressão para expandir algum outro tubo que exija mais força, a pressão pode ser alterada.

Para acionar esta bomba foi escolhido um motor elétrico trifásico de 7,5 cv (5,5kw), 60Hz e rotação de 1740 rpm. Utilizando um acoplamento elástico foi feita a união da bomba com o motor.

3.1.3 Definição do comando hidráulico

O comando hidráulico tem o papel de acionar o cilindro hidráulico, tanto para efetuar o movimento de avanço como também de recuo, para o funcionamento da máquina expansora será necessário apenas que o cilindro hidráulico faça estes movimentos, então o comando hidráulico terá acionamento manual por alavanca, que depois de posicionado na máquina foi substituído por um pedal para facilitar o manuseio do operador.

3.2 DIMENSIONAMENTO ESTRUTURAL

Nesta etapa do trabalho, serão apresentadas as dimensões e os materiais utilizados na estrutura da máquina.

3.2.1 Seleção dos materiais para estrutura

Para estrutura da máquina foram utilizados tubos retangulares, podemos ver as especificações do mesmo no Quadro 5 abaixo.

Quadro 5 – Especificação do tubo da estrutura.

Especificação	Largura (mm)	Altura (mm)	Parede (mm)	Limite de escoamento (MPa) mín.	Limite de resistência à tração (MPa) mín.	Alongamento (%)
ASTM A500 GRAU C	76,2	50,8	4,5	345	425	21

Fonte: Autor (2022)

Além dos tubos, também foram utilizadas chapas para dar sustentação aos componentes da máquina, as mesmas estão especificadas no Quadro 6 abaixo.

Quadro 6 – Especificação das chapas da estrutura.

Especificação	Espessura (mm)	Limite de escoamento (MPa) mín.	Limite de resistência à tração (MPa)	Alongamento (%)
CHAPA ASTM-A36	6,35	250	400 - 550	23
CHAPA ASTM-A572 GRAU 50	38,1	345	450 mín.	16

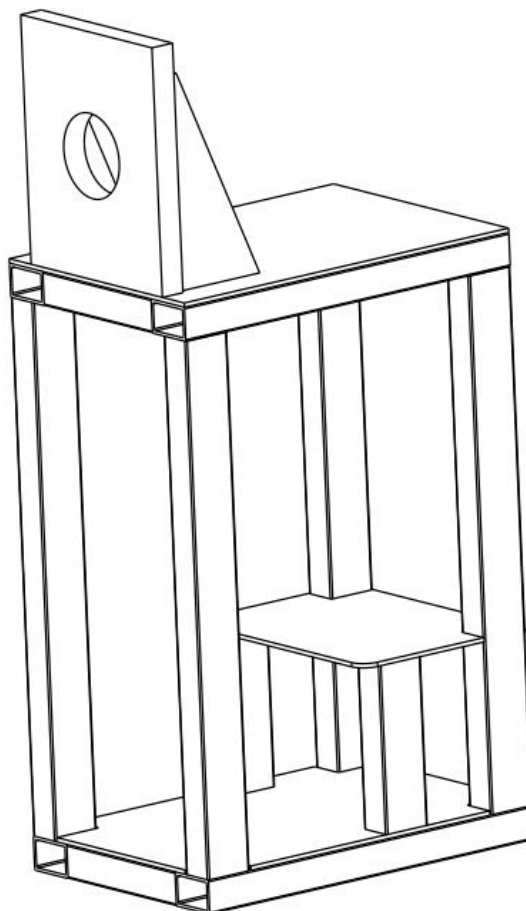
Fonte: Autor (2022)

3.2.2 Definição das dimensões da estrutura

Após a seleção dos materiais, foi utilizado o software CREO Parametric para fazer o desenho da estrutura da máquina, a mesma, deve alojar todos os componentes do sistema hidráulico e também, permitir que o operador tenha uma posição de trabalho confortável, uma

vez que serão produzidas centenas de peças por dia. Levando em conta principalmente estes dois fatores, foi feito o desenho da estrutura da máquina, na Figura 4, podemos ver como ficou a parte estrutural da máquina.

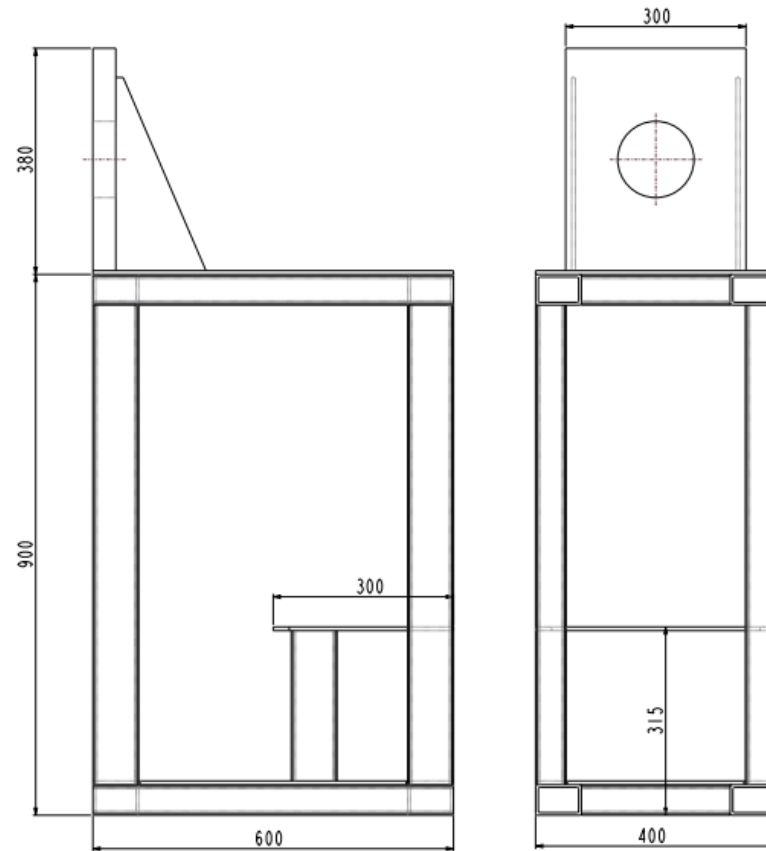
Figura 4 – Vista isométrica da estrutura.



Fonte: Autor (2022)

Na Figura 5, estão apresentadas as medidas principais da estrutura, a mesma foi projetada para comportar o motor e a bomba na parte mais próxima ao solo, o reservatório na parte acima e o cilindro hidráulico colocado na parte mais alta da estrutura, facilitando o manuseio do operador.

Figura 5 – Dimensões da estrutura.



Fonte: Autor (2022)

3.3 SELEÇÃO DO MATERIAL DO FERRAMENTAL

No Quadro 7, temos as propriedades mecânicas do material utilizado para fabricação das duas peças do ferramental.

Quadro 7 – Propriedades mecânicas do material do ferramental.

Especificação	Limite de escoamento (MPa)	Limite de resistência à tração (MPa)	Alongamento (%)
AÇO SAE 4140	415	655	18
AÇO SAE 4140 TEMPERADO	986	1075	15,5

Fonte: Autor (2022)

O aço SAE 4140, é classificado como aço médio carbono ligado para beneficiamento, possuindo alta temperabilidade, boa resistência a torção e à fadiga, podendo alcançar de 54 a 59 HRC de dureza.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo serão apresentados e discutidos os resultados obtidos do planejamento e desenvolvimento da máquina expansora de tubos realizados nesse trabalho.

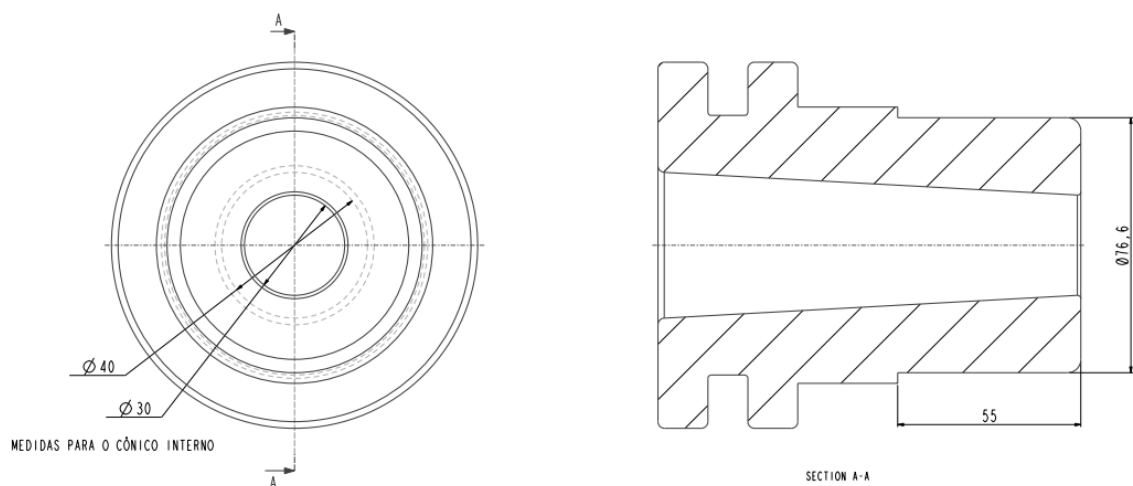
4.1 GEOMETRIA DO FERRAMENTAL

O ferramental para a expansão do tubo define o diâmetro da expansão e também o comprimento, as demais etapas na produção da máquina não sofrerão mudanças ao modificar o material a ser expandido ou as dimensões da parte que deverá ser expandida, o ferramental, por sua vez, deverá ser alterado caso o tubo ou as dimensões da expansão mudem.

4.1.1 Desenvolvimento do ferramental

Com o diâmetro interno do tubo após a expansão definido, foi projetado as duas peças necessárias para realizar a expansão do tubo, a primeira delas pode ser visualizada na Figura 6. Esta peça terá duas etapas em sua produção, a primeira, é a de usinagem, onde serão definidas as medidas da expansão, como diâmetro e comprimento. Na segunda etapa será feita a divisão da peça em seções, para possibilitar a expansão.

Figura 6 – Medidas principais da primeira peça do ferramental.

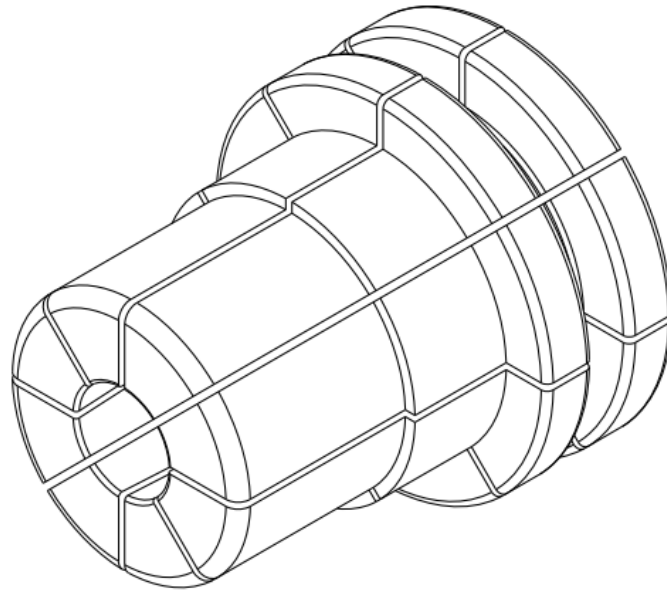


Fonte: Autor (2022)

Para usinagem da primeira peça, as medidas, apresentadas na Figura 6, definem o diâmetro e o comprimento da expansão, as demais medidas da peça servem apenas para fazer com que a mesma seja acoplada na máquina. Após a usinagem, a segunda etapa para produção

da peça é cortar a peça em secções para conseguir diminuir o diâmetro da peça e fazer com que a mesma entre no tubo. A Figura 7 mostra como estas secções são divididas.

Figura 7 – Secções da primeira peça do ferramental.



Fonte: Autor (2022)

A segunda peça do ferramental é um eixo cônico que passa dentro da primeira peça, como ela está dividida em secções, assim que o eixo passar, irá empurrar as secções para fora, expandindo o tubo. O desenho do eixo pode ser visto na Figura 8.

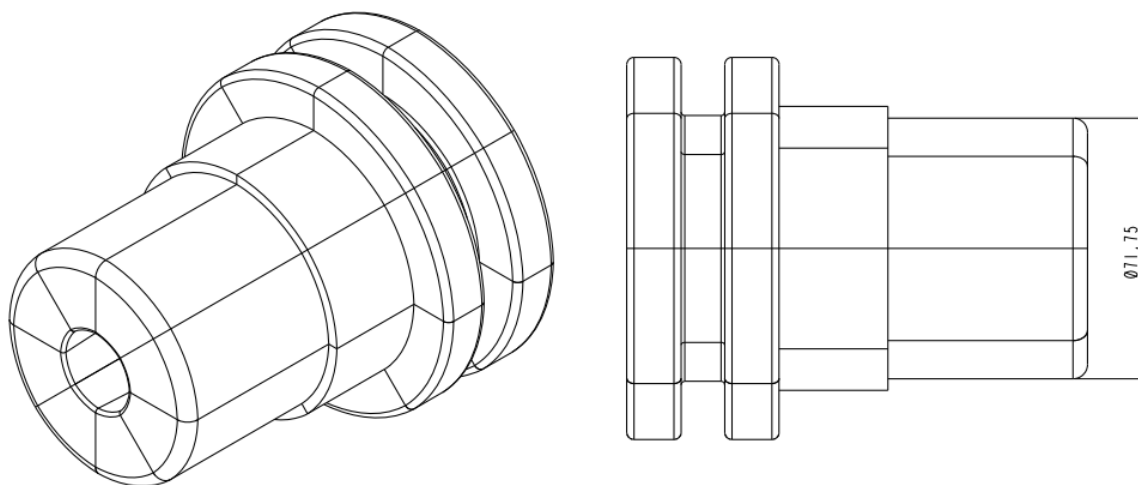
Figura 8 - Medidas principais da segunda peça do ferramental.



Fonte: Autor (2022)

Com as duas peças desenvolvidas, a Figura 9 apresenta a primeira peça do ferramental após fazer as secções e a Figura 10 mostra o funcionamento do ferramental.

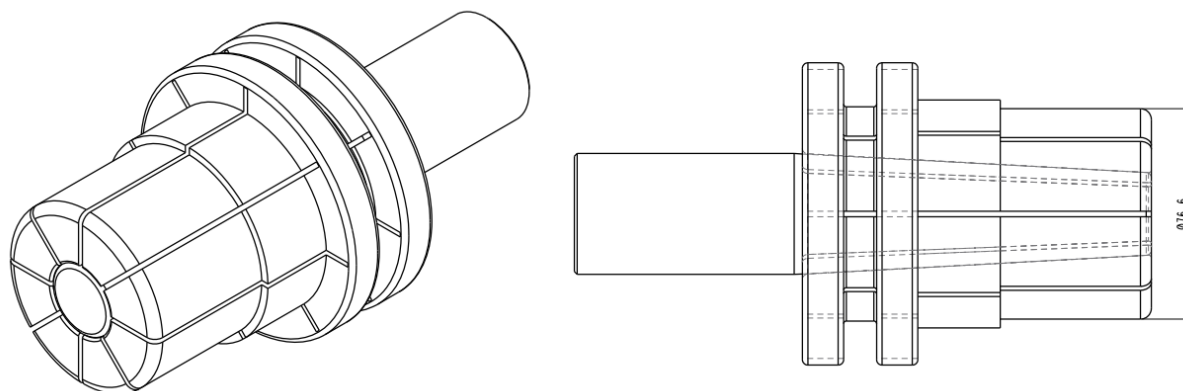
Figura 9 – Primeira peça do ferramental após ser dividida em secções.



Fonte: Autor (2022)

Com o novo diâmetro da ferramenta é possível coloca-la dentro do tubo e depois introduzir o eixo para realizar a expansão do tubo.

Figura 10 – Funcionamento do Ferramental.



Fonte: Autor (2022)

4.2 MONTAGEM DA MÁQUINA

Após definir os componentes necessários para realizar o projeto, montou-se a estrutura colocando alguns componentes, como pode ser visto na Figura 11, os componentes colocados eram provisórios, servindo apenas como auxílio para visualização da montagem da máquina.

Figura 11 – Montagem da estrutura da máquina.



Fonte: Autor (2022)

Ao longo do projeto foram feitas algumas modificações na máquina, com intuito de melhorar a produtividade, grande parte das modificações foram feitas na parte superior da máquina, na fixação do cilindro hidráulico e também na geometria do ferramental.

Na Figura 12 temos os primeiros ferramentais produzidos, com uma geometria bem diferente da utilizada hoje, as ferramentas atendiam as necessidades porém o tempo de vida útil das partes do ferramental não era o esperado.

Figura 12 – Primeiros ferramentais produzidos.



Fonte: Autor (2022)

Neste ferramental os furos não eram cônicos e a expansão era feita por conta de um aumento do diâmetro do eixo, havendo um maior desgaste de ambas as partes, posteriormente, com a alteração da usinagem interna e também do eixo para cônicos, o desgaste diminuiu, aumentando o tempo de vida útil do ferramental.

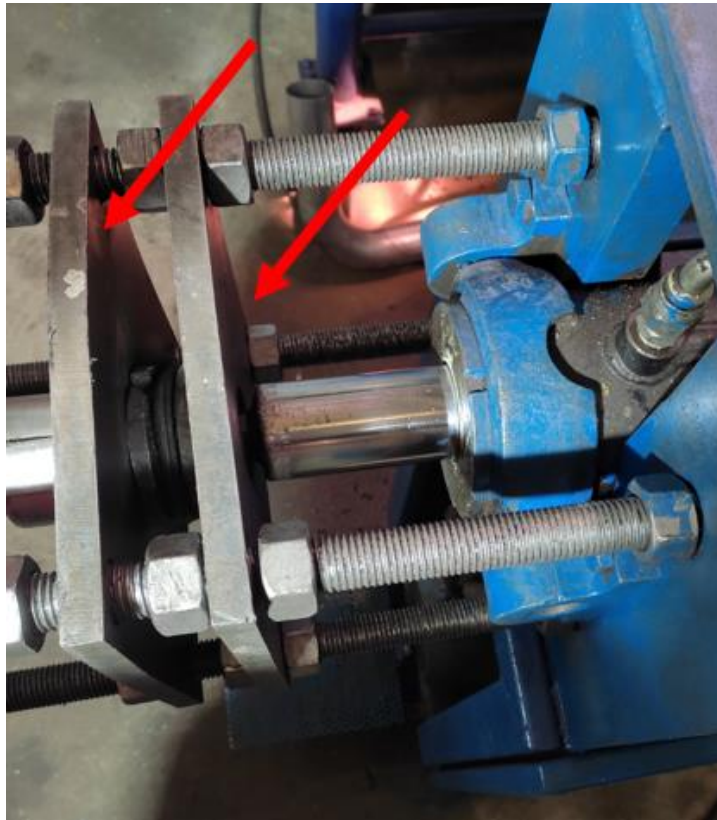
A Figura 13 apresenta a máquina ao final do projeto, onde foi adicionado alguns elementos que não estavam incluídos no início, e foram necessários para um melhor funcionamento da máquina, como duas placas que servem de batente para o ferramental, mostradas na Figura 14, estas placas servem para forçar com que o eixo passe dentro da peça que foi cortada em seções, fazendo com a mesma aumente de diâmetro, sem elas o eixo iria empurrar a ferramenta, sendo impossível de realizar a expansão.

Figura 13 – Montagem final.



Fonte: Autor (2022)

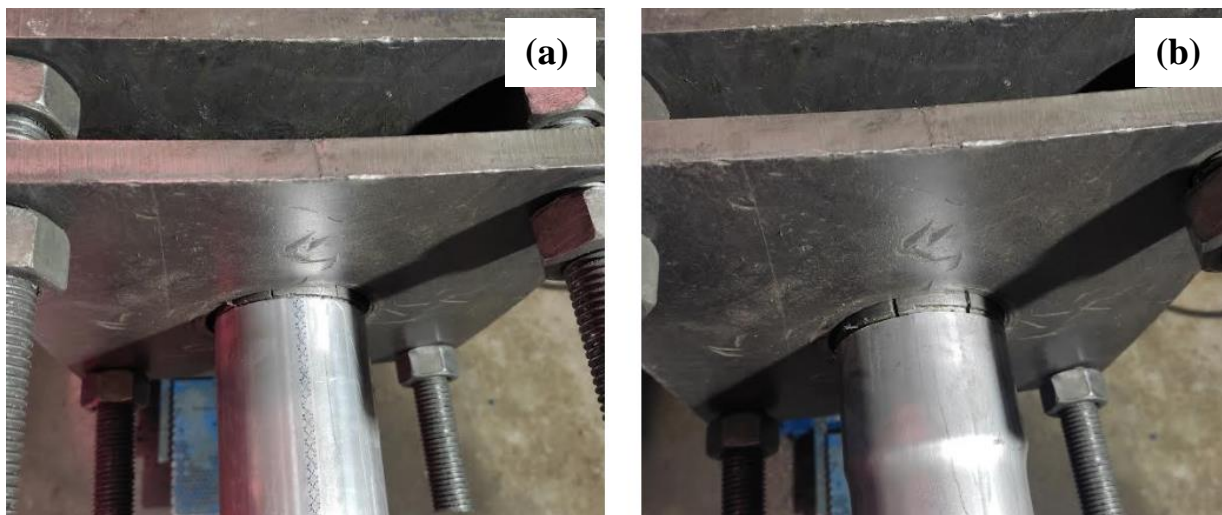
Figura 14 – Placas batente.



Fonte: Autor (2022)

Também foi adicionado posteriormente uma chave fim de curso, para evitar que o diâmetro ficasse maior do que o desejado, mantendo um padrão de produção, a Figura 15 mostra um tubo antes e após a expansão realizada na máquina.

Figura 15 – Tubo antes da expansão (a) e o tubo após a expansão (b).



Fonte: Autor (2022)

5 CONCLUSÕES FINAIS

A máquina cumpriu o propósito inicial, possibilitando a produção de até 150 peças por dia, mais de 3 mil peças por mês, sendo utilizada para fazer a expansão de diversos tubos, com o desenvolvimento de novos ferramentais que possibilitaram esta produção.

Por conta do sistema hidráulico estar superdimensionado, é possível o desenvolvimento de novos protótipos, como tubos de diâmetro e paredes diferentes do proposto no início do projeto.

Na parte estrutural da máquina algumas alterações foram feitas, como um corte na chapa onde fica fixado o cilindro hidráulico, para possibilitar a ligação do sistema hidráulico, e a colocação das barras rosqueadas que servem de apoio para os batentes do ferramental, fundamentais para o funcionamento da máquina.

Adaptações e melhorias realizadas, principalmente na parte do ferramental, já estavam previstas que poderiam acontecer, uma vez que a geometria e os materiais utilizados para fabricação foram sendo testados até se obter o melhor resultado.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para trabalhos futuros, propõem-se:

- Adicionar proteções na estrutura, fechando o acesso para os componentes hidráulicos da máquina. Diminuindo o risco de acidentes e também mantendo os componentes do sistema hidráulico livre de sujeira.
- Realizar o levantamento de custo da matéria prima e de fabricação, buscando um custo de produção e um de venda. Como o projeto não tinha o objetivo de entrar no mercado, este estudo não foi feito, já que muitos materiais foram reutilizados, buscando um menor gasto na produção.

REFERÊNCIAS

- BECKHEUSER, J. **Indústria metalmeccânica não parou em nenhum momento**. 2021. Disponível em: <<https://www.cbnmaringa.com.br/noticia/industria-metalmeccanica-nao-parou-em-nenhum-momento>> Acesso em: 14 de Jul. 2021.
- BUDYNAS, R.; NISBETT, J. K. **Elementos de máquinas de Shigley**. 10. ed. Porto Alegre: AMGH Editora Ltda., 2016. 1096 p.
- COSTA, L.; ZOTTIS, J.; LISBOA, C.; SCHAEFFER, L. **Interface peça-ferramenta na conformação mecânica: conceitos referentes ao atrito**. 2017. 8 p. Anais do 6º Seminário de Inovação e Tecnologia IFSul. Disponível em: <http://static.sapucaia.ifsul.edu.br/downloads/Anais_6o_INOVTEC-2017.pdf> Acesso em: 13 de Jul. 2021.
- ERDERMIR, A. Solid Lubricants and Self-Lubricating Solids. In: BHUSHAN, B. (Ed). **Modern Tribology Handbook**. CRC Press, 2001. p. 787-825.
- FERREIRA, R. **Conformação Plástica: Fundamentos Metalúrgicos e Mecânicos**. 2. ed. Recife: Editora Universitária UFPE. 2010.
- FREDEL, M. et al. **Propriedades Mecânicas: Ensaio Fundamentais – Vol. 1**. Florianópolis. 2015
- HELMAN, H.; CETLIN, P.R. **Fundamentos da Conformação Mecânica dos Metais**. 2. ed. 2005. 264 p.
- KIMINAMI, C. et al. **Introdução aos processos de fabricação de produtos metálicos**. São Paulo: Blucher. 2013
- MARSON, Michael. **A evolução da indústria de máquinas e equipamentos no Brasil: Dedini e Romi, entre 1920 e 1960**. Belo Horizonte. 2014. p. 685-710.
- MELCONIAN, S. **Sistemas Fluidomeccânicos – Hidráulica e Pneumática**. 1. ed. São Paulo: Saraiva, 2017.

NORTON, Robert. **Projeto de máquinas**. 4. ed. Porto Alegre: Techbooks. 2013

PALMIERI, A. **Manual de hidráulica Básica**. 10. ed. Porto Alegre. 1997.

PFEIL, M.; PFEIL, W. **Estruturas de Aço: Dimensionamento Prático de Acordo com a NBR 8800:2008**. 8.ed. Rio de Janeiro: LTC. 2008.

ROCHA, Otávio. **Conformação Mecânica**. Belém. 2012. 68 p.

Siebel, E.; Panknin, W.: **Das Tiefziehen im Anschlag**. Werkstattstech. Maschinenbau 46 (1956) 321–326.

SILVA, Marco. **Influência do uso de lubrificantes no processo de estampagem profunda com chapas espessas de aço**. Campinas. 2007. 109 p.

SIMÕES, R. **Sistemas hidráulicos e Pneumáticos**. 1.ed. Londrina: Editora e Distribuidora Educacional S.A., 2016.

TSCHIPTSCHIN, A. P. **Mundo dos aços especiais**. Módulo I: Processo de Fabricação. Gerdau, s.d.

YOSHIDA, S. **Seleção de aços e tratamentos térmicos para ferramentas de conformação a frio-estamparia**. 2008. Disponível em:

<http://ftp.demec.ufpr.br/disciplinas/TM206/Prof_Marcondes/Selec.%20de%20A%E7os%20e%20Tra t.%20T%E9rm.%20para%20Ferram.%20Estamparia.pdf> Acesso em: 17 de Jul. 2021.

ZOLIN, I. **Materiais de Construção Mecânica**. 3. ed. Santa Maria. 2010.