

RICARDO CAGNONI DIAS

**PROJETO E FABRICAÇÃO DE UM EQUIPAMENTO DE
CONFORMAR TUBOS PARA A EQUIPE POLI DE BAJA**

**São Paulo
2008**

RICARDO CAGNONI DIAS

**PROJETO E FABRICAÇÃO DE UM EQUIPAMENTO DE
CONFORMAR TUBOS PARA A EQUIPE POLI DE BAJA**

**Trabalho de formatura apresentado à
Escola Politécnica da Universidade de
São Paulo**

Orientador: Prof. Dr. Roberto Ramos Jr.

**São Paulo
2008**

Ricardo Cagnoni Dias

Projeto e fabricação de um equipamento de conformar tubos
para a equipe poli de Baja / R.C. Dias. -- São Paulo, 2008.
p.

Trabalho de Formatura - Escola Politécnica da Universidade
de São Paulo. Departamento de Engenharia Mecânica.

1. Conformação mecânica 2. Projeto mecânico 3. Tubos
I. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento
de Engenharia Mecânica II.t.

RESUMO

A equipe Poli de Baja está enfrentando grande dificuldade na fabricação da estrutura do veículo, pois a equipe não possui um equipamento, adequado às suas necessidades, para curvar os tubos, tornando necessário muitas vezes o apelo a patrocinadores e a utilização de equipamentos adaptados, prejudicando a qualidade técnica do veículo. Com um equipamento adequado, a equipe reduziria o tempo de fabricação e aumentaria a confiabilidade estrutural do Baja, já que soldas mal executadas são pontos críticos no desempenho do veículo e o uso de tubos curvos reduziria o número de uniões soldadas.

Motivado pela necessidade apresentada pela equipe de Baja, o objetivo deste trabalho é o projeto e a fabricação de um equipamento para dobrar tubos, voltado para as necessidades da equipe.

As necessidades técnicas da equipe foram inicialmente levantadas; com isso a solução mais adequada foi selecionada, e o projeto básico foi concebido de modo que o equipamento atendesse à estas necessidades. Em seguida os desenhos de detalhe foram elaborados para possibilitar a fabricação.

A fabricação do equipamento foi realizada utilizando os desenhos do projeto detalhado, e após concluída, testes de funcionamento foram realizados. Estes testes serviram para levantar os problemas existentes e possibilitar sua correção, de tal modo que o equipamento entregue para a equipe Poli de Baja possa desempenhar sua função de forma satisfatória.

SUMÁRIO

1. Introdução.....	8
1.1 Considerações Iniciais.....	8
1.2 Necessidades	9
1.3 Objetivo.....	11
2. Requisitos de Projeto	11
2.1 Requisitos Dimensionais.....	11
2.2 Requisitos Funcionais.....	14
3. Estudo de Viabilidade	14
3.1 Cálculos Iniciais.....	14
3.2 Possíveis Soluções.....	18
3.3 Escolha da Melhor Solução	22
4. Projeto.....	25
4.1 Projeto Básico.....	25
4.2 Cálculos	30
4.3 Projeto Detalhado	33
4.4 Cronograma de Fabricação	33
5. Teste de Funcionamento	35
6. Dicas para Dobra com Qualidade	40
7. Conclusão.....	41
8. Referências Bibliográficas	42
Anexo 1 – Projeto Detalhado.....	43
Anexo 2 – Modificações do Projeto	44

Índice de Figuras

Figura 1 - Baja Poli-Arsenal.....	9
Figura 2 - Estrutura corta fogo.....	10
Figura 3 - Tubos curvos da estrutura	12
Figura 4 - Bandeja da suspensão.....	12
Figura 5 - Ficha de dados do tubo.....	15
Figura 6 - Posição do centróide.....	17
Figura 7 - Conformação por tração	20
Figura 8 - Conformação por compressão.....	21
Figura 9 - Conformação com 3 rolos	21
Figura 10 - Equipamento de dobrar tubos - Conjunto	25
Figura 11 - Base.....	26
Figura 12 - Guia axial	27
Figura 13 - Guia de fixação	27
Figura 14 - Guia de compressão	28
Figura 15 - Alavanca	28
Figura 16 - Posicionador angular	29
Figura 17 - Polia matriz	29
Figura 18 - Polia de compressão.....	30
Figura 19 – Componente Mais Solicitado.....	30
Figura 20 - Secção Solicitada.....	31
Figura 21 - Diagrama de Forças.....	31
Figura 22 - Posicionamento do tubo.....	35
Figura 23 - Dobra do tubo da estrutura	36
Figura 24 - Modificação no equipamento	37
Figura 25 - Dobra do tubo da estrutura após a modificação do equipamento	37
Figura 26 - Dobra do tubo da suspensão	38
Figura 27 - Dobra do tubo da suspensão após modificação no equipamento.....	39
Figura 28 - Dobra do tubo da suspensão preenchido com areia.....	39

Índice de Tabelas

Tabela 1 - Requisitos dimensionais.....	13
Tabela 2 - Soluções de acionamento	19
Tabela 3 - Soluções de mecanismos de conformação.....	22
Tabela 4 - Matriz de decisão de acionamento.....	23
Tabela 5 - Matriz de decisão de mecanismo de conformação	25

1. Introdução

1.1 Considerações Iniciais

Os alunos da Escola Politécnica da USP têm a oportunidade de realizar várias atividades extra curriculares oferecidas na própria escola, nas quais o aluno pode aplicar muitos dos conceitos vistos em aula, e assim complementar a sua formação.

Algumas dessas atividades oferecem um desafio a mais aos alunos, como na equipe Poli de Baja, no Aerodesign, na Poli Jr., pois nestas atividades os integrantes devem experimentar uma organização quase empresarial, incluindo o planejamento de trabalho, do orçamento, do cronograma, a elaboração de projetos e a fabricação de protótipos. Esta última atividade, em particular, muitas vezes faz com que os integrantes da equipe enfrentem grandes dificuldades.

Constantemente, por falta de infra-estrutura para a fabricação dos protótipos, os alunos são obrigados a optarem por projetos menos eficientes do ponto de vista técnico para que os protótipos sejam construtivamente viáveis. Esta limitação acaba por prejudicar, no caso das equipes Poli de Baja e o Aerodesign, o desempenho nas competições por elas disputadas, as quais estão a cada ano apresentando um nível técnico mais elevado, o que faz com que as equipes da Poli busquem constantemente a melhoria de seus projetos.

No caso específico da equipe Poli de Baja, os integrantes estão enfrentando grande dificuldade no momento da fabricação da estrutura, pois a equipe não encontra à sua disposição um equipamento, adequado às suas necessidades, para curvar os tubos, tornando necessário muitas vezes o apelo a patrocinadores e a utilização de equipamentos adaptados, prejudicando a qualidade técnica do veículo. Com um equipamento adequado seria possível reduzir o tempo de fabricação e aumentar a confiabilidade estrutural do Baja, já que soldas mal executadas são pontos críticos no desempenho do veículo e o uso de tubos curvos reduz o número de uniões soldadas.

Este é um dos exemplos de como a limitação construtiva pode afetar o avanço técnico buscado pelas equipes, e prejudicar seus desempenhos nas competições.

1.2 Necessidades

As competições de Baja estão a cada ano mais competitivas e o nível técnico dos projetos mais elevado; com isso a equipe Poli de Baja busca o desenvolvimento de soluções para se manter entre as melhores do país. Uma das características importantes para a boa desempenho do veículo é a confiabilidade estrutural.

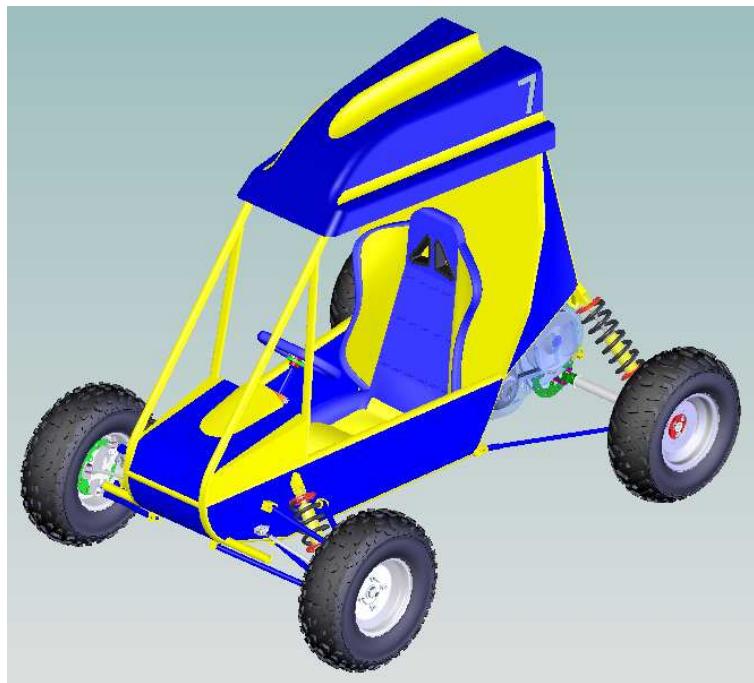


Figura 1 - Baja Poli-Arsenal

A melhoria da confiabilidade da estrutura passa pela redução do uso de uniões soldadas, uma vez que soldas mal executadas, e sem o adequado controle de trincas e penetrabilidade, são pontos críticos na estrutura do Baja. Como a estrutura do Baja é tubular, para se reduzir o número de uniões soldadas torna-se necessário o uso de tubos curvos e dai a necessidade da conformação dos mesmos, utilizando para isso um equipamento apropriado para esta função.

Além da melhoria estrutural, existe a necessidade de utilização de tubos curvos por razões construtivas impostas pelo regulamento das competições, no qual se determina que certos segmentos da estrutura devem ser concebidos em peça única, ou seja, sem nenhum tipo de emenda. Neste caso a não utilização de tubos com

curvas pode implicar no aumento da massa e consequente piora na competitividade do veículo.

Um exemplo importante de forma construtiva imposta pelo regulamento está no item 3.2.2.2. do Regulamento da Competição Baja SAE Brasil [6], no qual encontramos a seguinte definição:

*“The RRH is made up of a maximum of four sections, two LC at highest and lowest points, and two continuous, **no break vertical members**; this may be one continuous hoop/tube.”*

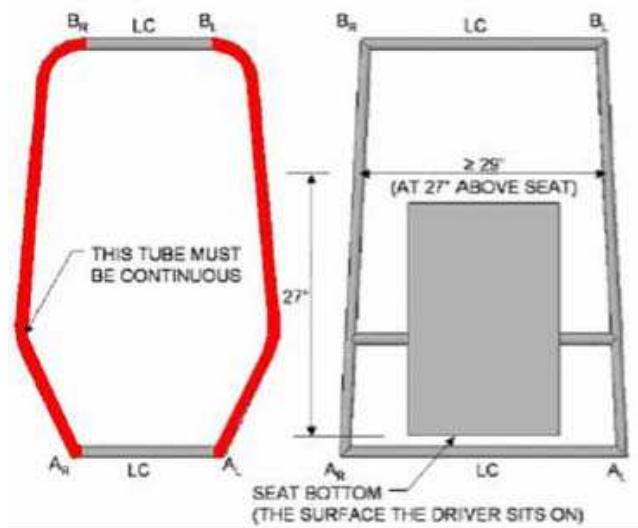


Figura 2 - Estrutura corta fogo

Pode-se notar pela figura 2 que a obrigatoriedade de se utilizar um único tubo contínuo na estrutura corta fogo torna o protótipo mais pesado e prejudica a otimização dos espaços caso a equipe não utilize um tubo curvo nesta posição.

Outro exemplo importante de utilização de tubos curvos são os braços da suspensão. Neste caso, por questão estrutural e de fabricação, o tubo contínuo curvo é de uso imprescindível.

O equipamento de dobrar tubos também irá propiciar uma maior agilidade na fabricação dos protótipos, e possibilitar o desenvolvimento de *designs* mais interessantes e arrojados em comparação a veículos com linhas retas apenas.

Pelas razões apresentadas, fica clara a necessidade fundamental para a equipe Poli de Baja de possuir um equipamento apropriado para curvar tubos, fornecendo à equipe maior flexibilidade, facilidade e qualidade na utilização de tubos curvos, e assim possibilitar o projeto de uma estrutura que colabore para o sucesso da equipe.

1.3 *Objetivo*

O objetivo deste trabalho é o projeto e fabricação de um equipamento de curvar tubos para auxiliar a equipe Poli de Baja na construção de seus protótipos.

Será realizado um trabalho detalhado para garantir que o equipamento satisfaça a todas as necessidades da equipe. O trabalho será iniciado com um levantamento das necessidades técnicas, onde serão levadas em consideração imposições feitas pelos regulamentos das competições de Baja, as condições pretendidas pelo projeto do Baja e as limitações financeiras para a concepção do equipamento de curvar tubo propriamente dito.

Algumas possíveis soluções serão apresentadas e, através de uma matriz de decisão, a melhor opção será selecionada. Um projeto de fabricação da solução selecionada será realizado e o protótipo fabricado.

Para comprovar a eficiência do equipamento serão realizados testes de funcionamento antes que o mesmo seja entregue à equipe Poli de Baja.

2. Requisitos de Projeto

2.1 *Requisitos Dimensionais*

O projeto do Baja possui particularidades construtivas quanto a parte tubular, a começar pelo próprio tubo utilizado na estrutura: com dimensões $\varnothing 30\text{mm} \times 1,6\text{mm}$, este material não é de padrão comercial, o que gera dificuldade para se encontrar uma matriz compatível para a conformação do tubo. Existem também exigências dimensionais com relação à curvatura máxima imposta pelo regulamento. Já os tubos dos braços da bandeja da suspensão possuem dimensões $\varnothing 3/4" \times 0,9\text{mm}$, de modo que a espessura reduzida pode levar a problemas na conformação.

Além das particularidades, parâmetros comuns em todos os projetos, como raios de curvatura, ângulos, necessidades de simetria, entre outros, irão delinear os requisitos para o equipamento a ser desenvolvido.

Um levantamento dos elementos tubulares curvos presentes no projeto do Baja 2008 (Poli-Arsenal) foi realizado, indicando a gama de ângulos e raios de curvaturas utilizados, como pode-se notar nas figuras 3 e 4.

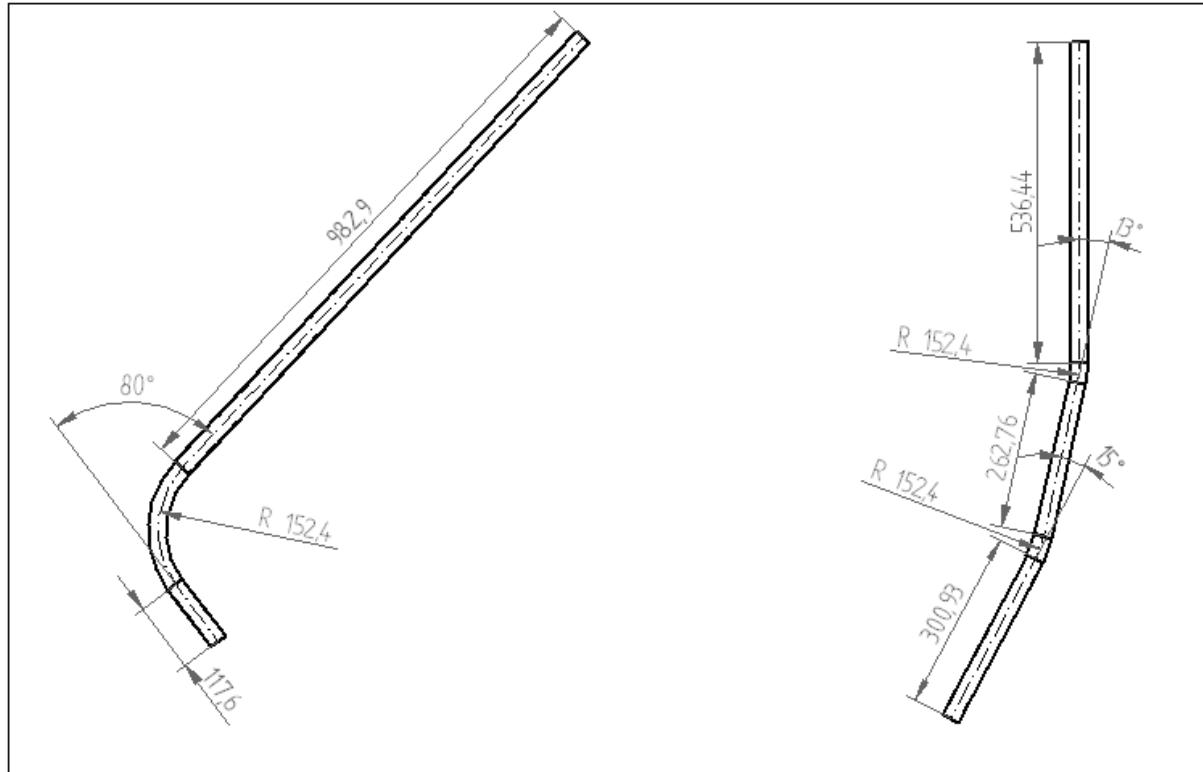


Figura 3 - Tubos curvos da estrutura

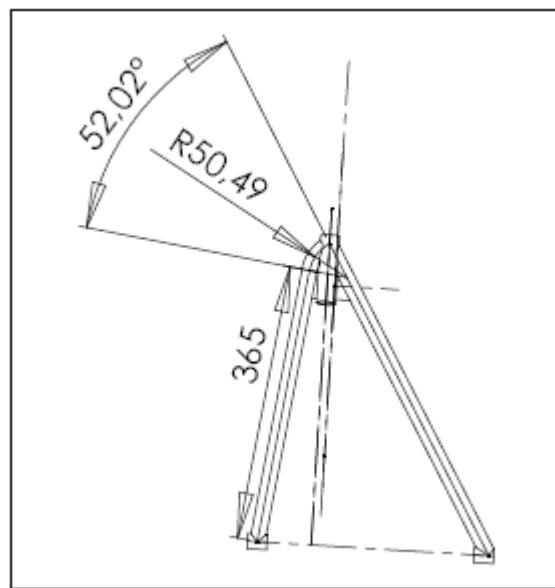


Figura 4 - Bandeja da suspensão

O equipamento a ser desenvolvido para dobrar os tubos deverá ter um custo baixo e ao mesmo tempo satisfazer as necessidades em questão. Para diminuir o custo de fabricação, o equipamento será projetado para um único raio de curvatura (para os tubos da estrutura) e para um único raio de curvatura (para os tubos dos braços da suspensão). No projeto analisado os raios de curvatura utilizados foram de 6" (152,40mm), valor limite imposto pelo regulamento. De acordo com a equipe do Baja não há impedimento algum em se padronizar todos os raios da estrutura, no entanto, seria prudente utilizar um raio um pouco abaixo do limite imposto pelo regulamento e ao mesmo tempo o maior possível, tendo em vista o aumento da precisão angular e a redução do enrugamento na dobra, efeito indesejado que praticamente condena a utilização do tubo. Desta forma será adotado o valor de 140mm para o raio de curvatura, aproximadamente 5 ½" ,sendo este valor acordado juntamente com a equipe de Baja.

No caso dos tubos dos braços da suspensão o raio de curvatura utilizado será de 60mm, um pouco acima dos 50mm utilizados no último Baja, sendo que este valor também foi definido pela equipe do Baja.

O máximo ângulo de abraçamento, outro parâmetro importante para o desenvolvimento do equipamento, será de no mínimo 100°, satisfazendo o valor máximo encontrado no projeto do Baja 2008 de 80°, e possibilitando a fabricação de dobras com ângulos maiores caso necessário. Note que este será um ângulo mínimo de referência para o projeto, caso possível este valor poderá ser maior.

Com relação à precisão necessária aos tubos conformados, dois fatores são os mais significativos e deverão ser supridos pelo equipamento: o paralelismo em tubos com duas dobras e a repetibilidade com precisão. Estes fatores são fundamentais para garantir a montagem e a simetria do veículo, esta última uma característica importante para a estabilidade direcional do Baja.

2.1.1 Resumo dos requisitos dimensionais

Tabela 1 - Requisitos dimensionais

Tubo	Raio de curvatura	Ângulo máximo de abraçamento
ø30mm x 1,6mm	140mm	Mínimo 100°
ø3/4" x 0,9mm	60mm	Mínimo 100°

2.2 Requisitos Funcionais

Alguns requisitos operacionais deverão ser satisfeitos pelo equipamento, de modo a garantir o funcionamento adequado e a facilidade de manutenção. Estes requisitos são:

- Operação simples;
- Esforço necessário para conformação deve ser compatível com a capacidade física de um homem adulto, no caso de um equipamento manual;
- Deve ser operado por uma única pessoa;
- Possuir alimentação elétrica 110/220V, 60Hz , no caso de um equipamento elétrico;
- Os elementos sujeitos a desgaste e manutenção deverão ser fixados de modo a possibilitar eventual troca;
- Deve ser possível a troca da matriz caso seja necessário variar o raio de dobraria.

3. Estudo de Viabilidade

3.1 Cálculos Iniciais

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.

3.1.1 Dados do Tubo da Estrutura

O tubo utilizado na estrutura do Baja é feito sob encomenda e possui uma composição específica, aço St52.3. As informações sobre a resistência mecânica do mesmo é fornecida na especificação enviada pelo fabricante, dada na figura 5.

 <p>Metalmétrica de Tubos de Precisão</p> <p>Metalmétrica de Tubos de Precisão Ltda Av. Monteiro Lobato, 3097 - São Roque Guarulhos - SP - Brasil - CEP 07190-903</p>		 <p>Quality Management System Certificate Nº 31422</p> <p>ISO 9001 Certificate Number: 31422</p>	 <p>Environmental Management System Certificate Nº 33828</p> <p>ISO 14001 Certificate Number: 33828</p>	<p>Atestado de Inspeção e Ensaios (De acordo com EN 10204 / DIN 50049 3.1.B)</p> <p>Nº 55112/0216747 Folha: 01 de 01 Embarque: 433741 Nota Fiscal: 0216747</p>								
<p>Cliente: ESCOLA POLITECNICA DA USP Pedido Cliente: 55112 Número do Material do Cliente: AMOSTRA</p> <p>Inspeção: METALÚRGICA DE TUBOS DE PRECISÃO LTDA.</p>		<p>Pais: BRASIL Pedido Usina: 55112 Código Material: AMOSTRA</p> <p>Dimensões: 0 mm X 0,00 mm X 0 mm Comprimento: 0 mm Especificações: Produto: TUBOS DE AÇO COM COSTURA</p>										
<p>Especificações do Cliente:</p> <table border="1"> <tr> <th>Lote de Produção</th> <th>Peças</th> <th>Comprimento Total</th> <th>Peso Total</th> </tr> <tr> <td>4028980101</td> <td>22</td> <td>88 m</td> <td>90 KG</td> </tr> </table>		Lote de Produção	Peças	Comprimento Total	Peso Total	4028980101	22	88 m	90 KG			
Lote de Produção	Peças	Comprimento Total	Peso Total									
4028980101	22	88 m	90 KG									

O PRODUTO FOI APROVADO NOS SEGUINTE TESTES/INSPEÇÕES:
402898 - DIMENSIONAL # VISUAL

COMPOSIÇÃO QUÍMICA (%):														
Ordem de Produção	C	Mn	P	S	Si	Cr	Mo	Al	Cu	V	Nb	B	Ti	Ni
402898	0,180	1,360	0,023	0,003	0,260		0,130	0,032		0,004	0,029		0,005	

ENSAIOS MECÂNICOS													
Ordem de Prod.	LE (MPA) (0,2%)	RT (MPA)	AL (%)	Dureza	Exp. (%)	Peso Camada	Espes Camada	Tam.Grão (ASTM)	Descarb. Tot (mm)	Micro	Rug	Inclusão	
402898	0563	0588	33	084									

Observações Inspeção:

Observações Pedido:

Atestamos que este material foi produzido e inspecionado de acordo com todas as normas e especificações e todos os resultados estão anexados.

Departamento de Produção
Tel: (11) 2146-4041 Fax: (11) 6464-0015

Responsável Técnico
#VALOR#

Data
12/11/2006

Figura 5 - Ficha de dados do tubo

Os seguintes dados serão utilizados no cálculo:

$D=0,030\text{ m} = 30,0\text{ mm}$ – diâmetro externo do tubo

$E=0,0016\text{ m} = 1,6\text{ mm}$ – espessura da parede

$d=0,0268\text{ m} = 26,8\text{ mm}$ – diâmetro interno do tubo

$\sigma_y=563\text{ MPa}$ – limite de escoamento do aço St 52.3

3.1.2 Dados do Tubo da Bandeja da Suspensão

O tubo da bandeja da suspensão é um tubo estrutural comercial, podendo considerar as propriedades físicas de um aço A36.

Os seguintes dados serão utilizados no cálculo:

$D=0,019\text{ m} = 19,0\text{ mm}$ – diâmetro externo do tubo

$E=0,0009\text{ m} = 0,9\text{ mm}$ – espessura da parede

$d=0,0172\text{ m} = 17,2\text{ mm}$ – diâmetro interno do tubo

$\sigma_y=250\text{ MPa}$ – limite de escoamento do aço A36

3.1.3 Cálculo do Momento Plástico

A força de conformação será 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, o valor para o qual toda seção transversal do tubo sofre deformação plástica.

Considerando que o comportamento do material é eslástico-perfeitamente plástico, as tensões irão permanecer constantes e iguais a σ_y quando o momento aplicado atingir o **momento plástico**, sendo este o máximo momento fletor necessário para se conformar o tubo.

O momento plástico é dado por (ver, por exemplo, Timoshenko e Gere Vol. 2):

$$M_p = \frac{\sigma_y \cdot A(\bar{y}_1 + \bar{y}_2)}{2} \quad (1)$$

Dividindo a seção transversal do tubo em 2 áreas, \bar{y}_1 e \bar{y}_2 são as distâncias da linha neutra até os centróides das áreas, como ilustrado a seguir.

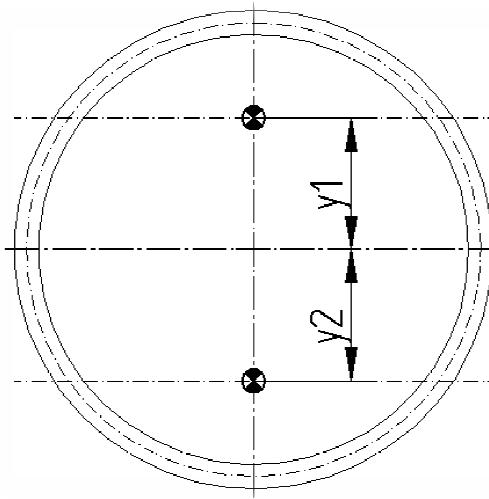


Figura 6 - Posição do centróide

Como a seção transversal do tubo é simétrica, \bar{y}_1 e \bar{y}_2 serão iguais.

$$\bar{y}_1 = \bar{y}_2 = \frac{\frac{D-E}{2} \cdot \sin \beta}{\beta} \quad (2)$$

Onde $\beta = \frac{\pi}{2}$ por se tratar de um semi-círculo.

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

Com as equações (1), (2) e (3) obtemos o valor do momento plástico para o tubo da estrutura e o tubo da bandeja da suspensão.

- Tubo da estrutura ($\varnothing 30mm$)

$$A = \frac{(0,030^2 - 0,0268^2)}{4} \cdot \pi = 1,427 \cdot 10^{-4} m^2$$

$$\bar{y}_1 = \bar{y}_2 = \frac{\frac{0,030 - 0,0016}{2} \cdot \sin \frac{\pi}{2}}{\frac{\pi}{2}} = 9,04 \cdot 10^{-3} m$$

$$M_p = \frac{563 \cdot 10^6 \cdot 1,427 \cdot 10^{-4} (9,04 \cdot 10^{-3} + 9,04 \cdot 10^{-3})}{2} = 726,2 N.m$$

- Tubo da bandeja da suspensão ($\varnothing 3/4''$)

$$A = \frac{(0,019^2 - 0,0172^2)}{4} \cdot \pi = 5,117 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2$$
$$\bar{y}_1 = \bar{y}_2 = \frac{\frac{0,019 - 0,0009}{2} \cdot \sin \frac{\pi}{2}}{\frac{\pi}{2}} = 5,76 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$
$$M_p = \frac{250 \cdot 10^6 \cdot 5,117 \cdot 10^{-5} (5,76 \cdot 10^{-3} + 5,76 \cdot 10^{-3})}{2} = 73,7 \text{ N} \cdot \text{m}$$

Para efeito de determinar se o acionamento manual é compatível com a força necessária para conformar o tubo, consideraremos o pior caso, $M_p=726,2 \text{ N.m}$, referente ao tubo da estrutura.

Considerando um braço de atuação da força de 1,5m, temos:

$$F_c = \frac{M_p}{b} = \frac{726,2}{1,5} = 484 \text{ N}$$

A força necessária para conformar o tubo será de 484N, valor compatível com a capacidade física de um homem adulto, o que torna viável a utilização de um acionamento manual no equipamento.

3.2 Possíveis Soluções

As possíveis soluções serão baseadas em opções sugeridas no Metals Handbook – Forming.

3.2.1 Mecanismo de acionamento

- Manual: acionamento manual através de alavanca

O acionamento manual tem como vantagens: a facilidade de manutenção, por apresentar construção simplificada com poucos componentes; a operação simples, não exigindo grande conhecimento do operador; e um custo de fabricação baixo. O ponto crítico é a força exercida pelo operador: o projeto deve garantir que a força

necessária seja compatível com a capacidade física média de uma pessoa adulta, garantindo a viabilidade de uso.

- Motor elétrico: acionamento por motor elétrico através de um sistema de redução

Um equipamento acionado por motor elétrico possui a grande vantagem de possibilitar maior precisão durante sua operação. Com uma chave fim de curso, por exemplo, é possível determinar o ponto exato de parada, o que a sensibilidade humana não permite em uma operação manual, além de não exigir praticamente nenhum esforço de seu operador. Por outro lado, o custo de fabricação e de manutenção do equipamento se eleva consideravelmente, pois o sistema é composto pelo motor, todo o sistema de engrenagens de redução e pelo sistema elétrico de controle. Naturalmente deve-se levar em conta a real necessidade e a freqüência de utilização do equipamento se optarmos por este tipo de acionamento.

- Hidráulico: acionamento por cilindro hidráulico

Este tipo de acionamento é usualmente utilizado em equipamentos que necessitam de grande força de acionamento, pois o cilindro hidráulico possui grande capacidade mecânica, mas isto tem um custo elevado, pois o sistema deve conter uma central hidráulica para fornecer a pressão de óleo necessária. A precisão deste tipo de acionamento é similar a do acionamento elétrico, pois é possível o controle eletrônico/elétrico do sistema.

Matriz de Soluções de Açãoamento

Tabela 2 - Soluções de açãoamento

Solução Açãoamento

1	Manual
2	Motor Elétrico
3	Hidráulico

3.2.2 Mecanismo de Conformação

- Dobra de tração

Neste sistema o tubo é fixado na matriz central, na qual é aplicado o torque. Assim, no processo de conformação, o tubo é tracionado de forma a abraçar a matriz. Ver figura 7.

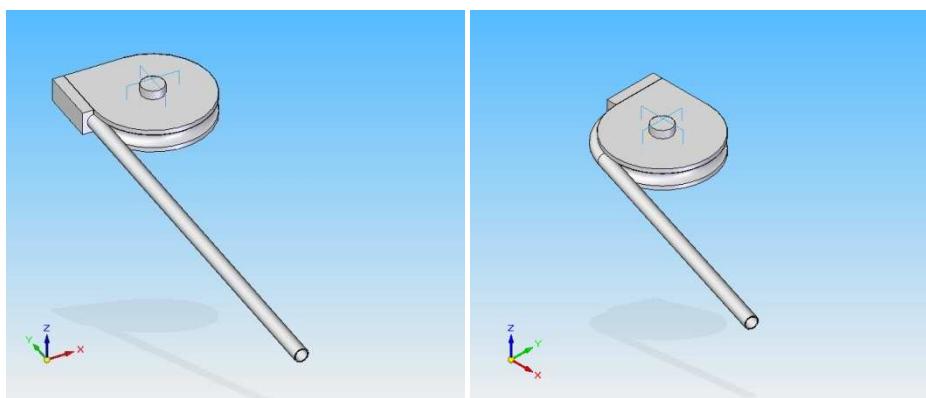


Figura 7 - Conformação por tração

Como este processo constitui em aplicar uma força de tração no tubo, isto faz com que a incidência de enrugamento decorrente da dobra seja menor, porém duas desvantagens devem ser consideradas: a primeira é a dificuldade de se realizar duas dobras muito próximas devido ao sistema de fixação do tubo, que exige um segmento reto antes e depois da dobra; o segundo problema é o custo de troca da matriz, pois como esta não pode ser simplesmente no formato de uma polia, o trabalho de usinagem se torna bastante complexo, elevando o custo.

- Dobra de compressão

Neste sistema o tubo é fixado na estrutura do equipamento, fazendo com que este fique tangencialmente em contato com a matriz de conformação. Uma segunda matriz é posicionada em contato com o tubo, e será esta segunda matriz que irá se mover conformando o tubo. Ver figura 8.

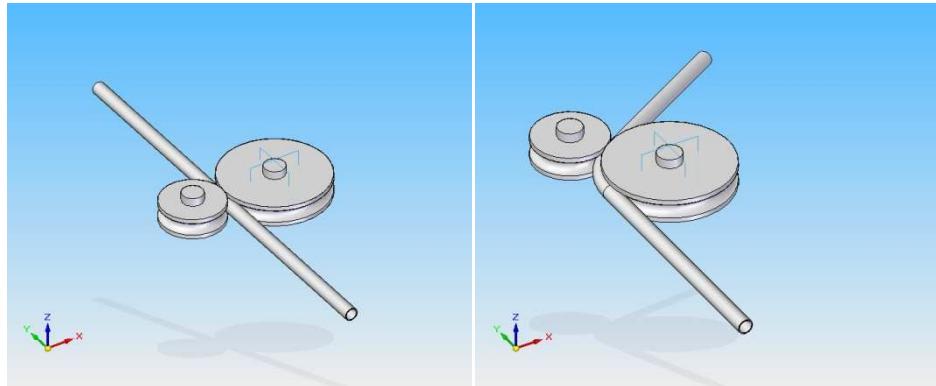


Figura 8 - Conformação por compressão

Como neste sistema as matrizes possuem o formato de polias, a facilidade de substituição e variação do raio de dobra se torna simples e economicamente viável. Porém, como não existe força de tração aplicada no tubo, a incidência de enrugamento na dobra pode aumentar.

- Dobra com 3 rolos

Neste sistema a conformação é realizada pelo movimento do tubo entre três rolos. Com a aproximação do rolo superior aos dois rolos inferiores, diminui-se o raio de dobra. Ver figura 9.

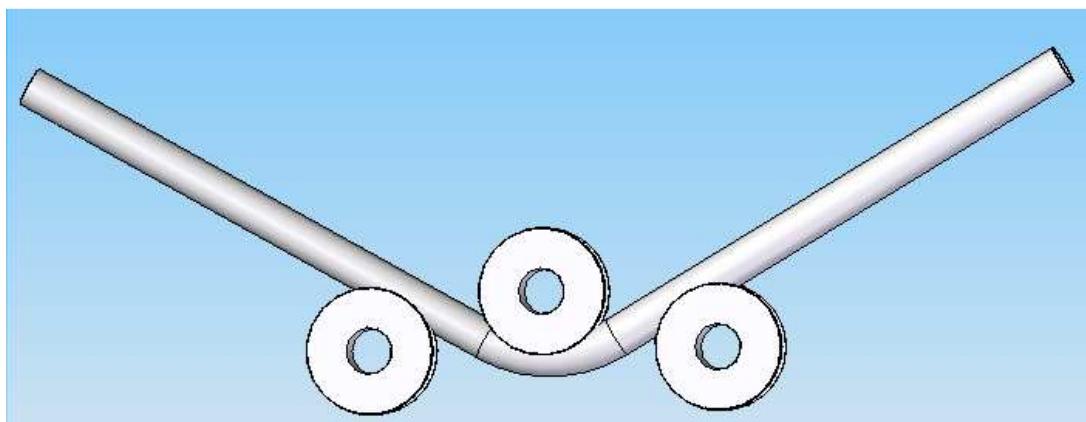


Figura 9 - Conformação com 3 rolos

Utilizando este sistema de conformação é possível variar o raio de dobra simplesmente controlando a posição do rolo superior, mas as desvantagens em relação a precisão são grandes pois, como não existe uma matriz de conformação, o raio de dobra deve ser obtido durante o processo, e isto depende muito do operador

da máquina. Além disto, o ângulo de abraçamento também se torna uma variável difícil de se obter com precisão.

Matriz de Soluções de Mecanismos de Conformação

Tabela 3 - Soluções de mecanismos de conformação

Solução Mecanismo

1	Dobra de tração
2	Dobra de compressão
3	Dobra com 3 rolos

3.3 Escolha da Melhor Solução

3.3.1 Melhor Solução de Acionamento

Serão considerados os seguintes fatores na escolha do acionamento:

- Custo
- Facilidade de operação
- Durabilidade
- Confiabilidade
- Manutenção preventiva necessária
- Adequação à freqüência de uso

Descrição dos fatores:

Custo: Será analisada a viabilidade econômica da solução e, como o limite de orçamento não é alto para o desenvolvimento do protótipo, a preferência será por soluções de menor custo.

Facilidade de operação: O grau de instrução e conhecimento necessário para que uma pessoa opere o equipamento será avaliado neste item, buscando uma solução que possua fácil operação.

Durabilidade: O equipamento deve satisfazer às condições de operação com mínimo desgaste dos componentes.

Confiabilidade: O sistema de acionamento deve apresentar um funcionamento confiável e garantir a precisão do processo.

Manutenção preventiva necessária: As operações de manutenção devem ser simples, exigindo baixo custo e feitas em períodos longos.

Adequação à freqüência de uso: O investimento realizado deverá ser compatível com a freqüência de utilização do equipamento.

Método de avaliação:

Será atribuída uma nota a cada fator para cada solução. As notas serão de 0 (solução não é satisfatória) a 5 (solução é totalmente satisfatória). O peso de cada fator será o mesmo, e a solução escolhida será a que tiver maior pontuação.

Tabela 4 - Matriz de decisão de acionamento

Fator	Solução 1		
	<i>Manual</i>	<i>Motor Elétrico</i>	<i>Hidráulico</i>
Custo	5	3	1
Facilidade de Operação	5	4	3
Durabilidade	5	4	4
Confiabilidade	4	5	5
Manutenção Preventiva Necessária	5	4	4
Adequação a freqüência de uso	5	3	1
Total	29	23	18

Será adotada a solução 1, acionamento manual do equipamento.

3.3.2 Melhor solução de Mecanismo de Conformação

Serão considerados os seguintes fatores na escolha do acionamento:

- Custo
- Facilidade de operação
- Durabilidade
- Qualidade da dobra
- Precisão da dobra

Descrição dos fatores:

Custo: Será analisado o custo de fabricação do sistema e o custo para se variar o raio de dobra, no caso de necessidade de troca da matriz ou não. Neste fator quanto menor o custo, melhor a solução.

Facilidade de operação: O grau de instrução e conhecimento necessário para que uma pessoa opere o equipamento será avaliado neste item, buscando uma solução que possua fácil operação.

Durabilidade: O equipamento deve satisfazer às condições de operação com mínimo desgaste dos componentes.

Qualidade e precisão da dobra: A qualidade visual da dobra, como enrugamento e ovalização, bem como a precisão de dobra possível em cada um dos sistemas deverá ser compatível com as necessidades levantadas.

Método de avaliação:

Será atribuída uma nota a cada fator para cada solução, as notas serão de 0 (solução não é satisfatória) a 5 (solução é totalmente satisfatória). O peso de cada fator será o mesmo, e a solução escolhida será a com maior pontuação.

Tabela 5 - Matriz de decisão de mecanismo de conformação

Fator	Solução 1	Solução 2	Solução 3
	Tração	Compressão	3 Rolos
Custo	3	5	4
Facilidade de Operação	5	5	2
Durabilidade	5	5	4
Qualidade da Dobra	5	4	2
Total	18	19	12

Será adotada a solução 2, dobra de compressão.

4. Projeto

4.1 Projeto Básico

No projeto básico do equipamento, as linhas gerais e posicionamento dos sistemas e componentes foram determinados buscando atender à todas as necessidades apresentadas. Todo o projeto foi realizado em 3D, utilizando o software Solid Edge.

Com a elaboração do projeto 3D fica mais fácil identificar possíveis incompatibilidades e entender o funcionamento do equipamento.

Os sub-conjuntos que compõem a máquina de dobrar tubos estão apresentados na figura 10:

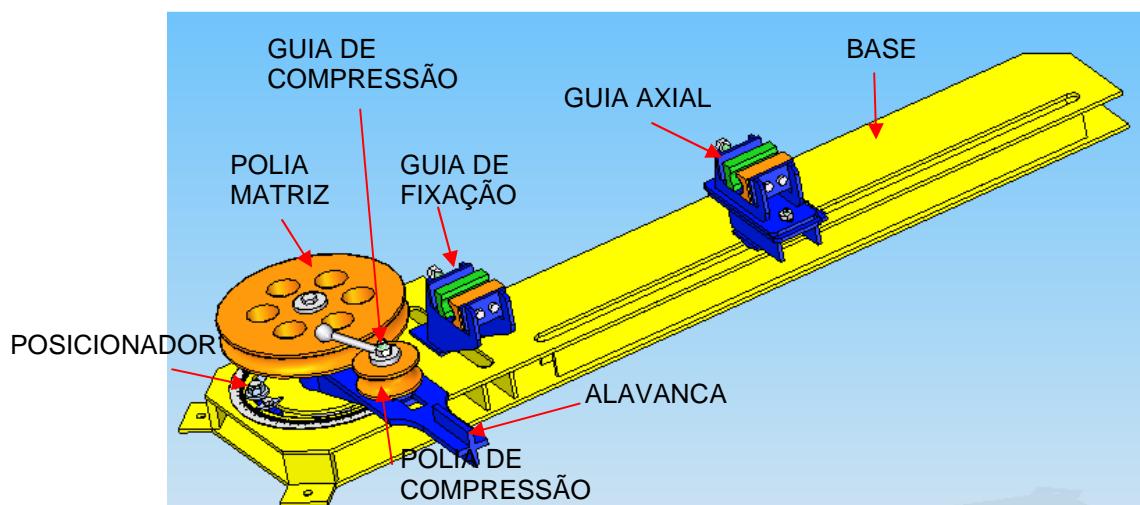


Figura 10 - Equipamento de dobrar tubos - Conjunto

O equipamento possui funcionamento simplificado, que atende às necessidades impostas.

O tubo a ser conformado é fixado por duas guias: uma axial que permite movimentá-lo axialmente, possibilitando a realização de duas dobras em um mesmo tubo sem que seja necessário soltá-lo (garantindo o paralelismo entre as dobras); e outra de fixação que será utilizada para que o tubo seja rigidamente travado próximo a matriz de conformação.

A guia de compressão é o componente que irá posicionar a matriz de compressão em contato com o tubo.

Após o posicionamento das guias, a conformação será realizada aplicando a força na alavanca. Um tubo será acoplado à alavanca para aumentar o braço de ação da força (este tubo não está representado na figura anterior).

A seguir segue uma breve descrição de cada componente.

- Base

A base é o componente estrutural do equipamento e foi projetada de forma a garantir rigidez ao sistema.

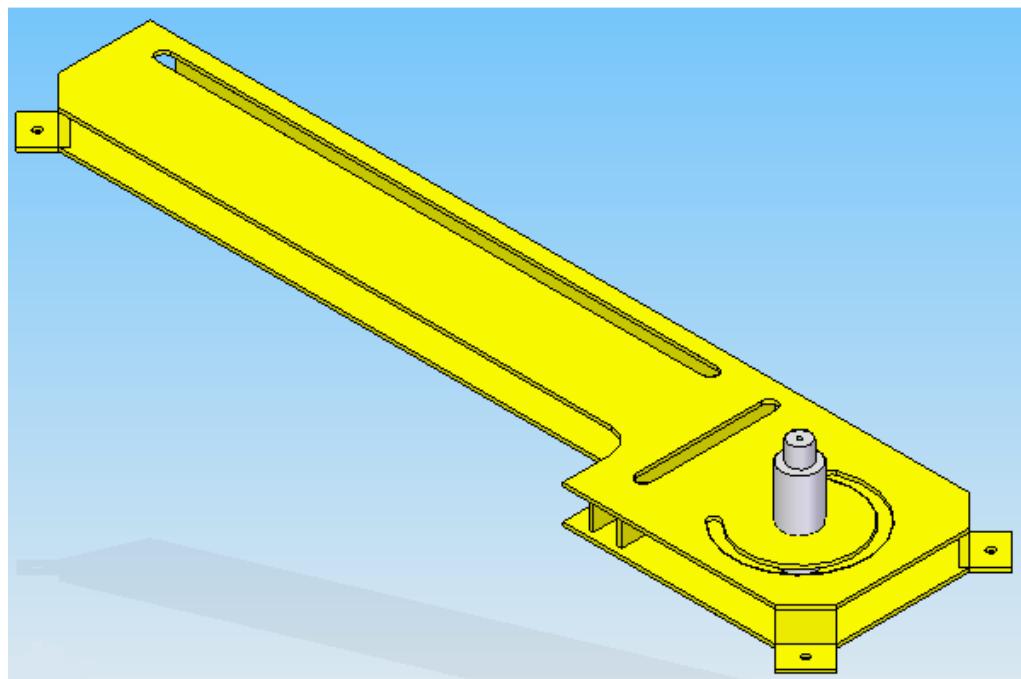


Figura 11 - Base

- Guia axial

Para garantir que se possa realizar duas dobras em um mesmo tubo, e que estas fiquem paralelas, a guia axial irá fixar o tubo e permitir apenas seu deslocamento axial, assim, após realizar a primeira dobra, solta-se as outras guias e posiciona-se o tubo para realizar a segunda dobra, sem solta-lo da guia axial. Esta guia possui regulagem no sentido perpendicular ao tubo para que seja possível variar o raio de dobra.

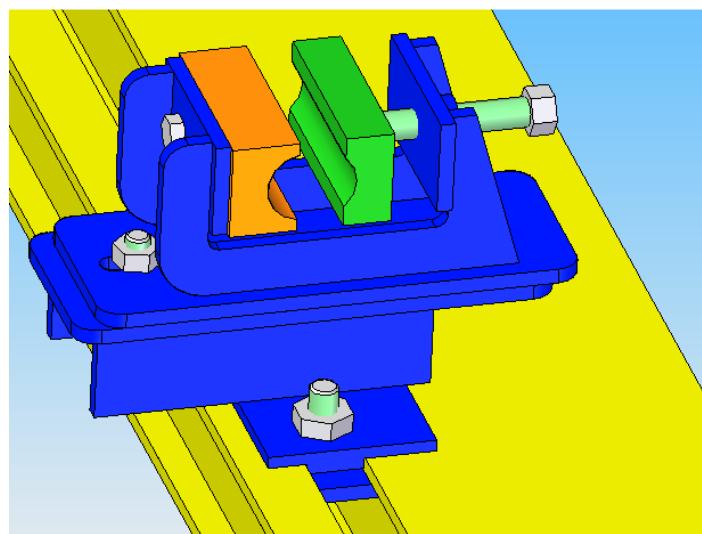


Figura 12 - Guia axial

- Guia de fixação

Esta guia irá garantir que o tubo fique rigidamente fixo próximo à polia matriz (isto é necessário para que a dobra seja realizada com qualidade). A guia de fixação possui regulagem no sentido perpendicular ao tubo para que seja possível variar o raio de dobra.

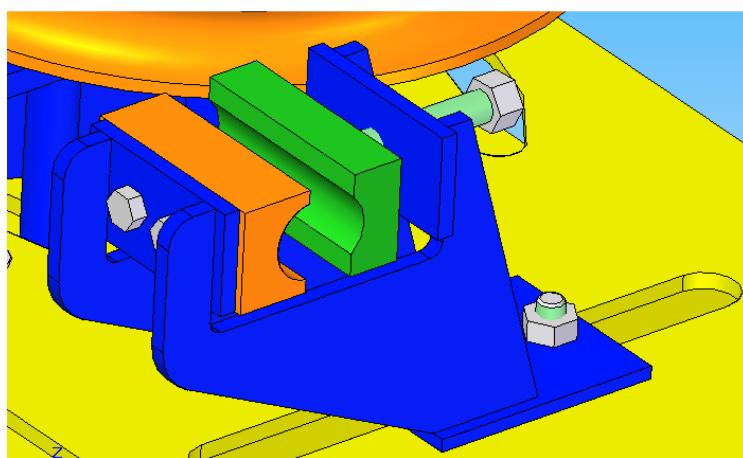


Figura 13 - Guia de fixação

- Guia de compressão

Este componente é responsável pelo posicionamento da matriz de compressão, travando-a em contato com o tubo antes da conformação. O deslocamento radial possui duas funções: travar o tubo contra a polia matriz e possibilitar a variação do raio de dobra.

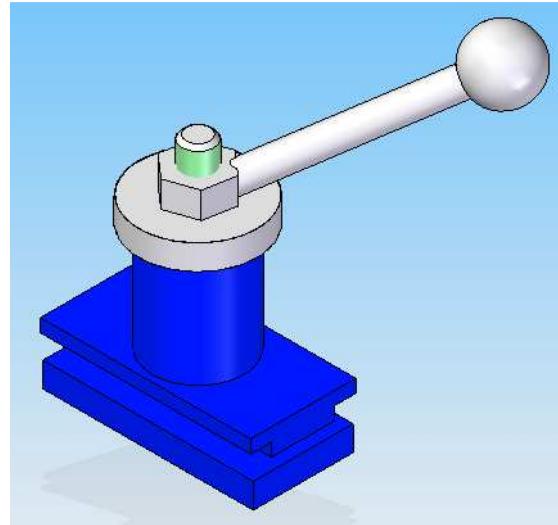


Figura 14 - Guia de compressão

- Alavanca

É o elemento responsável por transmitir a força de conformação. Um tubo será conectado à extremidade da alavanca para aumentar o braço de ação da força e, assim, facilitar a conformação.

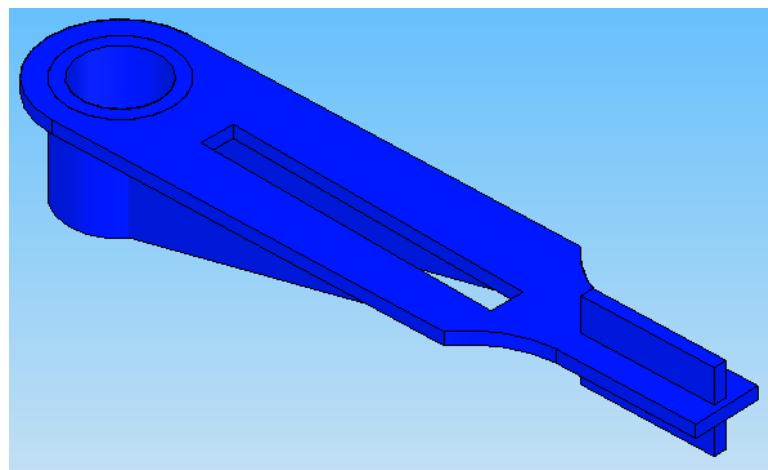


Figura 15 - Alavanca

- Posicionador angular

Para que não seja necessário o monitoramento do ângulo de abraçamento durante o processo de dobra, será utilizado o posicionador angular, que funcionará como um limitador de curso, garantindo que o ângulo de abraçamento não ultrapasse o valor desejado.

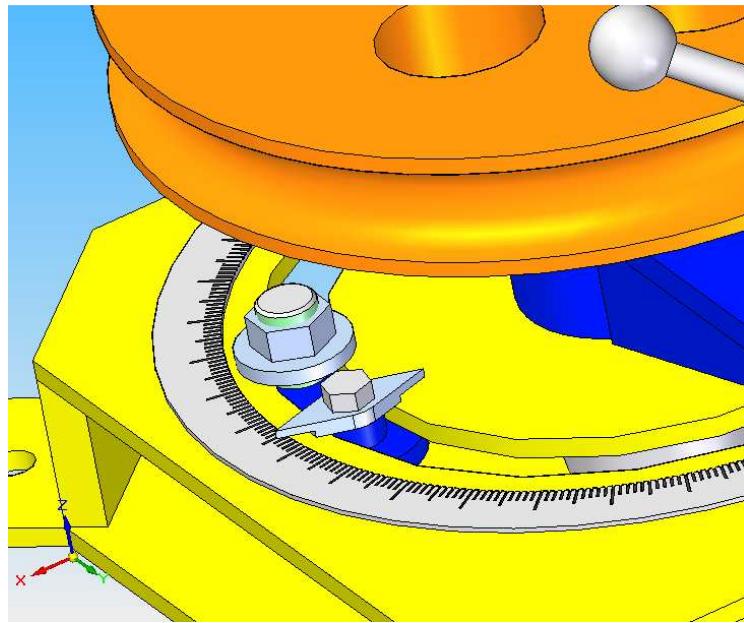


Figura 16 - Posicionador angular

- Polia Matriz

Esta polia determinará o raio de dobra, sendo conformado contra esta polia.

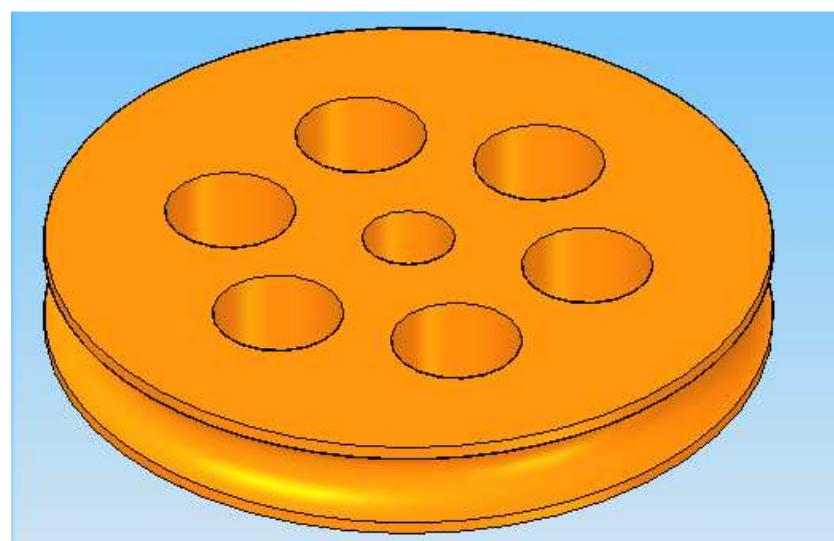


Figura 17 - Polia matriz

- Matriz de compressão

A matriz de compressão irá comprimir o tubo contra a polia matriz, conformando o mesmo.

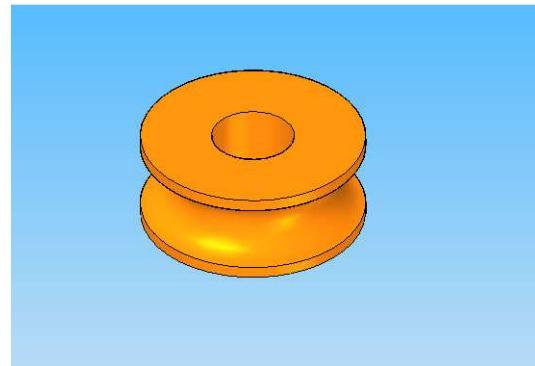


Figura 18 - Polia de compressão

4.2 Cálculos

Com a elaboração do projeto sem a necessidade de economia de material, todos os componentes foram super dimensionados. O resultado foi um equipamento que resistirá com folga a todos os esforços provenientes de sua operação.

Mesmo com a elaboração do projeto visando ao super dimensionamento, é prudente realizar a verificação do componente mais solicitado do equipamento: a guia de compressão.

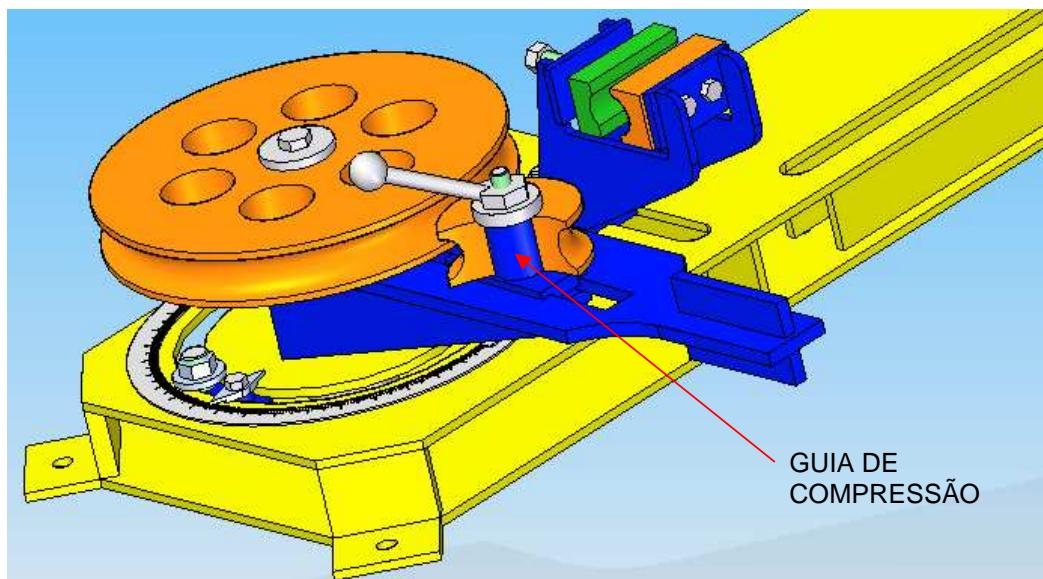


Figura 19 – Componente Mais Solicitado

Este componente é o responsável pela transmissão da força de compressão para conformar o tubo na matriz, assim, é o ponto crítico do projeto. O carregamento neste componente é tal que produz uma tensão de cisalhamento na secção circular mostrada a seguir.

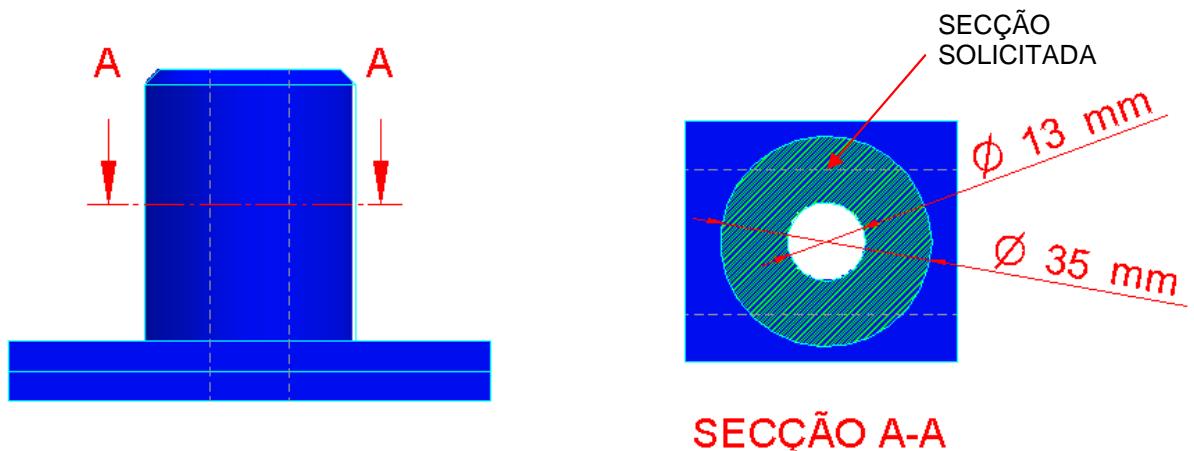


Figura 20 - Secção Solicitada

Sendo:

Diâmetro Interno $\phi i = 13\text{ mm}$

Diâmetro Externo $\phi e = 35\text{ mm}$

Para determinar a força aplicada na guia, usaremos o seguinte diagrama de forças:

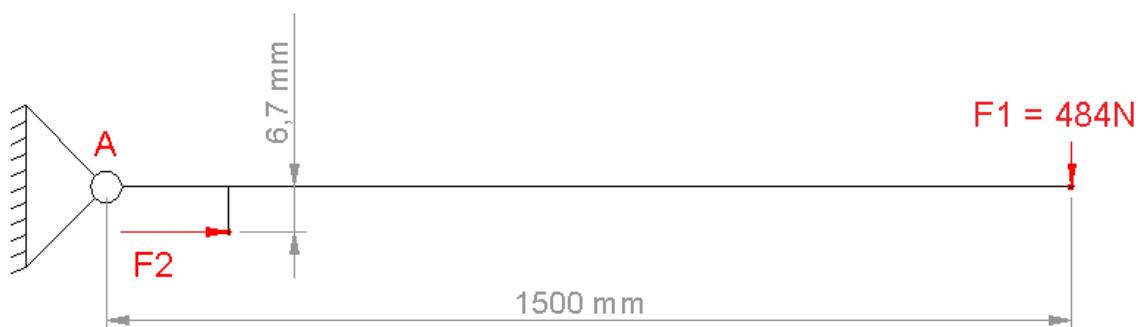


Figura 21 - Diagrama de Forças

Sendo que F_1 é a força aplicada pelo operador e F_2 é a força resultante na guia. A distância de 6,7 mm entre o ponto de aplicação de F_2 e a linha de centro da

alavanca é a excentricidade necessária para que o momento aplicado pelo operador na alavanca seja equivalente ao momento fletor aplicado ao tubo.

F_2 é então calculado:

Por equilíbrio de momentos temos que $M_A = 0$, assim:

$$F_1 \cdot 1500 - F_2 \cdot 6,7 = 0$$

$$F_2 = \frac{F_1 \cdot 1500}{6,7}$$

$$F_2 = \frac{484 \cdot 1500}{6,7}$$

$$F_2 = 108358,2 \text{ N}$$

A tensão de cisalhamento na secção solicitada será:

$$\tau = \frac{F_2}{\frac{\pi}{4} \cdot (\phi_e^2 - \phi_i^2)}$$

$$\tau = \frac{108358,2}{\frac{\pi}{4} \cdot (35^2 - 13^2)}$$

$$\tau = 130,6 \text{ N/mm}^2$$

O material utilizado para fabricação da guia é o aço SAE 1045, que possui as seguintes características para $\phi \leq 40 \text{ mm}$:

Limite de escoamento $\sigma_e = 430 \text{ N/mm}^2$

Limite ao cisalhamento $\tau_f = \frac{\sigma_e}{2} = 215 \text{ N/mm}^2$

Com isso temos um fator de segurança (k) de:

$$k = \frac{\tau_f}{\tau}$$

$$k = \frac{215}{130,6} = 1,65$$

Verificamos assim que o componente resistirá aos esforços.

4.3 Projeto Detalhado

O projeto detalhado é fundamental para que a fabricação do equipamento saia de acordo com o projeto básico. A passagem do projeto básico para o projeto detalhado ocorre com o detalhamento de cada peça separadamente juntamente com a análise do processo de fabricação das mesmas. É neste ponto que algumas alterações no projeto, como acessos para solda, por exemplo, devem ser implementadas para possibilitar a fabricação.

O projeto detalhado pode ser encontrado no Anexo 1 deste relatório.

4.4 Cronograma de Fabricação

A fabricação do equipamento foi dividida em 7 etapas, sendo:

Programa de Corte: Para realizar o corte das chapas por plasma CNC é necessária a elaboração de um programa que é enviado para o equipamento de corte.

Corte das Chapas: As chapas serão cortadas por plasma CNC o que irá garantir grande precisão no processo.

Usinagem: As usinagens cilíndricas serão realizadas em torno horizontal e as usinagens planas serão em furadeira fresadora.

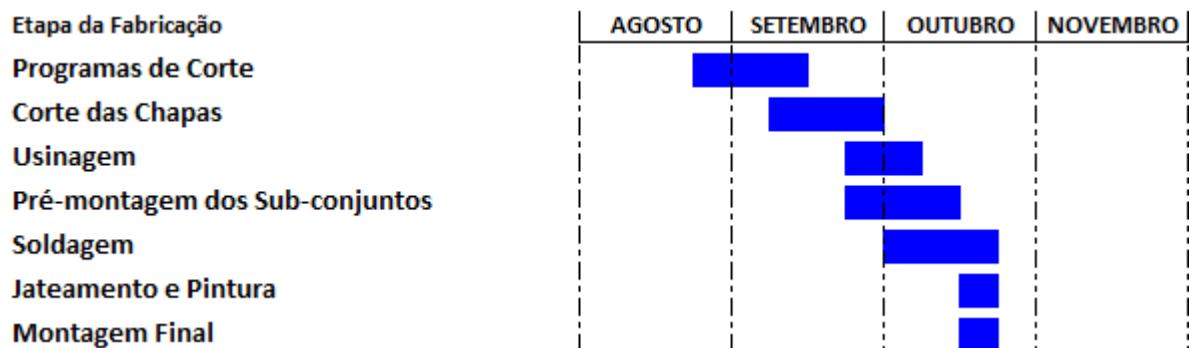
Pré-montagem dos Sub-conjuntos: Com as chapas cortadas e as peças usinadas prontas, realiza-se a pré-montagem dos sub-conjuntos, em preparação para a soldagem.

Soldagem: As soldas serão executadas por processo MIG.

Jateamento e Pintura: Para garantir durabilidade e qualidade à pintura, será realizado o jateamento de abrasivo nas superfícies antes de pintá-las.

Montagem Final: Montagem de todos os sistemas do equipamento.

O cronograma para todo o processo de fabricação, considerando as etapas descritas, será o seguinte:



5. Teste de Funcionamento

Para garantir que o equipamento realize as dobras com a qualidade esperada, testes de funcionamento foram realizados ainda na fábrica, possibilitando que possíveis problemas fossem constatados e corrigidos.

O teste para comprovar a qualidade do equipamento é relativamente simples: consiste na realização da dobra de um tubo da estrutura e outro da suspensão do Baja, verificando a qualidade obtida nas dobras, atentando-se para amassamentos e enrugamentos.

Os tubos foram posicionados no equipamento como mostrado na figura 22.



Figura 22 - Posicionamento do tubo

Com o tubo da estrutura posicionado, a dobra foi realizada e a qualidade obtida pode ser vista na figura 23.



Figura 23 - Dobra do tubo da estrutura

Pode-se notar que houve o amassamento do tubo, reduzindo a secção, no ponto de máximo amassamento, para 26,5 mm (redução de 3,5 mm). Esse amassamento é visualmente notado, e faz com que a qualidade da dobra não seja satisfatória. Para evitar a utilização de procedimentos que dificultariam o processo de dobra, como a colocação de areia no interior dos tubos, uma pequena modificação no equipamento foi realizada para reduzir o amassamento: a polia de compressão foi substituída por uma canaleta de compressão (esta solução é adotada em alguns equipamentos comerciais).

Esta modificação pode ser vista na figura 24.

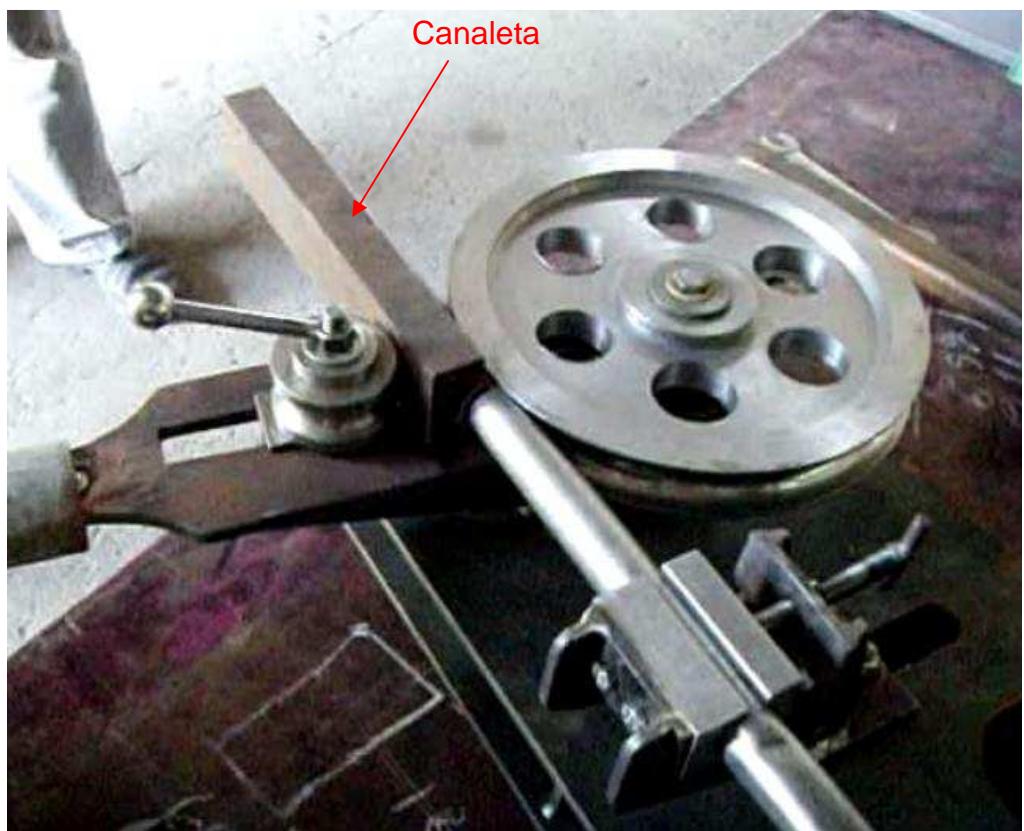


Figura 24 - Modificação no equipamento

Com a modificação, um novo teste foi realizado, obtendo-se a dobra da figura 25.



Figura 25 - Dobra do tubo da estrutura após a modificação do equipamento

A melhora é visualmente clara e desta vez o amassamento foi pequeno. A secção de máximo amassamento foi reduzida para 28,6 mm (redução de apenas 1,4mm) e a qualidade foi considerada satisfatória.

Conclusão para tubo da estrutura (\varnothing 30 mm): A dobra sendo realizada com canaleta de compressão se mostrou eficiente e de qualidade satisfatória. Caso seja desejável uma dobra ainda melhor, pode-se utilizar areia para preencher o tubo, assim o amassamento será ainda menor.

Os mesmos testes e modificações foram realizados para o tubo da suspensão, e os resultados podem ser vistos nas figuras 26 e 27, para o projeto inicial e com modificação respectivamente. As figuras mostram que mesmo a solução com canaleta de compressão não se mostrou adequada, o que pode ser explicado pelo fato de que a parede deste tubo é muito fina (0,9 mm).



Figura 26 - Dobra do tubo da suspensão



Figura 27 - Dobra do tubo da suspensão após modificação no equipamento

Para que a dobra do tubo da suspensão fique com uma boa qualidade será necessário utilizar areia para preencher o tubo.

O teste com o tubo preenchido com areia foi realizado e o resultado obtido foi satisfatório. O tubo dobrado pode ser visto na figura 28.



Figura 28 - Dobra do tubo da suspensão preenchido com areia

Conclusão para o tubo da suspensão ($\varnothing 3/4"$): O tubo se mostrou não favorável para dobra devido a sua fina parede (0,9 mm). Tanto com a utilização de polia de compressão quanto com a canaleta de compressão o tubo não se comportou de forma satisfatória. Assim a solução encontrada foi preencher o tubo com areia antes de efetuar a dobra, para evitar o amassamento.

Além do problema da qualidade da dobra, verificou-se que a guia de compressão não possuía fixação suficiente para resistir à força de dobra, pois se movimentava com a aplicação da força. Para solucionar este problema um parafuso axial será aplicado no braço, de forma a impedir o movimento da guia.

Constatou-se que a modificação do equipamento é necessária e deverá ser realizada antes da entrega do equipamento para a equipe. A modificação completa consiste na fabricação de duas guias de compressão (uma para cada tubo) e uma roldana de apoio para as guias, além da colocação de um parafuso axial no braço para impedir o movimento da guia de compressão. Os detalhes das modificações podem ser vistos no Anexo 2.

6. Sugestões para Dobra com Qualidade

Abaixo serão colocados alguns pontos que podem interferir na qualidade da dobra realizada:

- As guias devem ser reguladas de acordo com o raio de dobra utilizado, fazendo com que o tubo fique posicionado paralelamente à base do equipamento;
- O tubo deve ser travado nas guias de forma a impedir totalmente sua movimentação;
- A guia de compressão deve ser apenas encostada no tubo e travada através do parafuso superior. Após isso o parafuso axial deve ser movimentado apenas até encostar no batente; não deve ser apertado. Desta forma o braço de alavanca irá se movimentar livremente alguns graus, fazendo com que a força para dobra seja reduzida;
- Como o braço de alavanca irá se movimentar livremente alguns graus, estes “graus livres” devem ser compensados no momento de travar o posicionador angular, de forma que o ângulo de abraçamento seja mantido, por exemplo: o ângulo de abraçamento desejado é de 60°, mas o braço de alavanca esta se movimentando 4°, assim o posicionador angular deve ser travado em $60^\circ + 4^\circ = 64^\circ$;
- Para melhorar a qualidade da dobra é possível preencher o tubo com areia seca, o que irá reduzir o amassamento e enrugamento. No caso do

tubo da suspensão esse procedimento é necessário, e deve ser feito da seguinte forma:

- Fechar uma das extremidades do tubo;
- Preencher com areia fina totalmente seca;
- Fechar a outra extremidade do tubo;
- Realizar a dobra a frio.

No caso do tubo da estrutura, o enchimento com areia é opcional, pois ele se comportou bem nos testes de dobra.

7. Conclusão

O projeto do equipamento foi iniciado com o levantamento das necessidades da equipe Poli de Baja. Esta fase foi muito importante, pois de nada serviria um equipamento de dobrar tubos se este não atendesse às particularidades existentes na fabricação do Baja.

Com as necessidades apontadas, iniciou-se o projeto básico do equipamento, definindo-se de forma geral quais seriam as principais características e formas, passando assim para o projeto detalhado, no qual as dimensões de cada componente foram determinadas.

Após a conclusão do projeto detalhado do equipamento, no qual cada componente foi determinado separadamente visando a fabricação, obteve-se uma visão clara de todos os processos de fabricação necessários.

Os processos de fabricação foram determinados levando em consideração a disponibilidade de recursos no local onde o equipamento de dobrar tubos iria ser fabricado. Além do projeto detalhado, para o processo de corte das chapas, foi necessária a elaboração dos programas de corte para alimentar a máquina de corte CNC. Esse trabalho consumiu grande tempo, pois para cada peça foi necessária a elaboração de uma programação.

Com o projeto detalhado e os programas de corte finalizados, foi então concebido o equipamento. Todo o processo de fabricação levou aproximadamente 45 dias, esse tempo deve-se em parte a não disponibilidade de tempo contínuo para a fabricação, fazendo com que o equipamento fosse sendo fabricado durante períodos disponíveis de tempo.

Após a fabricação foram realizados teste de funcionamento do equipamento, e estes mostraram que algumas alterações eram necessárias para que a qualidade da dobra fosse adequada às necessidades da equipe. As alterações foram realizadas e os novos testes mostraram que o processo de dobra foi executado satisfatoriamente.

Com as alterações, o equipamento concebido apresentou boa qualidade e irá atender a todas as necessidades levantadas no início do trabalho.

8. Referências Bibliográficas

1. Kalpakjian, S. - "Manufacturing Processes for Materials" - Prentice Hall, 1997.
2. Timoshenko, S.P.; Gere, J.E. - "Mecânica dos Sólidos", Vol. 1 e 2, - Livros Técnicos e Científicos Editora Ltda., 1984.
3. Niemann, G. – “Elementos de máquinas” - Edgard Blucher, 1950.
4. Zampese, B. – “Dimensionamento” – Editora do Grêmio Politécnico, 1938.
5. Zampese, B. – “Manuais de Rolamento” – Editora do Grêmio Politécnico, 1980.
6. Regulamento – XIV competição Baja SAE Brasil 2008.

Anexo 1 – Projeto Detalhado

Anexo 2 – Modificações do Projeto