

**CENTRO ESTADUAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA
“PAULA SOUZA”
ETEC PEDRO D’ARCÁDIA NETO
Curso Técnico em Mecânica**

**Danilo Bello Leite
Gustavo Vicentino de Oliveira
Hugo Conti da silva
Jhonatan Emanuel Ferreira de Jesus**

**PROJETO E DIMENSIONAMENTO DE UM CURVADOR HIDRÁULICO
PARA TUBOS METÁLICOS**

Assis/SP

2024

Danilo Bello Leite
Gustavo Vicentino de Oliveira
Hugo Conti da silva
Jhonatan Emanuel Ferreira de Jesus

**PROJETO E DIMENSIONAMENTO DE UM CURVADOR HIDRÁULICO
PARA TUBOS METÁLICOS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso Técnico em Mecânica da Etec Pedro D'Arcádia Neto, orientado pelo Prof. Paulo Roberto Longhi, como requisito parcial para obtenção do título de técnico em Mecânica.

Assis/SP

2024

PROJETO E DIMENSIONAMENTO DE UM CURVADOR HIDRÁULICO PARA TUBOS METÁLICOS

Danilo Bello Leite
Gustavo Vicentino de Oliveira
Hugo Conti da silva
Jhonatan Emanuel Ferreira de Jesus

Aprovado em Julho de 2024

BANCA EXAMINADORA

Adalberto Farias Amaro
Professor Convidado

Geraldo Batista Serra
Professor Convidado

Marcio Alessandro de Araújo
Professor Convidado

Paulo Roberto Longhi
Professor Orientador

**FALTANDO A TITULAÇÃO DE CADA PROFESSOR (A FORMAÇÃO ACADEMICA
DE CADA UM)**

DEDICATÓRIA

Primeiramente a Deus por ter concedido saúde e forças para superar todos os imprevistos e dificuldades que surgiram a todos os familiares e amigos por sempre demonstrarem estar ao nosso lado e nos apoiando.

A esta instituição por proporcionar um ambiente criativo e amigável, seu corpo docente, direção, coordenação e administração que nos deram a oportunidade de atingir um horizonte superior, especialmente ao nosso professor orientador Paulo Longhi pela oportunidade de apoio na elaboração deste trabalho.

AGRADECIMENTOS

Gostaríamos de expressar nossa sincera gratidão a todos que contribuíram para a realização deste Trabalho de Conclusão de Curso. Agradecemos ao nosso orientador professor Paulo Longhi, pela orientação cuidadosa, apoio constante e valiosos insights ao longo deste processo.

Agradecemos também aos meus amigos e colegas de classe, que ofereceram suporte moral e trocas de ideias enriquecedoras durante todo o período de estudo. Suas contribuições foram fundamentais para o desenvolvimento deste trabalho.

Somos gratos as nossas famílias, pelo amor incondicional, encorajamento constante e compreensão durante os momentos dedicados a este projeto.

Por fim, expressamos a nossa gratidão às instituições e pessoas que disponibilizaram recursos e informações essenciais para a conclusão deste estudo.

Cada um de vocês desempenhou um papel crucial neste trabalho, e por isso somos profundamente gratos. Obrigado por fazerem parte desta jornada acadêmica e por tornarem possível a realização deste sonho.

EPIGRAFE

"O progresso é impossível sem mudança, e aqueles que não conseguem mudar as suas mentes não conseguem mudar nada."

- George Bernard Shaw

A EPIGRAFE SE NÃO FOR COLOCAR, TEM QUE TIRAR

RESUMO

O projeto proposto nesse trabalho é utilizar os princípios de hidráulica, multiplicação de forças e ciências das matérias para desenvolvimento de um curvador de tubos hidráulico, cuja utilização visa ser em indústrias, áreas de manutenção e áreas de difícil acesso ou utilização de outros equipamentos. O desenvolvimento desse projeto é composto por: Metodologia, revisão bibliográfica, sobretudo em fontes adequadas sobre sistemas hidráulicos, multiplicação de forças, dimensionamento hidráulico, equacionamento e por fim análise dos resultados, onde se pode concluir que o curvador hidráulico de tubos atende completamente as expectativas.

PALAVRAS-CHAVE: Hidráulica; Ciência dos materiais; Multiplicação de forças. **Palavras-chave:** Escola Técnica; Educação; Centro Paula Souza.

ABSTRACT

The project proposed in this work is to use the principles of hydraulic, multiplication of forces and material sciences for the development of a hydraulic tube bender, whose utilization aims to be in industries, maintenance areas and áreas of difficult access or utilization of other equipment. The development of this project is composed of: Methodology, bibliographic review, especially in adequate sources on hydraulic systems, multiplication of forces, hydraulic dimensioning, equation and finally analysis of the results, where it can be concluded that the hydraulic tube bender completely meets the expectations.

KEYWORDS: Hydraulic; material sciences; Multiplication of forces.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Modelo de macaco hidráulico utilizado.....	19
Figura 2 - Componentes de um cilindro de ação dupla.....	23
Figura 3 – Movimento de avanço do cilindro de ação dupla.....	23
Figura 4 – Cilindro de ação simples.....	24
Figura 5 – Desenho CAD do atuador hidráulico.....	25
Figura 6 – Curvador com aba fechada.....	25
Figura 7 – Curvador com aba aberta.....	26
Figura 8 – Diagrama tensão – deformação.....	32
Figura 9 – Raio de dobra da matriz central.....	33
Figura 10 - Forças atuantes nos prisioneiros das roldanas.....	34
Figura 11 - Força cortante em um sólido.....	35
Figura 12 - Distâncias dos braços de alavanca.....	36
Figura 13 – Projeto atualizado com reforços.....	38
Figura 14 - Forças atuantes nos prisioneiros.....	39
Figura 15 - Contato entre prisioneiro 1 e aba superior.....	39
Figura 16 - Contato entre prisioneiro 1 e roldana 1.....	40
Figura 17 – Contato entre prisioneiro 2 e aba superior.....	40
Figura 18 – Contato entre prisioneiro 2 e roldana 2.....	41
Figura 19 – Contato entre prisioneiro 1 e aba inferior.....	41
Figura 20 – Contato entre prisioneiro 2 e aba inferior.....	41
Figura 21 – Contato entre parafuso central e aba inferior.....	41
Figura 22 – Contato entre parafuso central e aba superior.....	42
Figura 23 - EPIs necessários na operação do curvador de tubos.....	42
Figura 24 – Base “tripé”.....	43

Figura 25 – Chapa em fase de acabamento.....	44
Figura 26 – Chapa em fase de pintura.....	44
Figura 27 – Projeto concluído.....	45

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Custos de execução.....	27
Tabela 2 – Momento plástico de cada tubo.....	34

LISTA DE ABREVIações E SIGLAS

CEETEPS – Centro Estadual de Educação Tecnológica “Paula Souza”

CPS – Centro Paula Souza

Etec – Escola Técnica Estadual

CS – Coeficiente de Segurança

NR – Normas Regulamentadoras

CAD – Computer Aided Design

d – Diâmetro

F – Força

MPa – Mega pascal

mm – Milímetros

m – Metros

Mp – Momento plástico

w – Momento de rigidez

R – Raio externo

r – Raio interno

K_t – Relação de dobramento

R_{med} – Raio médio

P – Pressão

ΔP – Variação de pressão

σ_e – Limite de escoamento

τ – Tensão de cisalhamento

A – Área

I – Momento de inércia

pol – polegada

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO.....	13
JUSTIFICATIVA.....	15
OBJETIVOS.....	17
Objetivos Gerais.....	17
Objetivos Específicos.....	17
METODOLOGIA.....	18
3.1 Conceituação de tubo curvador.....	18
3.2 Princípios hidráulicos da estática de fluídos.....	20
3.2.1 Conceitos fundamentais da hidráulica.....	20
3.2.2 Conceitos da estática dos fluídos (hidrostática).....	21
3.2.2.1 Lei de Pascal.....	21
3.3 Sistema hidráulico de multiplicação das forças.....	22
4.4 Desenvolvimento do projeto com auxílio de software.....	24
4.5 Aplicabilidades.....	26
4.6 Custos de Execução.....	27
REVISÃO BIBLIOGRÁFICAS.....	28
5.1 Hidráulica.....	28
5.2 Fluídos hidráulicos.....	29
5.3 Transmissão de forças hidráulicas.....	30
5.4 Momento necessário para curvar um tubo.....	31
5.5.1 Diagrama tensão – diplomação.....	32
ANÁLISE DE RESULTADOS.....	33
6.1 Tensão de cisalhamento nos prisioneiros das roldanas.....	34
6.2 Tensão de cisalhamento no parafuso central.....	37
6.3 Adição de um reforço na estrutura do parafuso central.....	37
6.4 Análise do projeto através do Método de Elementos Finitos (MEF).....	38
6.5 NR 12 segurança no trabalho em maquinas e equipamentos.....	43
6.6 Ergonomia do operador.....	43
CONCLUSÃO.....	46
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	47

INTRODUÇÃO

Uma máquina com a capacidade de realizar uma curva em um tubo metálico é algo existente e até comum no mercado atual, mas há restrições quando se refere ao custo de obtenção, esforço necessário para a execução e a dificuldade de locomoção com o equipamento, dessa forma, levando em consideração a carência de amplitude desses equipamentos no mercado atual, foi desenvolvido o projeto de um curvador para tubos metálicos voltado para manutenção mecânica em campo, no qual utiliza-se um sistema hidráulico para transmissão de força. Os sistemas de transmissão de força ou potência se dividem em três grupos, sendo eles: mecânico, elétrico e fluídico. Isto posto, os sistemas de transmissão de potência mecânica são aqueles onde a energia é transmitida por esforço mecânico, conhecida por ser a forma de transmissão de potência mais antiga, sendo iniciada com a invenção da roda, e atualmente é largamente utilizada em sistemas de engrenagens, correntes e correias. Já os sistemas de transmissão de potência elétrica, são os sistemas dos tempos modernos, onde são utilizados motores elétricos, geradores, condutores entre outros componentes. Estes sistemas são muito utilizados em casos que há a necessidade de transmissão de energia em grandes distâncias. Por fim, tem-se o terceiro grupo de transmissão de potência, a transmissão de potência fluídica, na qual se utiliza fluidos para fazer essa transmissão, onde se divide em dois subgrupos, sendo eles, hidráulico e pneumático. Dessa forma, a transmissão de potência hidráulica utiliza os líquidos para seu funcionamento, sendo os mais comuns o óleo e a água. Já a transmissão de potência pneumática utiliza o ar como fluido de trabalho, sendo necessário um compressor para comprimir o ar e assim dar a energia necessária para a aplicação do sistema. Contudo, o sistema hidráulico utiliza um fluido que é incompressível (óleo hidráulico) e com isso gera mais força que o sistema pneumático, tendo em vista que o ele utiliza o ar, um fluido compressível, gerando menos força ao final do processo. À vista disso, o projeto do curvador de tubos metálicos, tem-se a necessidade de um sistema de transmissão de potência que seja eficiente e de fácil manuseio, sendo assim, o sistema dimensionado no projeto foi o sistema hidráulico de multiplicação de força, ou seja, um sistema onde o operador aplique uma quantidade de força relativamente baixa que ao passar pelo sistema hidráulico é multiplicada através do princípio de Pascal.

“A pressão aplicada num ponto de um fluido em repouso transmite-se integralmente a todos os pontos do fluido.” (BRUNETTI, 2008, p. 21) 15 Dessa forma, Blaise Pascal em sua publicação da chamada Lei de Pascal, explica o funcionamento de vários sistemas que posteriormente seriam inventados através desse princípio, onde uma força aplicada em um recipiente fechado com um fluido interno irá gerar uma pressão nesse fluido, sendo assim, todos os pontos do fluido sofrerão a mesma intensidade dessa pressão em todas as direções. Diferentemente de um sólido que ao aplicar uma determinada força em um objeto, este irá aplicar uma força resultante de mesma intensidade com direção oposta, segundo a terceira lei de Newton, a conhecida Lei da Ação e Reação. Atualmente há inúmeras aplicações de sistemas hidráulicos que utilizam o Princípio de Pascal para realizar a multiplicação força, como por exemplo, prensas, freios, macacos, elevadores entre muitos outros equipamentos. Entretanto, para que seja possível compreender o sistema de multiplicação de força, pode-se fazer uma referência com o seguinte princípio enunciado por Antoine Laurent Lavoisier: “Na natureza nada se cria, nada se perde, tudo se transforma.” Iguamente, o autor deste princípio refere-se à conservação das massas, ou seja, em um sistema fechado a massa total não será alterada independente dos processos aos quais estão expostas, entretanto, em 1850 Rudolf Clausius e Lorde Kelvin desenvolveram a Primeira Lei da Termodinâmica: “Energia não pode ser criada nem destruída durante um processo; ela pode apenas mudar de forma.” (ÇENGEL E BOLES, 2013, p. 70) Portanto, pode-se afirmar que no processo de multiplicação de força através do sistema hidráulico regido pela Lei de Pascal, a energia fornecida no início do processo será mesma energia ao final deste processo, pois ela não pode ser criada, sendo limitada apenas a mudança de sua forma, por exemplo, num sistema de dois pistões de áreas superficiais diferentes, interligados e preenchidos por um fluido incompressível, quando há a aplicação uma pequena força que irá gerar um deslocamento em um dos pistões, sendo ele de menor área superficial, então o sistema irá gerar uma força superior no pistão de área maior, pois a igualdade se dá pela pressão nos dois pontos, porém o deslocamento deste pistão será inferior ao deslocamento do pistão ao qual foi aplicada a força, igualando assim a equação de energia do sistema, tendo em vista que trabalho é igual à força multiplicada pela distância e trabalho também é uma forma de energia mecânica.

JUSTIFICATIVA

É de conhecimento geral que na manutenção mecânica há diversas dificuldades de acesso, sejam elas por falta de espaço, trabalho em altura, entre outros fatores. Pensando nisso, o projeto desenvolvido neste trabalho teve o intuito de aplicação no setor de manutenção mecânica em geral, pois em um sistema de tubulação metálica é comumente usadas curvas compradas onde são soldadas nas tubulações para fazer a conexão. Entretanto, com um curvador hidráulico de fácil manuseio e sem necessidade de extremo esforço por parte do operador, é possível realizar a curva necessária na própria tubulação sem a necessidade de adição de uma curva comercial, gerando assim uma redução no tempo de manutenção, economia e evitando deslocamentos desnecessários. O esforço hidráulico está diretamente ligado ao projeto desenvolvido pelos discentes, pois mover um objeto através de multiplicação de forças é um dos princípios básicos de diversos maquinários já existentes, como por exemplo, guinchos, macacos, prensas etc. Dessa forma, pode-se simplificar o sistema hidráulico como a ação de mover um objeto através de um esforço auxiliado por um fluido, seja ele óleo, água ou outro líquido. A importância do projeto se dá pela sua alta aplicabilidade, fácil manuseio e baixo custo. Sendo assim, buscou-se desenvolver um sistema hidráulico que seja capaz de efetuar curvas em tubulações sem gerar um alto custo, gerar uma maior ergonomia para os colaboradores devido à grande redução de esforço físico sem deixar de lado um aumento de produção exponencial para a empresa no setor de solda e montagem. O projeto do curvador hidráulico foi dimensionado com a finalidade de possibilitar a realização de curvas até um ângulo de 90° , sendo os ângulos definidos pelo posicionamento final do pistão hidráulico e as roldanas de apoio, além disso, abranger os tubos com diâmetros de $1/2''$ e $3/4''$ e espessura de paredes de 1 a 5 mm. Perante esses fatos estudados, a aplicação dos fundamentos hidráulicos de Pascal e outros fundamentos foram muito vantajosos para o projeto, pois com eles consegue-se desenvolver grandes forças com pequenos volumes fluidos e alta flexibilidade de instalação. Através de cálculos e princípios mecânicos da hidráulica foi possível provar que ele é realmente eficaz e atende as necessidades. Pesquisando e conhecendo sobre o mercado industrial, não somente brasileiro, mas mundial, ficou claro que existe uma carência e dificuldade para a manutenção e curvas de tubos devido a diversos fatores. Portanto, o projeto de um maquinário

portátil que utiliza sistema hidráulico para dobra de tubos torna-se muito promissor para as empresas em geral. Está se tornando cada vez mais difícil imaginar alguma empresa em qualquer área de atuação que não utilize tubulação metálica em alguma aplicação, elas estão por toda parte, como por exemplo, indústrias mecânicas, metalúrgicas, aeronáuticas, hidrelétricas, petrolíferas, alimentícias e usinas. Apesar desse tipo de estrutura estar muito presente, a maneira com que se lida com ela atualmente é incrivelmente ineficaz, como já citado no texto. Sabe-se que, o que tem sido um problema para as empresas em relação às tubulações são que elas acabam gerando custos duas vezes. O primeiro custo é com a própria tubulação e o segundo é com as curvas e conexões que acabam tendo que ser soldadas. Atualmente na indústria utilizam-se muitas horas de trabalho de colaboradores seja com solda, adaptações etc. Entretanto, com a aplicação do curvador hidráulico de tubos, o tempo de trabalho será reduzido, visto que a necessidade de solda seria restrita em alguns pontos de ligação, pois a curva da tubulação será gerada através de esforço hidráulico. Sendo assim, é difícil imaginar que uma empresa não deseje aderir a essa técnica que tem muito a somar e é uma solução de baixo custo, além de poder gerar uma economia não somente na área de colaboração da empresa, mas também evitar gastos de recursos financeiros. Pensando na redução de custo industrial e na necessidade de atendimento específico no setor de dobras e curvas nas tubulações, escolheu-se desenvolver esse projeto, embora já tenha produtos similares no mercado, mas sua utilização acaba sendo limitada por ser de difícil acesso, manuseio e instalação o que gera por si só um custo mais alto para indústrias e torna-se inviável dependendo das dimensões da empresa. Este projeto visou-se ser portátil, podendo ser levado para diversas empresas e setores, sem nenhum tipo de instalação prévia, tornando-o uma potência para utilização em larga escala. Sendo assim, qualquer pessoa com um raso conhecimento na área seria capaz de utilizá-lo sem maiores dificuldades e sem muito esforço devido a utilização do sistema hidráulico para multiplicação de força.

OBJETIVOS

2.1 Objetivos Gerais

Desenvolver um curvador hidráulico de tubos metálicos, baseado nos princípios da estática dos fluidos com ênfase na multiplicação de força, que seja de fácil manuseio, alta aplicabilidade e baixo custo de obtenção.

2.2 Objetivos Específicos

- Conceituação de curvador de tubos;
- Princípios da hidráulica e estática dos fluidos (Hidrostática);
- Compreender os princípios da multiplicação de forças;
- Desenvolvimento do projeto com auxílio de software;
- Aplicabilidades;
- Custos de execução.

METODOLOGIA

O propósito dessa pesquisa experimental, como já exposto anteriormente, é analisar os problemas relacionados aos métodos de manutenção mecânica em tubulações de metais existentes, e a partir dessa análise propor uma solução experimental, no qual os dados obtidos serão analisados de maneira qualitativa e quantitativa, isto é, analisar a qualidade do produto obtido, assim como os valores calculados de resistência e esforço necessário.

3.1 Conceituação de Tubo Curvador

Conceituação de Curvador de Tubos Antes de falar de curvador de tubos deve-se primeiro entender o conceito do funcionamento de tal equipamento e porque se pode tornar um algo crucial para quaisquer empresas que façam uso frequente de tubulações metálicas. Dito isso, afinal o que é um curvador de tubos?

Os curvadores de tubos podem apresentar as mais variadas formas e aplicações, podendo ser por alavanca manual, hidráulico, pneumático ou até mesmo por motor elétrico, entretanto, suas aplicações se baseiam nos mesmos princípios, pois o intuito dessa máquina é simplesmente realizar uma curva em um determinado tubo, podendo variar o ângulo da curva dependendo da aplicação de tal, assim como o diâmetro do tubo. Apesar da função destas máquinas serem bem simples, há uma série de fatores e fenômenos que ocorrem no processo da curva de um tubo, pois este irá sofrer a ação de um processo de fabricação mecânica, mais especificamente, o processo de conformação mecânica. “Em um ambiente industrial, a conformação mecânica é qualquer operação durante a qual se aplica esforço mecânico em diversos materiais, resultando em uma mudança permanente de formas e dimensões.” (MORO e AURAS, 2007, p.03)

O processo de conformação mecânica pode ser dividido em dois grandes grupos: processos mecânicos que são aqueles que a modificação de forma ocorre devido a aplicação de forças e os processos metalúrgicos em que a mudança de forma ocorre devido a mudança de temperaturas. Para deixar mais claro a diferença entre estes dois tipos de processos, pode-se separá-los em grupos:

Processos mecânicos: Laminação, extrusão, trefilação, estampagem etc.

Processos metalúrgicos: fundição, soldagem, lingotamento etc.

Tendo em vista o acima exposto, é importante esclarecer que o projeto desenvolvido faz a mudança de forma do tubo devido a aplicação de esforços mecânicos, a mudança permanente da forma do material que é conformado a frio, é o resultado de uma deformação plástica, isto é, o corpo metálico é solicitado por uma tensão superior a tensão limite de escoamento, fazendo com que ele se deforme absorvendo energia em seu regime plástico, e quando esse esforço mecânico aplicado for removido, o material deformado não retorna a seu estado inicial permanecendo com a deformação provocada pelo esforço mecânico aplicado ao corpo sólido.

Atualmente na área industrial as curvas comercializadas são padronizadas, ou seja, tem valores de ângulos pré-definidos. Este fato acaba limitando a aplicação em ambientes que exija curvas com ângulos específicos (não padronizados), entretanto, com a aplicação de um equipamento capaz de realizar curvas em tubulações metálicas, esse problema é solucionado, visto que ele poderá realizar a curva que atenda a necessidade. Devido a essa carência de curvas não padronizadas, optou-se por desenvolver um curvador de tubos acionado pelo atuador de um macaco hidráulico manual com capacidade para duas toneladas de força.



Figura : 1 Modelo de macaco hidráulico utilizado; Fonte: Copafer.com

Com um atuador de um macaco hidráulico com tal capacidade de carga é possível efetuar curvas em uma vasta gama de tubulações, podendo realizá-las em

tubulações de materiais como o alumínio e até mesmo o aço, dependendo é claro da ductilidade do material e sua resistência a trincas e fissuras.

Por fim, há outra vantagem que o curvador de tubos traz à tubulação de metal, o aumento de resistência no ponto onde a curva foi realizada, pois no processo de encurvamento do tubo metálico há um fenômeno que ocorre devido a compressão a frio, tendo em vista que a região que o material sofrerá a aplicação de força será comprimida e sua região oposta será tracionada, sendo assim, com a compressão de uma das regiões ocorre o encruamento parcial dela, gerando um aumento de resistência. Entretanto, para que esse fenômeno ocorra, é necessário que o material do tubo seja dúctil para que não apareçam fissuras e trincas na região tracionada.

3.2 Princípios hidráulicos da Estática dos Fluidos (Hidrostática).

A física que o ser humano conhece atualmente se divide em diversos grupos e contextos, mas pode-se destacar a parte da física que estuda a hidráulica, tendo em vista que essa área é uma das mais antigas, pois há relatos de trabalhos egípcios que utilizaram a hidráulica para serem realizados. Na época o fluido utilizado foi a água, diferentemente dos dias atuais que se utilizam na maioria dos casos o óleo por ter uma viscosidade maior, além de outros fatores primordiais. Entretanto, para que seja possível o completo entendimento dos princípios hidráulicos da estática dos fluidos, há a necessidade de uma conceituação básica dessa área da física tão extensa.

3.2.1 Conceitos fundamentais da hidráulica.

Fluido - A definição mais básica sobre esse conceito diz: “*Fluido é uma substância que não tem uma forma própria, assume o formato do recipiente.*” (BRUNETTI, 2008, p. 01). Dessa forma, compreende-se que fluidos são líquidos e gases.

Força – Pode ser definida como qualquer causa que tende a produzir ou modificar movimentos, e segundo Isaac Newton, $F_r = m \cdot a$, ou seja, a força que tende provocar movimento em um objeto é proporcional a massa e a aceleração dele.

Pressão – Resume-se em uma quantidade de força aplicada em uma determinada área e seu valor se dá pela razão entre essas duas componentes, ou seja, $P = F/A$.

Hidrostática – Área da física que estuda os fluidos em repouso, ou seja, $V = \text{zero}$.

Hidrodinâmica – Área da física que estuda os fluidos em movimento, ou seja, $V \neq$ zero.

Sendo assim, com a conceituação básica sobre a hidráulica, podem-se compreender melhor os conceitos da Hidrostática.

3.2.2 Conceitos da Estática dos Fluidos (Hidrostática).

Inicialmente, os fluidos podem exercer dois tipos de forças, sendo elas, forças normais e de cisalhamento, entretanto quando o fluido se encontra em repouso, ou seja, sua velocidade é igual a zero, a sua viscosidade não terá nenhum efeito de cisalhamento, sendo assim, o fluido em repouso apresenta somente um tipo de força, que é a força normal e o efeito dessa força atuante é conhecido como pressão.

De maneira geral, a pressão exercida por um fluido sobre uma superfície qualquer é o resultado dos impulsos exercidos pela vibração das moléculas do fluido, pois quando entram em contato elas ricocheteiam na superfície. A vista disso, a pressão é definida pela razão entre a força e a área a qual a força é aplicada, entretanto, para que essa fórmula seja aplicável em todas as situações possíveis, pode-se definir a pressão “[...] *como a força que atua na direção normal a uma área dividida por essa área*” (HIBBELER, 2016 p. 39).

3.2.2.1 Lei de Pascal.

Como já exposto anteriormente, a Lei de Pascal é um dos principais pilares da estática dos fluidos, pois nesta lei enunciada no século XVII pelo francês Blaise Pascal, diz que a intensidade da pressão atuando em um ponto de um fluido é a mesma em todas as direções. Em um exemplo trivial pode-se observar o princípio de Pascal de maneira clara e intuitiva, pois é de conhecimento geral que um fluido no qual há uma pressão sendo aplicada, onde não há agitação do mesmo, pode-se deduzir que seria inviável dizer que as direções das forças neste fluido são diferentes, pois se fossem diferentes haveria um desequilíbrio entre as moléculas causando a agitação, fato que não é observado em um experimento prático, podendo assim chegar à conclusão que o princípio enunciado por Pascal é verdadeiro e comum.

Sendo assim, com este princípio, pode-se obter um sistema hidráulico de multiplicação de forças, sistema esse que foi selecionado para o projeto desenvolvido.

3.3 Sistema hidráulico de multiplicação de forças.

O sistema hidráulico desenvolvido no projeto trouxe a proposta de utilizar o atuador de um macaco hidráulico tipo “jacaré”, pelo fato de ser bem comum e fácil de ser encontrado, evitando assim um custo maior para o desenvolvimento, pois muitos desses equipamentos podem ser encontrados sem uso, podendo assim ser reaproveitado evitando custos desnecessários.

Os equipamentos que fazem o trabalho do sistema hidráulico de multiplicação de força são os atuadores. Estes equipamentos são responsáveis por converter a energia de trabalho em energia mecânica útil e é o principal item que deve ser considerado no projeto dos equipamentos hidráulicos, onde possuem os pontos de atividades visíveis que são realizadas. Existem basicamente dois tipos de atuadores hidráulicos, sendo eles, os lineares e os rotativos.

O atuador empregado no projeto desenvolvido é considerado um atuador linear com um cilindro de ação simples, isto é, são atuadores que realizam movimentos lineares podendo deslocar grandes cargas.

Já o cilindro pode ser explicado de acordo com a apostila de Parker:

Um cilindro consiste em uma camisa (tubo), de um pistão móvel e de uma haste ligada ao pistão. Os cabeçotes são presos ao cilindro por meio de roscas, prendedores, tirantes ou solda (a maioria dos cilindros industriais usam tirantes). Conforme a haste se move para dentro ou para fora, ela é guiada por embuchamento (conjunto removível do mancal com guarnições). O lado para o qual a haste opera é chamada de lado dianteira ou "cabeça do cilindro". O lado oposto sem haste é o lado traseiro. Os orifícios de entrada e saída estão localizados nos lados dianteiro e traseiro. (PARKER, p.02)

A figura 2 a seguir traz uma ilustração básica dos componentes dos cilindros de ação dupla, ou seja, há o movimento de ida e volta através da movimentação do fluido interno. O cilindro de ação dupla foi selecionado para a exemplificação para maior entendimento do sistema hidráulico.

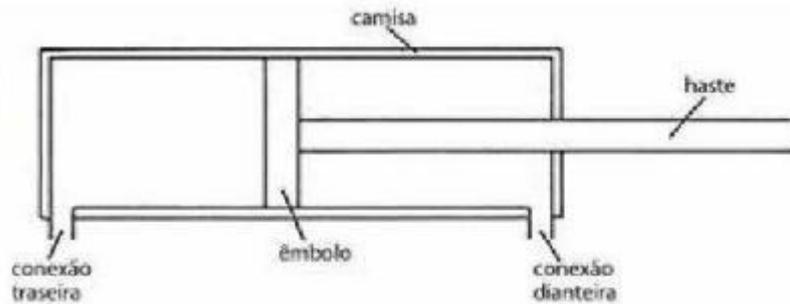


Figura 2 - Componentes de um cilindro de ação dupla

Fonte: Sistemas hidráulicos industriais - SENAI-SP, 2012

Quando a conexão traseira é acionada por uma pressão, o fluido interno do cilindro empurra o êmbolo para frente, fazendo a haste se estender, sendo assim produz o chamando movimento de avanço do cilindro, como mostra a figura 3.

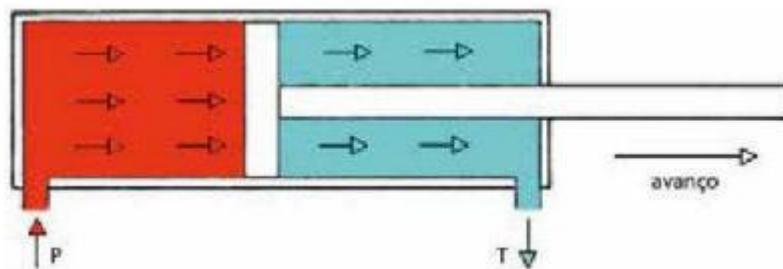


Figura 3 - Movimento de avanço do cilindro de ação dupla

Portanto, no cilindro de dupla ação, o retorno é feito hidráulicamente, ou seja, o fluido na câmara dianteira é empurrado pelo êmbolo de volta ao tanque e quando a câmara dianteira é pressurizada, ocorre o retorno do êmbolo. Entretanto, nos cilindros de ação simples, o retorno é feito de forma diferente. Eles têm esse nome porque em uma direção tem movimento criado pela pressão e fluxo hidráulico, e no outro lado tem movimento criado por qualquer outro meio que não o fluido hidráulico, podendo ser por ação de gravidade (macacos hidráulicos), molas entre outros meios, como mostra a figura 4.

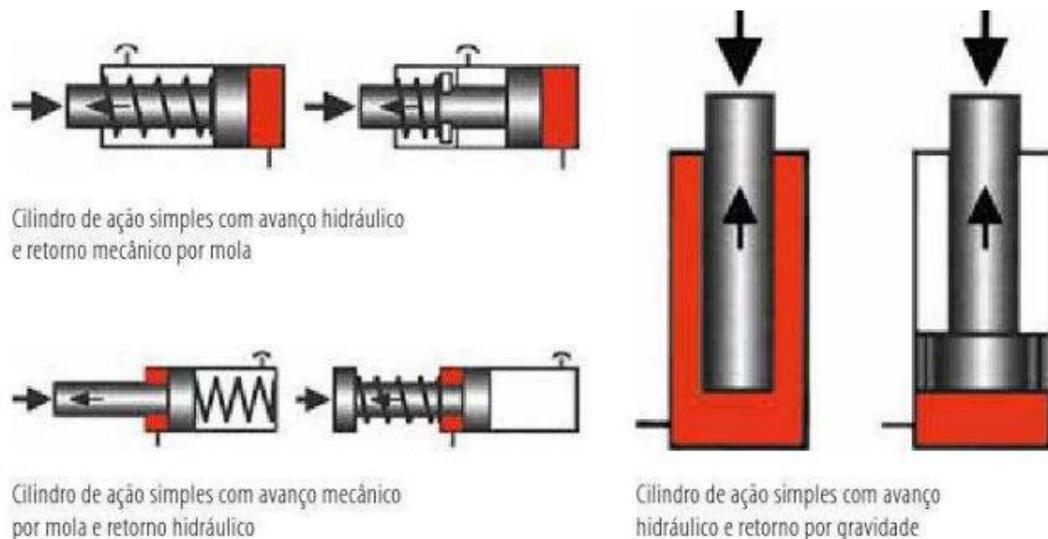


Figura 4 - Cilindros de ação simples.

Fonte: Sistemas hidráulicos industriais - SENAI-SP, 2012

Vale ressaltar que o cilindro empregado no projeto possui sistema de ação simples com retorno feito por mola, já que o intuito é ser usado na posição horizontal, para uma melhor ergonomia do operador.

4.4 Desenvolvimentos do projeto com auxílio de software.

Inicialmente, para o desenvolvimento do projeto foi realizados estudos acerca do tipo de atuador que seria utilizado, sendo assim, optou-se por utilizar o atuador de um macaco hidráulico tipo “jacaré”, pela facilidade de se encontrar no mercado e a possibilidade de se reutilizar de um equipamento sem uso.

Dessa forma, para que a visualização do projeto fosse mais clara, foi desenvolvido um projeto com o auxílio do software de desenho CAD (Computer Aided Design). O software utilizado para o projeto foi o Solidworks, devido a sua vasta gama de utilidades, visto que, com o software é possível desenvolver o projeto, fazer uma análise previa estrutural além do dimensionamento da estrutura para maior facilidade na execução. O primeiro passo para o desenvolvimento do projeto foi a realização do desenho do atuador hidráulico em tamanho real para que toda a estrutura que envolve ele seja dimensionado de forma rápida e simplicista, tendo em vista que essa é a peça-chave do projeto.

A figura 5 mostra o desenho CAD do atuador empregado no projeto.



Figura 5 - Desenho CAD do atuador hidráulico.

Fonte: Própria

Em seguida, foi desenvolvida a estrutura do projeto de forma simples, entretanto eficiente, levando em consideração as angulações de orifícios para que sejam realizadas curvas com diferentes aberturas. Além disso, foi desenvolvido um sistema de articulação na parte superior da aba de sustentação para que fosse possível a remoção da tubulação encurvada sem grandes dificuldades, como mostra a figura 6 e figura 7.



Figura 6 - Curvador com aba fechada.

Fonte: Própria



Figura 7 - Curvador com aba aberta.

4.5 Aplicabilidades.

O sistema hidráulico desenvolvido no projeto trouxe como objetivo aplicar os conceitos de pascal a um protótipo portátil, de fácil manuseio, sem instalação prévia para que possa ser aplicável em campo nas indústrias, em manutenções e locais de difíceis acessos.

Para gerar uma alta aplicabilidade e atender as indústrias o projeto apresenta:

- Leveza;
- Fácil deslocamento;
- Fácil manuseio;
- Não necessita de instalação;
- Portátil;
- Baixo custo;

Como já exposto anteriormente, uma máquina com a capacidade de realizar uma curva em um tubo metálico e que utilize o princípio hidráulico de pascal e multiplicação de forças para dobra dele é algo já existente e comum, porém os modelos disponíveis no mercado e que estão sendo usados na indústria são modelos que necessitam de instalação previa e acabam por serem limitados a

alguns ambientes, sendo assim, o projeto foi desenvolvido com a finalidade de suprir tal necessidade.

Devido a sua leveza, fácil manuseio e portabilidade, qualquer pessoa da área de manutenção consegue utilizá-lo facilmente em suas atividades. Além disso, as altas reduções de custo que o projeto apresenta aumentam ainda mais sua aplicabilidade, pois quando utilizado reduz a mão de obra, material, curvas, solda, disco de cortes, acarretando um aumento na produção, já que ela ficará menos tempo parada para manutenção.

4.6 Custos de execução

Através de pesquisas e orçamentos feitos em vendedores da região, obteve-se o levantamento de custos prévio para execução do projeto, levando em conta sempre o menor valor obtido.

Itens	Quantidade	Valor (R\$)
Macaca Tipo Jacaré	1	172,99
Tinta PU	675 ml	64,95
Primer PU	900 ml	54,23
Thiner	900 ml	35,27
Lixa 320	5	18
Disco de Corte	15	32,25
Disco Flap	2	14,96
Eletrodo 7018	0,50 kg	14,00
Parafuso ½ x 5	3	10,65
Porca ½	3	2,40
Broca para metal ½	1	45,85
Chapa 1/4" 500x150mm	2	250,00
Tarugo Ferro Mecânico 4"x 200mm	1	260,00
Mão de Obra	-	800,00
TOTAL	-	1775,55

Tabela 1 - Custos de execução

5. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

5.1 Hidráulica.

Um dos vestígios conhecidos mais antigos de obras hidráulicas consiste de complexos sistemas de canais de irrigação e de navegação, construídos pelos Sumérios, na Mesopotâmia. Estes canais constituíram o marco fundamental da civilização Suméria e, pode-se dizer, também da engenharia Hidráulica. (BAPTISTA, LARA, 2014, p. 24)

Desde o início de sua existência, o homem serviu-se dos fluidos para facilitar seu trabalho, e enfim, sua vida. A história antiga registra que dispositivos engenhosos, como bombas e rodas-d'água, já eram conhecidos desde épocas bem remotas. Entretanto, o ramo da história que nos interessa somente passou a ser utilizado a partir do século XVII. Baseava-se no princípio descoberto pelo cientista francês Blaise Pascal e consistia no uso de fluido confinado para transmitir e multiplicar força e modificar movimentos. (MOREIRA, 2012, p.11)

Hidrodinâmica foi o termo associado ao estudo teórico, ou matemático, do comportamento de um fluido perfeito (fluido que não apresenta atrito) enquanto o termo hidráulico foi utilizado para descrever aspectos aplicados, ou experimentais, do comportamento real dos fluidos (particularmente o comportamento da água). (MUNSON, 2004, p.24)

A hidráulica é a parte da Física que consiste no estudo do comportamento dos líquidos confinados e de sua utilização na execução de trabalho. A palavra Hidráulica provém do grego hidra, que significa água, e aulos, que corresponde a cano. (MOREIRA, 2012, p.11)

O uso do fluido confinado é um dos modos mais versáteis para modificar movimentos e transmitir forças. É tão rígido quanto o mais puro aço e, ao mesmo tempo, infinitamente flexível. Pode assumir instantaneamente todas as formas possíveis e imaginárias e penetrar em qualquer passagem, por mais estreita que seja. Pode ser dividido em partes, cada qual realizando uma operação determinada e, novamente, se agrupar para trabalhar como um todo. Pode se movimentar rapidamente em um trecho da instalação e lentamente em outro, de acordo com a necessidade. É capaz de transmitir um máximo de força, ocupando um mínimo de espaço e peso. (MOREIRA, 2012, p.09).

Muitas máquinas e processos diferentes utilizam um fluido para desenvolver uma força para mover ou sujeitar um objeto, ou para controlar uma ação. Nos automóveis, por exemplo, são utilizados freios hidráulicos para parar o carro. [...] Muitas unidades a fluidos são empregadas pela indústria moderna. Podem ser citadas inúmeras aplicações. As máquinas e os processos estão tornando-se mais e mais automatizados para fazer frente à competição e reduzir o erro humano. (STEWART, 2006, p.11).

De modo geral, vários fluidos podem ser usados em dispositivos e sistemas. O termo hidráulico relaciona-se a um líquido. O termo turbina hidráulica, por exemplo, pode ser utilizado para designar uma turbina que envolva um fluxo de água. Em um sistema hidráulico, podem ser utilizados óleo, água ou outro líquido. (STEWART, 2006, p.11)

Os sistemas hidráulicos são caracterizados por pressões muito elevadas, de modo que as variações de pressão hidrostática podem ser frequentemente desprezadas. Os freios hidráulicos automotivos desenvolvem pressões de até 10 MPa; sistemas de atuação hidráulica de aviões e máquinas são frequentemente para pressões de até 40 MPa e os macacos hidráulicos usam pressões de até 70 MPa. (FOX, McDONALD, PRITCHARD, 2012, p.70)

5.2 Fluidos Hidráulicos.

Para Stewart (2013), em hidráulica, os fluidos são divididos normalmente em três categorias: óleos minerais, fluidos de base sintética e água. Os dois primeiros tipos de fluidos são usados em “dispositivos de potência acondicionados”.

A função de um bom fluido hidráulico é tripla: (1) é um meio transmissor de potência hidráulica; (2) é um meio lubrificador dos componentes do sistema de potência fluida; e (3) atua como um vedador. A seleção do fluido hidráulico adequado é importante, e tem influência direta na eficiência do sistema hidráulico, no custo de manutenção, e na vida útil dos componentes do sistema. (STEWART, 2013, p.151)

O fluido hidráulico tem como principal função transmitir energia de pressão, além de lubrificar todas as partes móveis do sistema, dissipar o calor gerado, remover partículas sólidas e vedar folgas entre peças em movimento. (SIMÕES, 2016, p.149)

O fluido hidráulico necessita de requisitos de qualidade para manter o sistema hidráulico em funcionamento adequado. Portanto, um fluido hidráulico de qualidade tem as seguintes características: evitar a corrosão das partes internas de válvulas, bombas hidráulicas e atuadores; impedir a formação de sedimentos (também chamados de gomas de petróleo), que bloqueiam a passagem das válvulas e as telas dos filtros; reduzir a espuma que pode causar cavitação na bomba; não deve se deteriorar quimicamente em condições de utilização extremas; resistir às variações de temperatura e vazão; formar um película protetora, evitando o desgaste por atrito de peças em movimento; não emulsificar com água; não deteriorar gaxetas e vedações instaladas no sistema. (SIMÕES, 2016, p.149).

5.3 Transmissões de Forças Hidráulicas.

A hidráulica, parte da Física que analisa o comportamento dos fluidos em movimento e em repouso, também é um conhecimento extremamente antigo, que nos permite atualmente transmitir potência e controlar movimentos precisos utilizando fluidos sob pressão, duas aplicações excessivamente utilizadas na indústria moderna. (SIMÕES, 2016, p.07)

Uma transmissão hidráulica é uma possibilidade de transformação do movimento rotativo, que utiliza bombas e motores hidráulicos intermediários. Este modelo permite uma maior liberdade de disposição dos elementos utilizados na transmissão, somente necessitando de tubulações hidráulicas como elemento de ligação e dispondo uma possibilidade adicional de regulagem da relação da transmissão e do sistema de amortecimento (NIEMANN, 2002).

A Mecânica dos Fluidos, nesse âmbito, volta-se ao comportamento de fluidos em repouso e em movimento e às forças agindo sobre esses sistemas. A história mostra que os estudos mais importantes nessa área são datados do final do século XIX e início do século XX. A “teoria da camada limite” apresentada por Ludwig Prandtl, em 1904, é um marco referencial.

nesse contexto. Reynolds, Froude e Von Kármán também dedicaram seus estudos a esses fenômenos e são nomes comuns nos textos desta área. (VILANOVA, 2011, p.11)

Essas forças são capazes de produzir ou modificar o escoamento. A força resultante que atua sobre a massa fluida contida em um volume de controle é a soma de forças de superfície e forças de corpo. (VILANOVA, 2011, p.32)

A lei de Pascal afirma que: "a pressão exercida em um líquido estático confinado atua em todos os sentidos e direções, com a mesma intensidade, exercendo forças iguais em áreas iguais", princípio que 26 U1 - Fundamentos dos sistemas hidráulicos e pneumáticos embasa o conceito da transmissão de energia hidráulica - multiplicação de força (PASCAL, 2005, p. 9).

Os sistemas hidráulicos são necessários principalmente quando precisamos multiplicar uma força a ser aplicada, utilizando-se de um líquido sob pressão para tal finalidade. As principais características de sistemas hidráulicos são: elevado custo inicial; baixa relação peso/ potência; movimentos rápidos controlados e movimentos de precisão extremamente lentos; armazenamento simples de energia através de acumuladores hidráulicos; sistema auto lubrificante; possibilidade de poluição ambiental devido a vazamentos; perigo de incêndio devido ao fluido de trabalho ser inflamável. (SIMÕES, 2016, p.24).

5.4 Momento necessário para curvar um tubo.

A força necessária para dobrar os tubos é um parâmetro importante na determinação da melhor solução para o projeto do equipamento, podendo influenciar no mecanismo de acionamento, pois no caso de um acionamento manual, a força deve ser compatível com a capacidade física de um homem adulto. (CAGNONI, p.03).

A força de conformação deve ser calculada através de analogia com a resistência a flexão, considerando o limite de resistência a momentos do tubo, ponto no qual o momento fletor atuante atinge o chamado momento plástico M_p , ou seja, instante em que, para efeitos práticos, toda seção transversal do tubo sofre deformação plástica. (CAGNONI, p.03).

5.5.1 Diagrama tensão-deformação.

Segundo Hibbeler (2010, p. 246) alguns materiais como o aço, tendem a exibir comportamento elástico perfeitamente plástico quando a tensão no material ultrapassa σ_e .

Pelos dados obtidos em um ensaio de tração ou compressão, é possível calcular vários valores da tensão e da deformação correspondente no corpo de prova e, então, construir um gráfico com esses resultados. A curva resultante é denominada diagrama tensão-deformação. (HIBBELER, 2010, p. 58)

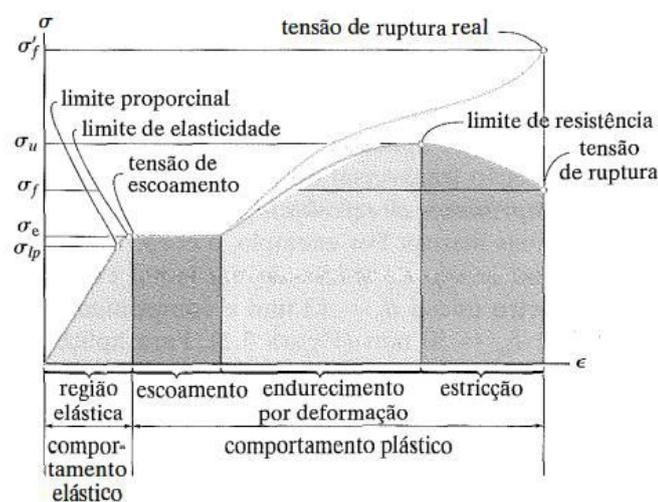


Figura 8 - Diagrama tensão-deformação

Fonte: Hibbeler, 7ª ed. 2010, p. 58

Segundo Hibbeler (2010, p. 58) o comportamento elástico ocorre quando as deformações no corpo de prova estão dentro da primeira região mostrada na Figura. Podemos ver que a curva é na verdade uma linha reta em grande parte dessa região, de modo que a tensão é proporcional à deformação. Em outras palavras, o material é linearmente elástico.

De acordo com Hibbeler (2010, p. 59) um pequeno aumento na tensão acima do limite de elasticidade resultará no colapso do material e fará com que ele se deforme permanentemente. Esse comportamento é denominado escoamento e é indicado pela segunda região da curva. A tensão que causa escoamento é denominada

tensão de escoamento ou ponto de escoamento, σ_e , e a deformação que ocorre é denominada deformação plástica

Segundo Beer e Johnston (2012, p.70) o diagrama tensão-deformação varia muito de material para material, e, para um mesmo material, podem ocorrer resultados diferentes em vários ensaios, dependendo da temperatura do corpo de prova ou da velocidade de crescimento da carga. Entre os diagramas tensão-deformação de vários grupos de materiais é possível, no entanto, distinguir algumas características comuns; elas nos levam a dividir os materiais em duas importantes categorias, que são os materiais dúcteis e os materiais frágeis.

Os materiais dúcteis, que compreendem o aço estrutural e outros metais, se caracterizam por apresentarem escoamento a temperaturas normais. O corpo de prova é submetido a carregamento crescente, e seu comprimento aumenta, de início, lentamente, sempre proporcional ao carregamento. Desse modo, a parte inicial do diagrama tensão-deformação é uma linha reta com grande coeficiente angular. Entretanto, quando é atingido um valor crítico de tensão σ_e , o corpo de prova sofre uma longa deformação, com pouco aumento da carga aplicada. (BEER E JOHNSTON, 2012, p.70).

Os materiais frágeis, como ferro fundido, vidro e pedra, são caracterizados por uma ruptura que ocorre sem nenhuma mudança sensível no modo de deformação do material. (BEER E JOHNSTON, 2012, p.72).

6. ANÁLISE DE RESULTADOS

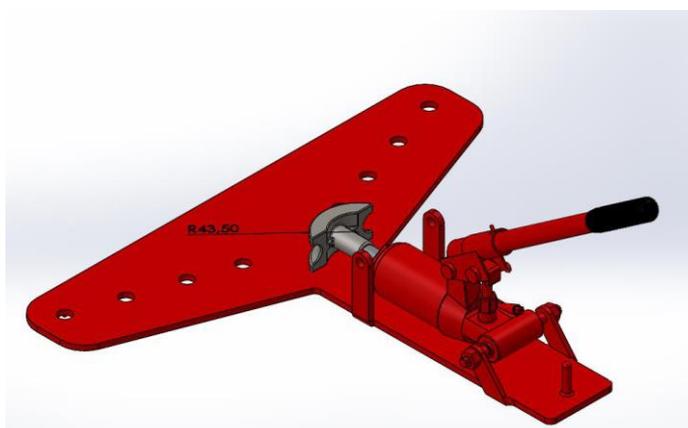


Figura 9 - Raio de dobra da matriz central
Fonte: Própria

Diâmetro Nominal	Schedule	$t(mm)$	$M_p (N.m)$
1/2"	5 - S	1,65	178,03
	10 - S	2,11	212,56
	40 - S	2,77	252,81
	80 - S	3,73	295,00
	160 - S	4,75	323,23
3/4"	5 - S	1,65	300,64
	10 - S	2,11	363,73
	40 - S	2,87	451,40
	80 - S	3,91	542,38

Fonte: Própria

Tabela 2 - Momento plástico de cada tubo

6.1 Tensões de cisalhamento nos prisioneiros das roldanas.

A partir de uma análise de decomposição de forças atuantes, foi possível identificar os pontos que sofre a ação de uma tensão de cisalhamento. Esses pontos sofrem a ação de uma força no sentido cortante do sólido, e essas forças produzem as tensões de cisalhamento nos dois prisioneiros das roldanas de apoio, como se pode observar no desenho esquemático abaixo.

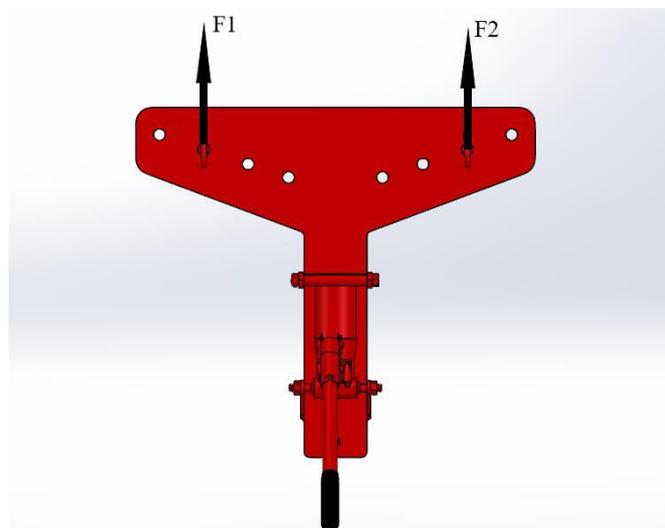


Figura 10 - Forças atuantes nos prisioneiros das roldanas

Fonte: Própria

Essas forças variam de acordo com a resistência à flexão do tubo, sendo assim, utilizou-se o momento plástico requerido para base de cálculos, visto que este valor

se caracteriza como o maior valor de esforço calculado, ou seja, o pior caso possível.

Segundo Beer e Johnston, um corpo sólido quando submetido os esforços cortantes, isto é, esforços que tendem a dividir o sólido no sentido perpendicular à seção transversal, é denominado Tensão de cisalhamento. Quando um esforço de intensidade **P** passa pela seção transversal de um sólido pode-se concluir que devem existir forças internas na seção transversal. 46

Essa resultante de intensidade **P**, é chamada de *força cortante* na seção. Ao dividir essa força constante P pela área da seção transversal A, obtemos a *tensão média de cisalhamento* na seção, como mostra figura 11.

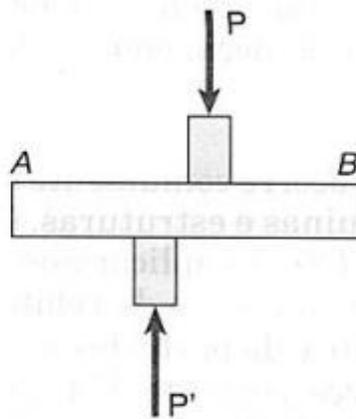


Figura 11 - Força cortante em um sólido

Fonte: BEER e JOHNSTON, 2012, p.11.

À vista disso, a tensão média de cisalhamento é dada equação abaixo:

(10)

$$\tau_{med} = \frac{P}{A}$$

Entretanto, diferentemente das tensões normais, a distribuição de tensões de cisalhamento na seção transversal *não pode* ser assumida como uniforme, o valor real da tensão de cisalhamento varia da superfície para o interior da peça, onde pode atingir valores superiores à da tensão média.

Sendo assim, pode-se assumir como base de decomposição de fórmula os conceitos enunciados por Hibbeler em seu livro de *Resistência dos materiais*, onde ele aborda os conceitos de *cisalhamento transversal*, onde o desenvolvimento de uma relação entre a distribuição da tensão de cisalhamento que age na seção transversal de um sólido e a força de cisalhamento resultante na seção é baseado no estudo da tensão de cisalhamento longitudinal e nos resultados da Equação $V=dMdx$. Que ao simplificar através de integrais, obtém-se a seguinte *fórmula do cisalhamento*:

(11)

$$\tau = VQIt$$

Sendo que, ' V ' representa força de cisalhamento resultante, ' I ' o momento de inércia da área da seção transversal inteira e ' t ' a largura da área da seção transversal do elemento, medida no ponto onde τ deve ser determinada, no caso de seção transversal circular é a medida do diâmetro.

Para obter a força cortante em cada prisioneiro, foi realizado o cálculo do torque atuante que pode ser obtido pela equação $T = F.d$, onde ' T ' é o torque que terá o mesmo valor de ' M_p ', ' F ' representa a força atuante e ' d ' o braço de alavanca, sendo assim, o pior caso é o com menor braço de alavanca, onde haverá a necessidade de uma força maior para atingir o mesmo torque que uma braço de alavanca maior alcançaria com uma menor força. Observa-se que o menor braço de alavanca do projeto é $b = 0,06m$, como mostra a figura 12.

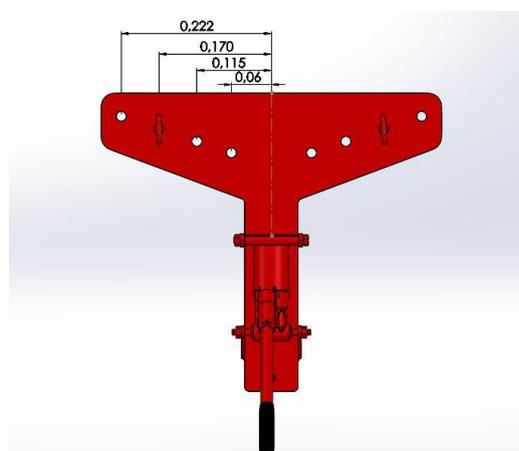


Figura 12 - Distâncias dos braços de alavanca

Fonte: Própria

À vista disso, chegou-se ao valor de força máxima atuante $F = 9.040\text{N}$, que por sua vez se divide igualmente para cada prisioneiro, devido ao fato de o sistema ser simétrico, então, cada prisioneiro recebe uma força $F' = 4.520\text{N}$.

6.2 Tensão de cisalhamento no parafuso central.

De maneira análoga ao cálculo de tensão de cisalhamento nos prisioneiros, o cálculo de tensão de cisalhamento no parafuso central da aba superior também é descrito pela fórmula da tensão máxima de cisalhamento dada por:

$$\tau_{\max} = 4V/3A$$

Entretanto, para o parafuso central, a força atuante não se divide como nos prisioneiros, sendo assim, a força cortante que atua no parafuso é $F = 9.040\text{N}$.

Dessa forma, o primeiro parafuso aplicado no projeto foi o parafuso de 3/8" feito de aço SAE 1020, com tensão de escoamento $\sigma_e = 300\text{ MPa}$, e aplicando a fórmula de tensão máxima de cisalhamento, obteve-se um valor de $\tau_{\max} = 169,15\text{ MPa}$. Sendo assim, através da fórmula do coeficiente de segurança, chegou-se ao valor de $CS = 1,77$ sendo considerado baixo, e através de instruções do orientador deste projeto, foi realizado um novo dimensionamento do parafuso.

O parafuso escolhido para o dimensionamento, foi o de 3/8" com o material 10.9, considerado um parafuso para aplicações que exigem melhor confiabilidade. Portanto, o valor do CS obtido no cálculo foi $CS = 5,32$ sendo um coeficiente de segurança satisfatório para a aplicação do projeto.

6.3 Adição de um reforço na estrutura do parafuso central.

Através de instruções do orientador deste projeto de trabalho de conclusão de curso, foi decidido fazer um reforço na estrutura que o parafuso central é fixado, devido ao seu grande esforço radial, sendo assim após a adição do reforço o projeto ficou como mostra a figura 15 abaixo.



Figura 13 - Projeto atualizado com reforços

Fonte: Própria

6.4 Análise do projeto através do Método de Elementos Finitos (MEF).

O objetivo do MEF se baseia na ideia de criação e construção de protótipos virtuais antes mesmo de serem fabricados, permitindo no ambiente computacional, simular o comportamento do projeto a ser fabricado, evitando assim gastos desnecessários, além de proporcionar uma análise numérica dos dados obtidos pela simulação.

Dessa forma, o MEF é um método de discretização de sistemas contínuos, onde utiliza as matrizes para organizar o cálculo a ser realizado. As reações de forças que agem na estrutura e os deslocamentos estão relacionados às matrizes de rigidez dela, sendo assim, o objetivo de todos os modelos de elementos finitos é determinar a rigidez da estrutura a ser analisada, fragmentando o seu estrutura em diversos elementos e assim obter valores numéricos de como a estrutura irá se comportar com a aplicação de forças, torques, ventos e fluidos.

Segundo Alvelino Alves (2015, p. 01) no dia a dia das atividades de engenharia, os engenheiros e projetistas são colocados diante de problemas técnicos, alguns mais simples e outros mais complexos, tendo de resolvê-los de forma satisfatória. Para isso utilizam de um verdadeiro arsenal de fórmulas, tabelas, que aprenderam nos cursos de engenharia.

Entretanto, com a ajuda dos computadores, atualmente o engenheiro deve-se concentrar em analisar os resultados obtidos nas simulações, visto que o

computador apenas apresenta números, sendo de responsabilidade do engenheiro a interpretação desses dados obtidos, sendo assim, faz-se necessário um estudo sobre tal assunto.

Sendo assim, o software monta e faz os cálculos, entretanto, para que se obtenham os valores há a necessidade de aplicarem-se as condições de contorno, na qual é definida pelo usuário e por fim, é realizado os cálculos. Haja vista que cabe ao usuário a interpretação dos dados obtidos de tensões, deslocamentos e deformações.

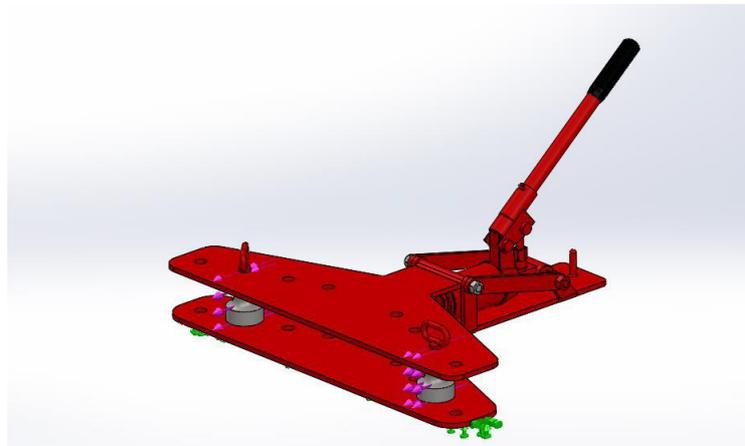


Figura 14 - Forças atuantes nos prisioneiros

Fonte: Própria

Nota-se que a parte inferior do projeto foi interpretada como a base de apoio do equipamento. Sendo assim, foi adicionado em seguida as condições de contorno, onde é adicionado as restrições de movimentos e os contatos entre os componentes, como pode-se observar nas figuras a seguir.



Figura 15 - Contato entre prisioneiro 1 e aba superior

Fonte: Própria

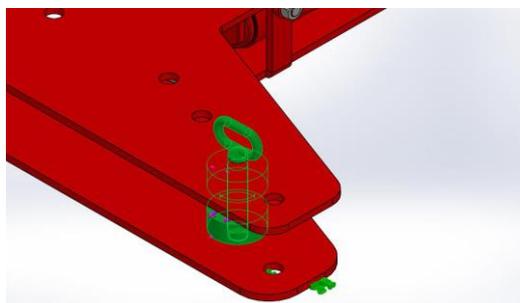


Figura 16 - Contato entre Prisioneiro 1 e roldana 1

Fonte: Própria

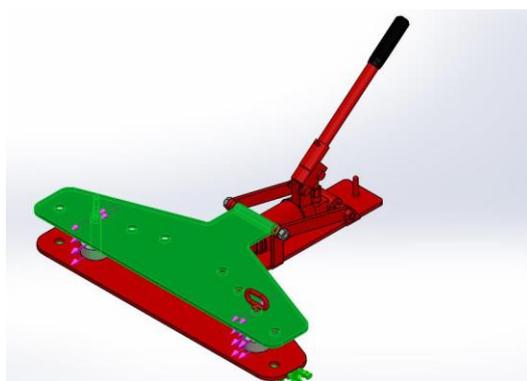


Figura 17 - Contato entre Prisioneiro 2 e aba superior

Fonte: Própria

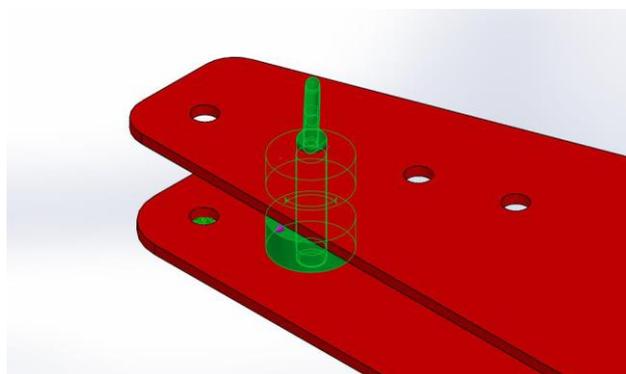


Figura 18 - Contato entre prisioneiro 2 e roldana 2

Fonte: Própria

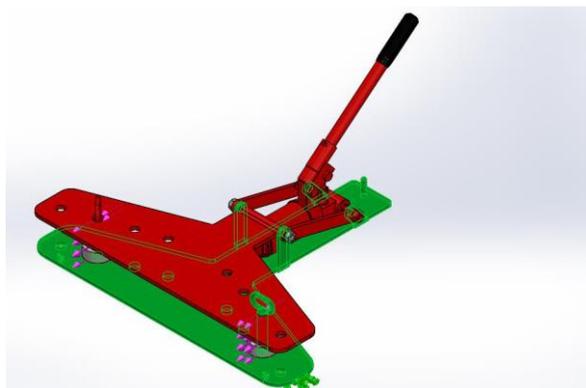


Figura 19 - Contato entre prisioneiro 1 e aba inferior

Fonte: Própria

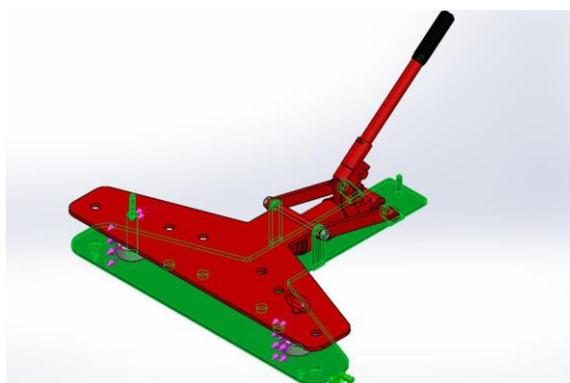


Figura 20 - Contato entre prisioneiro 2 e aba inferior

Fonte: Própria

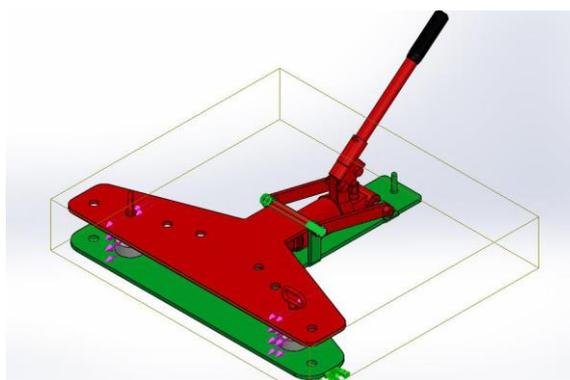


Figura 21 - Contato entre parafuso central e aba inferior

Fonte: Própria

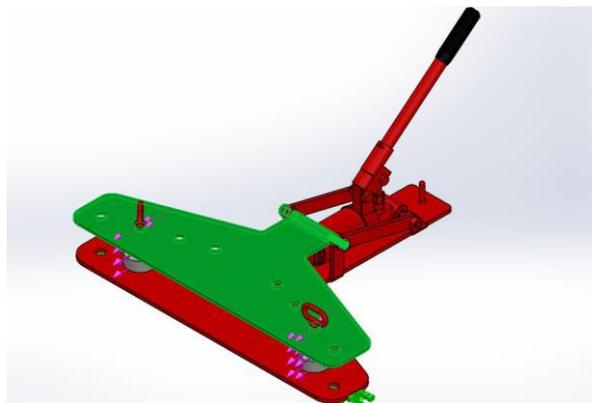


Figura 22 - Contato entre parafuso central e aba superior

Fonte: Própria

Por fim, pode-se realizar o estudo, sendo que quanto mais elementos tiver no estudo, mais demorado e complexo são os cálculos, dito isso, para simplificar o processamento, é preferível retirar dos cálculos os componentes que não vão interferir nos resultados. Este método é aconselhável para montagens com várias peças, pois assim os cálculos serão reduzidos, dando mais segurança de que o estudo não irá falhar, visto que apesar do software ser extremamente preciso, ele também tem limitações.

As figuras a seguir mostram os resultados de tensões internas (Von Mises), os deslocamentos e deformações indicados pelo diagrama de cores para uma melhor verificação, lembrando que o software sempre irá calcular os piores casos possíveis, ou seja, os extremos de reações.

Figura 23 - EPIs necessários na operação do curvador de tubos.



Fonte: Google.com

6.5 NR12 Segurança no Trabalho em Máquinas e Equipamentos.

A NR 12 Define as obrigatoriedades sobre os locais de instalações, Máquinas e equipamentos que serão utilizados por trabalhadores. Além disso, também é nesta NR que são definidas regras de manutenção de máquinas etc. Os princípios de falha de segurança, principalmente quando em fase de utilização. Entende-se como fase de utilização a construção, transporte, montagem, instalação, ajuste, operação, limpeza, manutenção, inspeção, desativação e desmonte da máquina ou equipamento.

6.6 Ergonomia do Operador

Visando melhorar a postura do operador em casos que há a possibilidade de utilizar uma base "tripé" na operação, foi realizado o projeto e execução de uma base para melhor ergonomia como mostra a figura 24 abaixo.



Figura 24 - Base "tripé".

Fonte: Própria

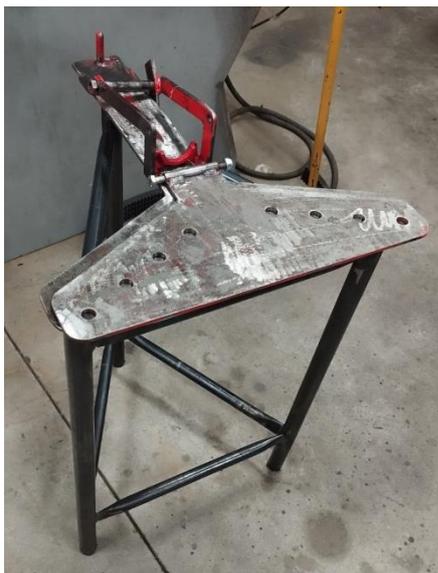


Figura 25 – Chapa em fase de acabamento.

Fonte: Própria



Figura 26 – Chapa em fase de pintura.

Fonte: Própria



Figura 27 – Projeto concluído.

Fonte: Própria

CONCLUSÃO

Fica evidente, portanto, que o objetivo do projeto e dimensionamento de um curvador hidráulico para tubos metálicos foi alcançado com sucesso, obtendo valores de cálculos, estudos analíticos e numéricos satisfatórios, sendo assim, pode-se dizer que o projeto estudado nesta monografia é perfeitamente possível de ser aplicado no campo da engenharia mecânica.

À vista disso, é possível concluir que foi realizado o projeto de um sistema de transmissão de forças hidráulicas com a capacidade de realizar uma curva em um tubo metálico de fácil manuseio que seja eficiente e prático. Além do mais, o projeto desenvolvido se mostrou ser um projeto de baixo custo atendendo assim os parâmetros estudados para se realizar a pesquisa. Dessa forma, foi constatado através dos cálculos de Payback que em pouquíssimo tempo o projeto consegue se pagar devido à alta economia que gera na manutenção mecânica em campo, se mostrando um projeto de alta aplicabilidade.

Trabalhar neste projeto nos fez evoluir muito como futuros engenheiros, e acreditamos que essa evolução seja a principal forma de demonstração que cruzamos a linha que separa um estudante de engenharia de um engenheiro. Através desse projeto conseguimos melhorar e muito nosso conhecimento e não somente isso, mas também aplicar todo o embase teórico que a esta instituição e o orientador Paulo Longhi nos passaram durante os anos de formação. A missão foi completa tanto no projeto físico quanto no estudo teórico, provando e demonstrando que o estudo aqui desenvolvido atende o mercado, é viável e rentável. Portanto, uma projeção futura desse projeto é continuar trabalhando no protótipo e torná-lo cada vez melhor e mais rentável para as empresas e os operadores.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALVES, Alvelino Filho. **Elementos Finitos – A Base da Tecnologia CAE**. – 6ª ed. – São Paulo: Érica. 2013. ARCELORMITTAL, **Catálogo Tubos Industriais Mecânicos**. 2022. Disponível em: <https://brasil.arcelormittal.com/produtos-solucoes/industria/tubos-industriais-mecanicos>. Acesso em: 30 de outubro de 2022.
- BAPTISTA, Márcio. **Fundamentos da engenharia hidráulica**. — 3º. ed. rev. e ampl. — Belo Horizonte: Editora UFMG, 2010.
- BASSO, Igor Fernando. **Projeto de uma Dobradeira de Tubos**. TCC. 151 p. – Universidade Federal do Pampa – UNIPAMPA. Alegrete, RS. 2014. Disponível em: <https://dspace.unipampa.edu.br/bitstream/rii/921/1/Projeto%20de%20uma%20dobradeira%20de%20tubos.pdf>. Acesso em: 13 de outubro de 2022.
- BEER, F.; JOHNSTON, R. **Resistência dos materiais**. – 3ª ed. – São Paulo: Pearson, 2012.
- BEER, JOHNSTON, CORNWELL. **Mecânica Vetorial para Engenharia**. – 9ª ed. Porto Alegre, RS: AMGH Editora, 2012.
- BOTTO, Caio; NEVES, Filipe; CAMARGO, Rafael. **Projeto de uma prensa hidráulica: dimensionamento e seleção dos componentes**. Lyceumonline, 2016. Disponível em: <https://lyceumonline.usf.edu.br/salavirtual/documentos/2957.pdf>. Acesso em: Acesso em: 19 de mai. de 2022.
- BRESCIANI Filho, Ettore (coord.); ZAVAGLIA, Cecília Amélia Carvalho; BUTTON, Sérgio Tonini; GOMES, Edson; NERY Fernando Antonio da Costa. **Conformação Plástica dos Metais**. Campinas: Editora da Unicamp, 1997 (5a. edição), 383p.
- Brunetti, Franco. **Mecânica dos fluidos**— 2. ed. rev. — São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2008.
- CALLISTER, William D. **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução**. – 5ª ed. Rio de Janeiro: LTC, 2002.
- CALLISTER, William D. **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução**. – 9ª ed. Rio de Janeiro: LTC, 20016.
- CANEDO, Eduardo Luis. **Fenômenos de Transporte**. – Rio de Janeiro: Grupo Editorial Nacional. 2010. 77

CISER, **Catálogo de Produtos**. 2022. Disponível em: <https://www.ciser.com.br/userfiles/downloads/catalogo-de-produtos-ciser.pdf>. Acesso em: 22 de outubro de 2022.

CONCEITOS BASICOS SISTEMAS HIDRAULICOS INDUSTRIAIS. Fatecc. Disponível em: <http://www.fatecc.com.br/eadmoodle/hidraulicaindustrial/apostilas/conceitosbasicoshidraulica.pdf>. Acesso em: 20 de mai. de 2022.

CONFORMAÇÃO MACIÇA (VOLUMETRICA). USP. Disponível em: <http://sites.poli.usp.br/pmr/lefa/download/PMR2202-Conforma%C3%A7%C3%A3o.pdf>. Acesso em: 13 de mai. de 2022.

Artigo online DIAS, Ricardo Cagnoni. **Projeto e Fabricação de Um Equipamento de Conformar Tubos para a Equipe Poli De Baja**. TCC, 10 p. – USP, 2008. Disponível em: http://sites.poli.usp.br/d/pme2600/2008/Artigos/Art_TCC_051_2008.pdf. Acesso em: 28 de setembro de 2022.

FOX; McDONALD; PRITCHARD. **Introdução à Mecânica dos Fluidos**. – 8. ed. – Rio de Janeiro: Grupo Editorial Nacional. 2014.

HIBBELER, Russell. **Resistencia dos materiais**. – 7. ed. - São Paulo: Pearson presentice hall, 2010.

LARA, Márcia, BAPTISTA, Márcio. **Fundamentos de Engenharia Hidráulica**. – 3ª ed. Belo Horizonte, MG: Editora UFMG, 2014.

LAWRENCE, H. Van Vlack. **Princípios de Ciência dos Materiais**. – 13ª ed. São Paulo: Edgard Blucher Ltda, 2000.

MORATO, Alan; et al. **Calandra: Curvadora de tubos. Orientador: Fernando Souza**. 2014. 44 p. TCC (Graduação) – Técnico em mecânica, instituto federal de educação, ciência e tecnologia de São Paulo, São José dos Campos. 2014. Disponível em: <https://doczz.com.br/doc/15526/calandra-curvadora-de-tubos>. Acesso em: 15 de mai. de 2022.

MOREIRA, Ilo da Silva. **Sistemas hidráulicos industriais/ Serviço nacional de aprendizagem**— 2.º. ed. rev. — São Paulo: SENAI-SP, 2012.

MORO, Norberto; AURAS, André. **Conformação mecânica I- Generalidades, laminação e forjamento**. Norbertocefetsc, 2017. Disponível em:

da_Bahia_Centro_Multidisciplinar_de. Acesso em: 27 de agosto de 2022.

SIMÕES, Roberto Mac Intyer. **Sistemas Hidráulicos e Pneumáticos**. Londrina – PR: Editora e Distribuidora Educacional. 2016.

TRANSMISSAO HIDRAULICA DE FORÇA E ENERGIA. Parker, 2022. Disponível em: https://www.parker.com/literature/Brazil/M2001_2_P_05.pdf. Acesso em: 17 de mai. de 2022.