

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

EXTRUSORA PORTÁTIL PARA FABRICAÇÃO  
DE ELETRODO REVESTIDO

por

Diogo Bettoni

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Engenheiro Mecânico.

Porto Alegre, Julho de 2011.

EXTRUSORA PORTÁTIL PARA FABRICAÇÃO  
DE ELETRODO REVESTIDO

por

Diogo Bettoni

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS  
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE  
**ENGENHEIRO MECÂNICO**  
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Arnaldo Ruben Gonzalez  
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: **Projeto e Fabricação**

Orientador: Prof. Arnaldo Ruben Gonzalez

Co-orientador: Prof. Carlos René Gómez Pérez

Comissão de Avaliação:

Prof. José Antônio Esmerio Mazzaferro

Prof. Ney Francisco Ferreira

Porto Alegre, Julho de 2011.

Dedico este trabalho aos familiares e amigos que sempre estiveram ao meu lado.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente aos meus pais Felix Bettoni e Djanira Nichetti Bettoni por todo o incentivo aos estudos, ideais e valores os quais me guiaram durante toda a vida. A minha irmã Graziela Bettoni. A minha namorada Vivian, pelo apoio, compreensão, companheirismo e carinho. Ao meu orientador Prof. Dr. Arnaldo Ruben Gonzalez pelo suporte e auxílio na elaboração deste trabalho. Ao Dr. Carlos René Gómez Pérez pela ajuda e por disponibilizar os dados de sua pesquisa que serviram de base para este trabalho. Ao Dr. Joyson Luiz Pacheco pelas indicações bibliográficas e orientações. Ao Dr. Ivan Guerra Machado por disponibilizar toda infraestrutura do LS&TC para realização deste trabalho. A UFRGS em especial ao Departamento de Engenharia Mecânica e seus professores pelo esforço para oferecer ensino de qualidade e apoio dentro e fora de sala de aula. Aos colegas e amigos pelas longas noites de estudo e momentos de lazer.



BETTONI, D. **Extrusora Portátil para Fabricação de Eletrodo Revestido**. 2011. 20 folhas. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

## RESUMO

O processo de Soldagem a Arco com Eletrodo Revestido – “*Shielded Metal Arc Welding-SMAW*” é um processo manual comumente utilizado para união de componentes metálicos. Neste processo de soldagem é utilizado eletrodo revestido, o qual é composto por dois elementos principais: a alma e o revestimento. Este revestimento é depositado sobre a alma metálica através de um processo de extrusão. Para auxiliar os estudos sobre a influência do material do revestimento no metal depositado, o presente trabalho tem como objetivo desenvolver uma máquina de extrusão manual portátil para a fabricação de eletrodos revestidos com diferentes tipos de substratos. O desenvolvimento desse projeto contempla o estudo das propriedades mecânicas do revestimento sob as condições de extrusão, a análise conceitual das vantagens e desvantagens de diferentes conceitos de máquina extrusora e o projeto detalhado do modelo que apresentar maior facilidade na extrusão da massa verde sobre a alma metálica. Ao final do trabalho é obtido o projeto detalhado de uma máquina capaz de realizar com perfeição e baixo custo a extrusão de eletrodos revestidos.

**PALAVRAS-CHAVE:** Processo de Extrusão; Eletrodo Revestido.

BETTONI, D. **Portable Extruder to Produce Covered Electrode**. 2011, 20 folhas. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

## ABSTRACT

The Shielded Metal Arc Welding process, SMAW, is a manual process commonly used for joining metal components. In this welding process is used covered electrode, which is composed of two main elements: the core wire and the electrode covering. This electrode covering is deposited on the core wire through an extrusion process. Assist to study on the influence of electrode covering deposited on the weld metal, this paper aims to develop a portable manual extruder for the manufacture of covered electrodes with different chemical compound in the covering. The development of this project includes the study of mechanical properties of the covering under the conditions of extrusion, the conceptual analysis of the advantages and disadvantages of different concepts of extrusion machine and detailed design of the model that provide greater ease in the extrusion of the green mass on the metallic core wire. At the end of the work will get the detailed design of a machine able to perform to perfection and low cost extrusion covered electrodes.

**KEYWORDS:** Extrusion Process; Covered Electrode.

## ÍNDICE

1.	INTRODUÇÃO .....	1
2.	OBJETIVOS .....	1
3.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	1
3.1.	Soldagem a Arco Elétrico com Eletrodo Revestido .....	1
3.2.	Eletrodo Revestido.....	2
3.3.	Princípios do Processo de Extrusão.....	2
3.4.	Tipos de Extrusão .....	3
3.5.	Tensões e Deformações na Extrusão .....	3
3.6.	Principais Fatores de Influência na Extrusão.....	3
3.7.	Defeitos de Extrusão .....	4
4.	MÁQUINA EXTRUSORA.....	4
4.1.	Propriedades Mecânicas do Revestimento do Eletrodo .....	4
4.2.	Projeto Informacional – Atributos Desejáveis .....	7
4.3.	Projeto Conceitual – Conceitos Desenvolvidos .....	8
4.3.1.	Primeiro Conceito.....	8
4.3.2.	Segundo Conceito:.....	9
4.3.3.	Terceiro Conceito.....	9
4.3.4.	Conceito Selecionado .....	9
4.4.	Projeto Executivo – Dimensionamento.....	11
4.4.1.	Recipiente de Extrusão .....	11
4.4.2.	Torque no Volante.....	13
4.4.3.	Seleção da Engrenagem.....	13
4.4.4.	Dimensionamento do Eixo Secundário.....	14
4.4.5.	Dimensionamento do Eixo do Êmbolo.....	14
5.	DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	14
6.	CONCLUSÃO.....	15
7.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	15
8.	APÊNDICE A.....	16

## 1. INTRODUÇÃO

O estudo da soldagem é de extrema importância, principalmente, ao setor metalmeccânico, a indústria constantemente busca o aumento da produtividade, a redução de peso e de custos no sistema de produção. Esta busca propiciou o desenvolvimento de novos processos de soldagem, no entanto, ainda nos dias de hoje, o processo de Soldagem a Arco Elétrico com Eletrodo Revestido – “*Shielded Metal Arc Welding-SMAW*” continua sendo um processo muito empregado devido à sua grande versatilidade, ao baixo custo de operação, à simplicidade dos equipamentos necessários e à possibilidade de uso em locais de difícil acesso ou sujeitos a ventos [Fortes, 2005].

O processo SMAW se dá através da utilização do eletrodo revestido, o qual é composto por dois elementos principais: a alma e o revestimento. Para fabricação do eletrodo revestido utiliza-se o processo de extrusão, no qual a “massa verde” (produto resultante da adição de silicatos aos elementos secos misturados para produzir o revestimento) deve revestir a alma metálica concêntricamente mantendo uma espessura uniforme e com boa adesão.

Como parte do projeto de pesquisa “Desenvolvimento de Eletrodos Revestidos para Recobrimento Protetor de Componentes Submetidos a Condições de Desgaste Abrasivo” do “Projeto de Cooperação Internacional” do Programa de Cooperação Inter Universitária **CAPES / MES-Cuba 071/09** realizado em parceria da UFRGS com a “Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas” – Cuba, este trabalho tem como objetivo projetar uma máquina extrusora manual portátil para auxiliar no âmbito relacionado à fabricação de eletrodos revestidos. Para tal, na primeira etapa do trabalho será efetuada uma revisão bibliográfica sobre os fatores de influência em um processo de extrusão e análise dos requisitos para fabricar eletrodo revestido de boa qualidade. Na segunda, será elaborada uma lista de atributos desejáveis para a máquina extrusora, os quais servirão de parâmetro para definição do projeto conceitual. Na terceira, será definido o projeto conceitual e serão realizadas as análises necessárias para o dimensionamento da máquina extrusora. No final, o resultado do trabalho deverá ser o projeto de uma máquina suficientemente robusta ao processo de extrusão, ao mesmo tempo leve e portátil, capaz de realizar a extrusão de eletrodos de diâmetros e composições diferentes com o mínimo possível de desperdício de matéria-prima e energia.

## 2. OBJETIVOS

O presente trabalho visa desenvolver uma máquina de extrusão manual portátil para a fabricação de eletrodos revestidos com diferentes formulações na composição do revestimento, o objetivo é auxiliar as pesquisas sobre a influência dos elementos de liga do revestimento no metal depositado. Para tal, será realizado um estudo sobre as propriedades mecânicas da massa verde do revestimento sob as condições de extrusão e a partir daí serão elaborados diferentes conceitos de máquina extrusora com vistas a atender uma lista de atributos previamente estabelecida. O modelo que apresentar a maior facilidade na extrusão de massa verde sobre a alma metálica e atender a lista de atributos terá o seu projeto detalhado contemplando desde a análise de esforços até os desenhos para a fabricação. Ao final do trabalho será obtido o projeto detalhado de uma máquina capaz de realizar com perfeição e baixo custo a extrusão de eletrodos revestidos de diâmetros e composições diferentes.

## 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 3.1. Soldagem a Arco Elétrico com Eletrodo Revestido

O processo de Soldagem a Arco Elétrico com Eletrodo Revestido – “*Shielded Metal Arc Welding-SMAW*” é um processo manual comumente utilizado para união de componentes metálicos. Seu princípio ativo se dá através do calor gerado devido ao arco elétrico que é mantido entre a extremidade de um eletrodo metálico revestido e a peça de trabalho, sendo assim estabelecida a poça de fusão, Figura 3.1.

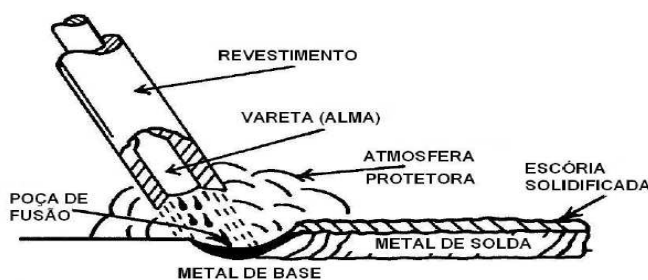


Figura 3.1 - Processo de Soldagem a Arco Elétrico [Fortes, 2005].

### 3.2. Eletrodo Revestido

O eletrodo revestido teve enorme contribuição para que a soldagem se torna-se um dos mais importantes processos de fabricação, consequência direta da sua extrema flexibilidade. Sua estrutura é composta por dois elementos principais: a alma metálica e o revestimento.

Segundo Machado, 1996, a alma metálica do eletrodo revestido para soldagem de aços baixa liga é, usualmente, produzida com aço “efervescente” (não desoxidado), o qual possui uma típica composição química de 0,10% C; 0,45% Mn; 0,01% Si; 0,03% S e 0,02% P. Sua fabricação se dá através da laminação a quente do fio-máquina, que é posteriormente trefilado a frio até o diâmetro correspondente do eletrodo, retificado e cortado no comprimento apropriado. Dentre suas funções se destacam a condução de corrente elétrica e o fornecimento de metal de adição para a junta.

Em meados de 1910, Oscar Kjellberg obteve a primeira patente, na qual a alma do eletrodo era revestida com um material argiloso. A utilização do revestimento propiciava maior facilidade de abertura do arco elétrico e melhorava sua estabilidade durante o processo de soldagem. A escória formada pela decomposição do mesmo protegia a poça de fusão do contato com a atmosfera e permitia o uso do consumível em posição contrária à ação da gravidade (“sobrecabeça”). A utilização do revestimento promoveu um enorme avanço ao processo de soldagem [Machado, 1996].

O revestimento do eletrodo é composto por minerais e produtos químicos, ele possui uma enorme variedade de opções para seus ingredientes, um revestimento ideal seria aquele que cumprisse plenamente todas as funções, a um custo de produção satisfatório e ainda que não apresentasse problemas de conservação e manuseio. Obviamente tal eletrodo não existe, com isso, diversos trabalhos são realizados nessa área para elaborar eletrodos que atendam a um conjunto de exigências, em detrimento de outros, de modo a torná-los adequados a aplicações específicas.

Para fabricação do eletrodo revestido utiliza-se o processo de extrusão, no qual a massa verde deve revestir a alma metálica concentricamente mantendo uma espessura uniforme e com boa adesão. Quando o revestimento não estiver concêntrico com a alma metálica, o eletrodo irá queimar de modo irregular, deixando uma projeção onde o revestimento é mais espesso. Problemas na fabricação do eletrodo podem causar a má direção do arco gerando cordões de solda ineficientes com proteção deficiente e falta de penetração.

### 3.3. Princípios do Processo de Extrusão

Segundo Dieter, 1981, a importância dos metais na tecnologia moderna deve-se, em grande parte, à facilidade com que podem ser conformados em formas úteis, tais como tubos, barras e chapas finas. Basicamente é possível separar em duas as maneiras de obtenção dessas formas:

- Processos de deformação plástica, através dos quais o volume e a massa do metal são conservados;
- Processos de remoção metálica ou usinagem, através dos quais se retira material para que se obtenha a forma desejada.

A extrusão é o processo de conformação plástica no qual um bloco de material é reduzido na sua seção transversal pela aplicação de pressões elevadas forçando-o a escoar através do orifício de uma matriz. Seu princípio fundamental é a relação do volume constante.

### 3.4. Tipos de Extrusão

Existem basicamente dois tipos de processo de extrusão, a direta e a indireta, também chamada de extrusão invertida ou inversa. Na extrusão direta o tarugo de material é colocado num recipiente e pressionado através de uma matriz por um êmbolo. O estampo é posicionado no extremo do êmbolo em contato com o tarugo. Na extrusão indireta um êmbolo vazado conduz a matriz, enquanto o outro extremo do recipiente é fechado com uma placa. Frequentemente, para a extrusão indireta, o êmbolo é mantido estacionário, e o recipiente com o tarugo faz o movimento. Por causa disso, na extrusão indireta não há um movimento relativo entre as paredes do recipiente e o tarugo, e com isso as forças de atrito são menores e a potência necessária para a extrusão indireta é menor do que para a extrusão direta.

Na extrusão direta, a pressão inicial requerida para superar o atrito estático é maior e diminui conforme a redução do comprimento do tarugo. Na extrusão indireta a pressão de extrusão é praticamente constante durante o percurso do êmbolo. Apesar de a extrusão indireta parecer mais atraente ao exigir menor potência, existem limitações práticas devido à necessidade de se usar um êmbolo vazado limitando a carga que pode ser aplicada.

### 3.5. Tensões e Deformações na Extrusão

O estudo das forças e deformações que ocorrem no processo geralmente não é simples e frequentemente utilizam-se hipóteses simplificadoras para atingir uma solução tratável. A maioria das análises considera o material como sendo isotrópico e homogêneo, porém, em muitos casos, a deformação do material não é uniforme. A principal utilização dos cálculos analíticos dos processos de conformação mecânica consiste na determinação de forças e deformações para casos específicos. Tais cálculos são úteis para selecionar ou projetar equipamentos, objetivo principal deste trabalho. De modo geral a energia envolvida no processo é composta das seguintes parcelas:

- Energia utilizada para deformar o tarugo até uma dada redução de diâmetro;
- Energia redundante, definida como a energia gasta na deformação interna do material, e que não contribui nas mudanças de dimensões;
- Energia necessária para vencer o atrito na superfície de contato tarugo-recipiente e tarugo-ferramenta.

### 3.6. Principais Fatores de Influência na Extrusão

Para obter um processo de extrusão despendendo a mínima energia é importante analisar adequadamente as variáveis que influem na pressão de extrusão. Para o projeto mecânico são elas, a relação de redução, o ângulo de conicidade da matriz, o efeito do atrito entre a superfície do tarugo a extrudar e a superfície interna da matriz de extrusão, a temperatura e a velocidade de extrusão. Serão explicadas a seguir apenas as três primeiras variáveis, já que a velocidade e a temperatura de extrusão não teriam influência significativa na extrusão da massa verde com a máquina manual à temperatura ambiente.

- a) Influência da Relação de Redução:** a relação de redução, ou seja, a variação de área do tarugo para o produto tem grande contribuição na variação da pressão de extrusão, segundo Button, 1985, quanto maior o nível de deformação (maior relação), maior será a pressão necessária para efetivar o processo de extrusão.
- b) Influência do Ângulo da Matriz:** a seleção do ângulo da matriz está associada ao equilíbrio entre parcela de trabalho redundante e a parcela de trabalho devido ao atrito. O trabalho redundante advém do esforço despendido para promover a mudança da direção de escoamento do material durante a extrusão. Quanto menor for o ângulo da matriz, mais uniforme será o escoamento do material e menor será o trabalho redundante. No entanto, quanto menor o ângulo, maior será a superfície de contato entre o tarugo e a matriz, conseqüentemente maior será a perda devido ao atrito. Sendo assim, há um ângulo ótimo onde as parcelas são balanceadas e a pressão de extrusão é mínima [Button, 1985].

- c) Influência do Atrito:** o atrito é o mecanismo pelo qual se desenvolvem forças de resistência superficiais ao deslizamento de dois corpos em contato. Portanto, segundo Morais, 2003, no processo de extrusão o atrito sempre estará presente, em maior ou menor grau. Dentre as principais características que o atrito causa no processo estão a alteração dos estados de tensão presentes durante a deformação, produção de fluxos irregulares, criação de tensões residuais no produto, mudanças na qualidade superficial, elevação da temperatura, aumento do desgaste de ferramentas e aumento do consumo de energia necessária à deformação, diminuindo a eficiência.

### 3.7. Defeitos de Extrusão

Dependendo das condições e do material a ser extrudado podem ocorrer vários tipos de defeitos, que afetam a resistência e a qualidade do produto final. Entre os principais estão: a trinca superficial, que ocorre principalmente devido a temperatura ou velocidade de deformação muito alta; o cachimbo, defeito causado principalmente pelo padrão de fluxo do material, ele tende a arrastar óxidos e impurezas superficiais para o centro do tarugo; as trincas internas, ponta de flecha ou *chevron*, são atribuídas à tensão hidrostática de tração na linha central, a tendência à formação de fissuras centrais aumenta com o crescimento da fricção e da relação de extrusão.

## 4. MÁQUINA EXTRUSORA

### 4.1. Propriedades Mecânicas do Revestimento do Eletrodo

Nas composições de revestimento que estão em estudo no LS&TC (UFRGS) são observadas porcentagens de  $K_2SiO_3$ ,  $CaCO_3$ , FeSi, FeMn,  $TiO_2$ , C, FeCr e FeW. Esses produtos, após serem devidamente pesados, são processados até reduzirem consideravelmente sua granulometria, Figura 4.1A, depois são misturados com aglutinante (silicato de potássio ou sódio), conforme Figura 4.1B, até formarem uma mistura uniforme, também conhecida como massa verde.



Figura 4.1 – (A) Matéria prima para o revestimento do eletrodo. (B) Processo de mistura.

No Laboratório de Soldagem e Técnicas Conexas da UFRGS, o LS&TC, onde este trabalho obteve grande apoio, a extrusão de eletrodo revestido já ocorre desde a década de 90, quando foi comprada uma máquina extrusora Berner, Figura 4.2. Apesar da experiência sobre o assunto adquirida ao longo desses anos, não foram realizados estudos sobre a tensão de escoamento média do material extrudado. Essa tensão de escoamento média  $\sigma_m$ , assim chamada por Morais, 2003, é para esse trabalho a informação mais importante da massa verde, pois seu valor é essencial para o cálculo da pressão de extrusão máxima durante o processo de fabricação, o qual servirá de base para o dimensionamento estrutural da nova máquina extrusora portátil.

Apesar de parecer uma tarefa simples, ao contrário da maioria dos materiais metálicos que permitem determinar suas propriedades mecânicas mediante ensaios típicos de tração ou compressão, a matéria prima do revestimento não dispõe dessa possibilidade devido a sua configuração física. Sendo assim, fez-se necessário um estudo partindo da informação da pressão no pistão, do atrito e da geometria da máquina extrusora já existente no LS&TC.



Figura 4.2 - Máquina extrusora para eletrodos revestidos do LS&TC.

Ao observar as operações de extrusão de eletrodo realizadas com ela, notou-se que frequentemente a pressão no pistão durante o processo se repetia, com isso é possível considerar que esse valor de 30 MPa seja um valor admissível para utilizar nos cálculos. Dessas observações ainda advém a avaliação do atrito, segundo Altan, 1999, para processos de extrusão semelhantes a esse, nos quais não há utilização de lubrificantes, uma boa estimativa é considerar o fator de cisalhamento de atrito,  $m$ , igual a 1. Por último, para utilizar os valores geométricos da máquina extrusora foi necessário simplificar sua complexa geometria, Figura 4.3, em um modelo cilíndrico mais simples.

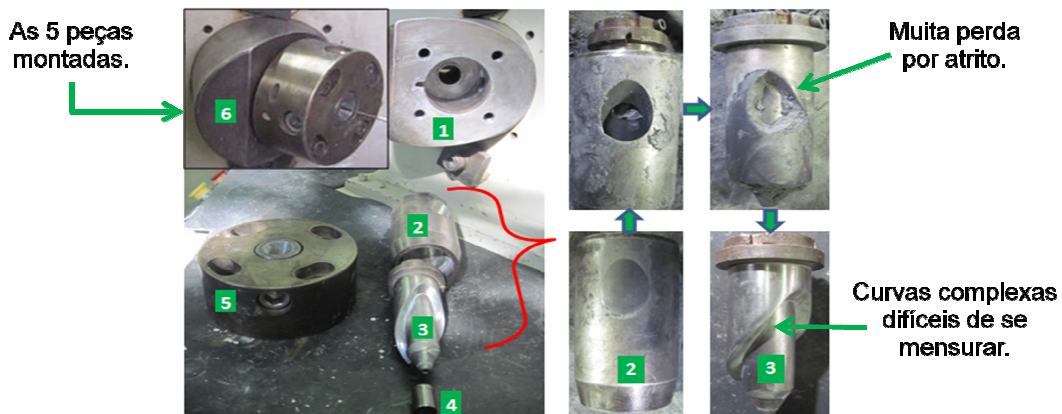


Figura 4.3 – Conjunto de peças da máquina extrusora do LS&TC.

No modelo esquemático, Figura 4.4, as dimensões expostas são equivalentes as da estrutura real. Considerando a massa verde um fluido altamente viscoso, com base no estudo da mecânica dos fluidos é possível dizer que a perda de energia no conjunto de peças da Figura 4.3 equivaleria no mínimo a de um duto com cotovelo de 45°, portanto nos cálculos sobre a pressão de extrusão necessária é conveniente utilizar o comprimento da região “D” multiplicado por 16, segundo Fox et alli, 1938. Atento às incertezas dessa relação, os arredondamentos realizados nos valores que serão utilizados nos cálculos são estrategicamente selecionados para garantir segurança ao projeto da nova máquina.

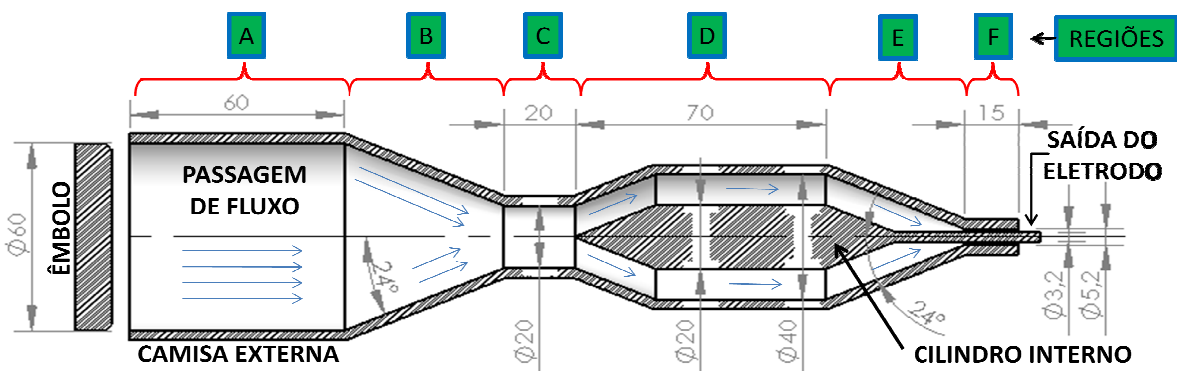


Figura 4.4 – Modelo esquemático da geometria da extrusora do LS&TC, dimensões em mm.

Em obras como a de Button, 1985, e de outros autores, é possível observar diversos métodos para o cálculo dos esforços no processo de extrusão, dos quais muitos demonstram enorme divergência entre o resultado teórico e o prático, outros utilizam de fatores empíricos válidos unicamente para alguns casos específicos, enquanto apenas alguns métodos obtêm resultados admissíveis. Neste trabalho, para o estudo da propriedade do material são utilizados dois métodos, os quais em diversas literaturas se mostraram eficientes e são recomendados pelos autores Button, 1985, Nery, 1980, e Dieter, 1981. O primeiro exposto nas Equações (4.1 e (4.2, conhecido como Método dos Blocos, baseia-se no estudo das forças atuantes em um determinado elemento de volume (bloco). O segundo exposto nas Equações (4.3 e (4.4, conhecido como Método do Limite Superior, segundo a teoria de Avitzur, 1965, baseia-se na determinação de uma geometria de fluxo, expressa através de um campo de velocidades cinematicamente admissível, que descreva o processo de conformação em análise.

$$F_i = F_A + F_B + F_C + F_D + F_E + F_F \quad (4.1)$$

$$p_i = \frac{\left[ \left( m \times \frac{\sigma_m}{\sqrt{3}} \right) \pi D_A L_A \right]_A + \left\{ A_A \sigma_m \left( \frac{b_B + 1}{b_B} \right) \left[ 1 - \left( \frac{A_{iB}}{A_{jB}} \right)^b \right] \right\}_B + \left[ \left( m \times \frac{\sigma_m}{\sqrt{3}} \right) \pi D_C L_C \right]_C + \left[ \left( m \times \frac{\sigma_m}{\sqrt{3}} \right) \pi L_D (D_D + d_D) \right]_D + \left\{ A_D \sigma_m \left( \frac{b_E + 1}{b_E} \right) \left[ 1 - \left( \frac{A_{iE}}{A_{jE}} \right)^b \right] \right\}_E + \left[ \left( m \times \frac{\sigma_m}{\sqrt{3}} \right) \pi D_F L_F \right]_F}{A_A} \quad (4.2)$$

onde, considerando  $i$  como um índice geral e observando a Figura 4.4, se tem que  $F_i$  é a força de extrusão total,  $F_i$  é força de extrusão na região  $i$ , ambas em N,  $p_i$  é a pressão de extrusão total, em MPa,  $D_i$  é o diâmetro interno da camisa na seção  $i$ ,  $d_i$  é o diâmetro externo do cilindro interno da seção  $i$ , ambas em mm,  $L_i$  é o comprimento da seção  $i$ , em mm,  $\alpha$  é o semiângulo do cone de redução da matriz, em radianos e  $b = \mu \cot g \alpha$ , onde  $\mu$  é o coeficiente de atrito, que para o caso de extrusão na máquina do LS&TC será igual a 0,2, uma boa estimativa considerando a configuração físico-química da massa verde, segundo Shigley, 2005.

$$F_i = F_A + F_{BC} + F_D + F_{EF} \quad (4.3)$$

$$p_i = \frac{\left[ \left( m \times \frac{\sigma_m}{\sqrt{3}} \right) \pi D_A L_A \right]_A + \left[ \left( m \times \frac{\sigma_m}{\sqrt{3}} \right) \pi L_D (D_D + d_D) \right]_D + A_A \sigma_m \left\{ \ln \frac{A_{iB}}{A_{jB}} + \frac{2}{\sqrt{3}} \left( \frac{\alpha}{\sin^2 \alpha} - \cot g \alpha \right) + 2\mu \left( \cot g \alpha \right) \left[ 1 + \frac{\left( \ln \frac{A_{iB}}{A_{jB}} \right)}{2} \right] \frac{\left( \ln \frac{A_{iB}}{A_{jB}} \right)}{2} + \frac{L_C}{R_C} \right\}_{BC} + A_D \sigma_m \left\{ \ln \frac{A_{iE}}{A_{jE}} + \frac{2}{\sqrt{3}} \left( \frac{\alpha}{\sin^2 \alpha} - \cot g \alpha \right) + 2\mu \left( \cot g \alpha \right) \left[ 1 + \frac{\left( \ln \frac{A_{iE}}{A_{jE}} \right)}{2} \right] \frac{\left( \ln \frac{A_{iE}}{A_{jE}} \right)}{2} + \frac{L_F}{R_F} \right\}_{EF}}{A_A} \quad (4.4)$$

onde  $R_i$  é o raio da seção  $i$ , em mm.

Com base nos dados do modelo esquemático, Figura 4.4, utilizando as Equações 4.2 e 4.4, o resultado obtido na avaliação da propriedade mecânica do material de revestimento do



eletrodo durante o processo de extrusão, segundo o método dos blocos,  $\sigma_m = 683,87$  kPa e, conforme o método do limite superior,  $\sigma_m = 690,39$  kPa. A diferença entre eles é de apenas 0,94%, considerada pequena, ela é admissível pelas teorias de conformação mecânica. Sendo assim, com os resultados validados através da comparação entre os métodos e considerando que o projetista tem interesse que a máquina resista à hipótese da solicitação mecânica máxima, a partir deste momento adota-se  $\sigma_m = 690,39$  kPa como propriedade da massa verde sob as condições do processo de extrusão.

#### 4.2. Projeto Informacional – Atributos Desejáveis

O projeto desse trabalho destina-se a produzir uma máquina que será utilizada principalmente em laboratórios, por pesquisadores. Tendo em vista isso, se dará preferência aos processos de fabricação por usinagem, os quais são mais adequados para produção de um número pequeno de máquinas.

A configuração dessa máquina deverá contemplar a fabricação de 15 eletrodos por recarga de massa verde na camisa, os quais terão a alma com 350 mm de comprimento e 3,2 mm de diâmetro e o revestimento com 320 de comprimento e 1 mm de espessura. Esses eletrodos, ao final do processo de extrusão, deverão estar com o revestimento sobreposto à alma metálica de maneira concêntrica e uniforme. Além disso, são desejáveis os seguintes atributos:

**a) Sincronia entre a velocidade de avanço do êmbolo e da alma:** a lei da constância do volume é fundamental, ela propõe que durante a transformação mecânica não há perda de material e o volume de matéria se mantém constante. Dela se obtém que no processo de extrusão deve haver sincronia entre a velocidade de avanço do êmbolo e da alma, e que essa sincronia deve ser inversamente proporcional à redução de área da seção transversal. Isso facilitará a aderência do revestimento na alma.

Em algumas máquinas de extrusão de eletrodos como a que é utilizada atualmente no LS&TC, o painel de controle possui comandos para controlar de forma independente a pressão de extrusão e a velocidade de avanço da alma do eletrodo. Essa independência entre os controles tem promovido grande dificuldade aos pesquisadores para produzir eletrodos revestidos, são necessárias várias tentativas até obter um eletrodo de qualidade, conforme pode ser visto na Figura 4.5.



Figura 4.5 – Extrusão de eletrodo revestido na máquina do LS&TC.

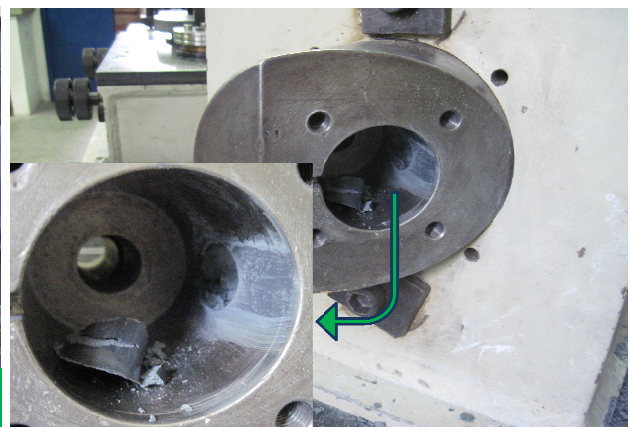


Figura 4.6 – Material incrustado após o processo de extrusão.

**b) Capaz de extrudar diferentes tipos de revestimento:** é um parâmetro fundamental para que a máquina possa ajudar nas pesquisas variando a composição do revestimento.

**c) Pequena e de fácil transporte:** ao contrário de máquinas de extrusão, como a do LS&TC, planejadas para operar com volumes maiores de produção e que não anseiam a facilidade de transporte, a nova máquina deve ser pequena e de fácil transporte, dessa forma entende-se que seu volume de produção deverá ser de no máximo 15 eletrodos a cada recarga da camisa, ser de fácil montagem e desmontagem e possibilitar o seu transporte dentro um automóvel.

**d) Custo reduzido para fabricação:** Frente à pressão global e a escassez de recursos para o investimento na área de pesquisa e desenvolvimento, os projetos precisam ser cada dia mais criativos e inteligentes para obter soluções com o mínimo de custo.

**e) Operar manualmente:** a propulsão de força manual atende a demanda dos futuros clientes, e extingue a necessidade de qualquer outro tipo de energia para realização do trabalho, desta forma sendo o modo mais econômico para o uso laboratorial.

**f) Fácil de limpar:** a remoção do produto de massa verde restante da extrusão que ainda permanece em contato com o equipamento pode ser uma tarefa difícil. A composição do revestimento, após o período de extrusão do eletrodo, inicia o seu processo de secagem, no qual sua dureza aumenta significativamente e dificulta qualquer tipo de manipulação. Portanto, quanto maior o número de detalhes na máquina, nos quais possibilitem ao material permanecer incrustado, maior será a dificuldade para limpá-la posteriormente. Na Figura 4.6, é possível observar um local de difícil acesso para a limpeza na máquina extrusora do LS&TC.

**g) Capaz de extrudar diferentes diâmetros de revestimento:** além das pesquisas sobre a composição do revestimento do eletrodo, existem pesquisas planejadas para estudar influência da espessura do revestimento.

**h) Capaz de extrudar dupla camada de revestimento:** o estudo sobre a combinação de diferentes tipos de revestimento sobrepostos em mais de uma camada no eletrodo será no futuro objeto de estudo. Tendo isso em vista, no projeto dessa nova máquina extrusora serão considerados melhores os conceitos que, posteriormente, possam atender a essas pesquisas sem grandes modificações.

A partir das características citadas foi realizada uma pesquisa por projetos já patenteados que pudessem suprir todas essas necessidades, porém o fato não tê-los encontrado motivou o prosseguimento do trabalho e o início da etapa conceitual.

### 4.3. Projeto Conceitual – Conceitos Desenvolvidos

A etapa conceitual do projeto exige muito da criatividade do engenheiro, quanto maior seu nível de conhecimento multidisciplinar maior são as chances dele obter sucesso. Em função das atribuições desejáveis para o projeto, aqui as ideias são organizadas em conjuntos dando origem a conceitos diferentes. A seguir estão expostos alguns dos conceitos analisados para a máquina de extrusão de eletrodo revestido.

#### 4.3.1. Primeiro Conceito

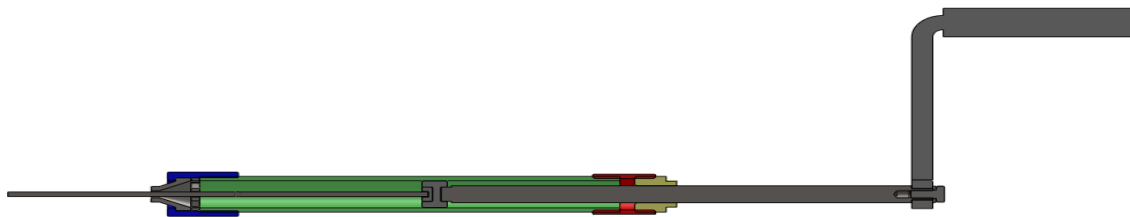


Figura 4.7 – Primeiro conceito de máquina extrusora elaborado.

Objetivando uma solução simples, o ponto de partida se dá através do conceito de uma máquina extrusora com camisa cilíndrica linear, pela qual o êmbolo impulsiona juntas a massa verde e a alma do eletrodo. O avanço do êmbolo advém da rotação promovida na manivela conectada ao fuso, no lado oposto ao do êmbolo. Esse conceito, a princípio, parecia viável, pois com um número reduzido de componentes exigiria baixo custo de fabricação e com a possibilidade do êmbolo chegar próximo à saída do eletrodo utilizaria toda a massa verde inserida na camisa, porém, mediante a análise exaustiva de seu funcionamento, pode-se notar que o conceito apresenta algumas limitações. Por exemplo, como a relação de avanço entre a massa verde e a alma é de 1:1 e a relação entre a área inicial e a área final na matriz deveria ser a mesma, não havendo redução alguma na matriz, o que inviabiliza o processo de extrusão.

### 4.3.2. Segundo Conceito:

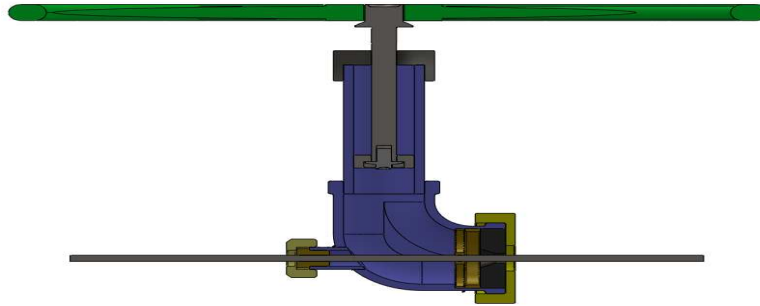


Figura 4.8 – Segundo conceito de máquina extrusora elaborado.

Diante da limitação encontrada no primeiro conceito, o segundo traz uma camisa cilíndrica curva de 90°. Nesse conceito, as velocidades de avanço do êmbolo e da alma do eletrodo são independentes, semelhante ao conceito da máquina extrusora do LS&TC. Apesar dessa versão se eximir da limitação do conceito anterior, ela levanta um questionamento sobre como controlar a velocidade de avanço da alma, que deve ser constante para não causar espessura irregular no revestimento.

Tendo em vista que a perda de carga, causada pela curva na camisa, aumenta a necessidade de esforço para movimentar o êmbolo, a manivela fora substituída por um volante, que permite ao operador produzir esforços maiores. Outra consequência dessa curva, o material inserido na camisa não chega a ser totalmente extrudado, pois não é possível que o êmbolo se aproxime da matriz, causando assim maior desperdício.

### 4.3.3. Terceiro Conceito

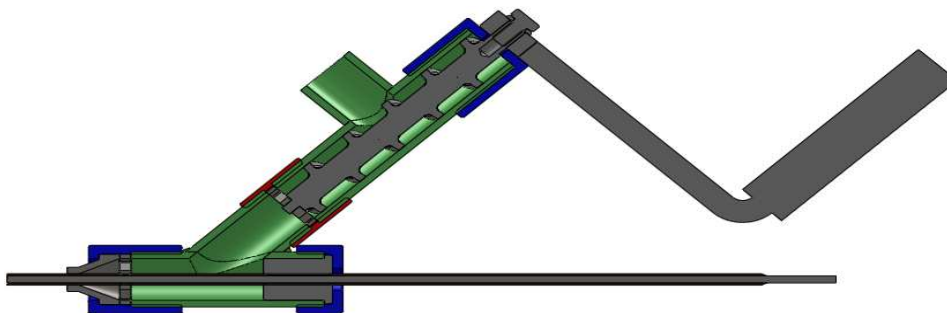


Figura 4.9 – Terceiro conceito de máquina extrusora elaborado.

Devido às limitações descritas do segundo conceito, no terceiro a curva da camisa é alterada para 45° com relação à alimentação da alma a ser revestida, pois com estudos embasados na teoria da mecânica dos fluidos percebe-se que as perdas na curva de 90° seriam maiores aos de 45°. Nesse conceito, outra modificação analisada trata da substituição do pistão por um fuso helicoidal para prover movimento à massa verde. Como vantagens para o emprego do fuso haveria a possibilidade de carregar a camisa continuamente com massa verde e o comprimento da camisa poderia ser menor. Porém, analogamente ao conceito anterior, os problemas com desperdício de material e falta de sincronia entre a velocidade do êmbolo e da alma ainda permanecem.

### 4.3.4. Conceito Selecionado

O conceito selecionado, Figura 4.10, é resultado do estudo de prós e contras não só dos três conceitos citados anteriormente, mas também de inúmeras ideias analisadas durante o projeto. Além da Figura 4.10, no Apêndice A podem ser encontrados mais detalhes sobre os componentes da máquina, incluindo lista de peças, lista de materiais a serem utilizados e os

desenhos de fabricação, nos quais as peças já estão dimensionadas para suportar os carregamentos resultantes do processo de extrusão.

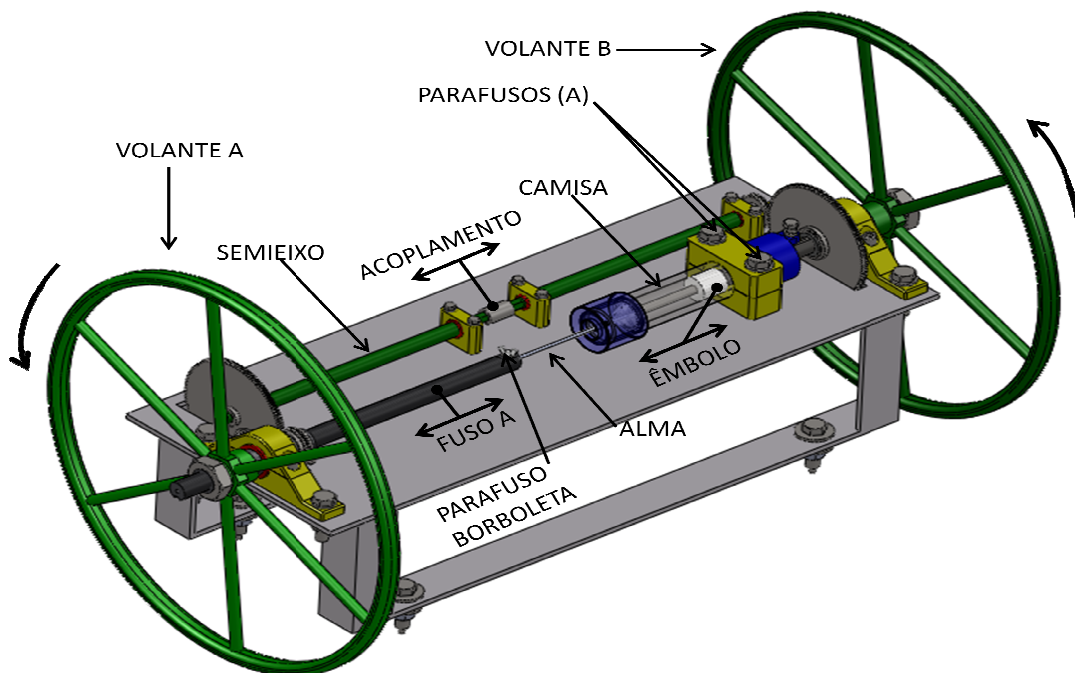


Figura 4.10 – Conceito selecionado para a máquina extrusora.

Etapas para realizar o processo de extrusão dos eletrodos:

- **Etapa 1:** soltar os parafusos (A) para desacoplar a camisa da mesa;
- **Etapa 2:** carregar a camisa com massa verde;
- **Etapa 3:** reposicionar a camisa de volta sobre o suporte e colocar os parafusos removidos na etapa 1.
- **Etapa 4:** posicionar o acoplamento de modo que os dois semieixos fiquem livres um do outro.
- **Etapa 5:** Inserir a alma metálica do eletrodo 20 mm no interior do fuso A, depois apertar o parafuso borboleta para prender a alma;
- **Etapa 6:** Girar o volante A para mover a alma até o interior da camisa.
- **Etapa 7:** Posicionar o acoplamento de modo que os dois semieixos fiquem sincronizados.
- **Etapa 8:** Girar o volante B movendo o êmbolo para frente, dessa forma através das engrenagens e dos semieixos a alma também será movida. Parar essa etapa quando o eletrodo revestido sair totalmente da camisa.
- **Etapa 9:** Ao terminar a etapa 8, inicia-se o processo do segundo eletrodo a partir da etapa V. As etapas de 5 a 8 vão se repetindo até acabar com o volume de massa verde inserido na camisa.

Na lista a seguir poderá ser observado que todas as peças da nova máquina extrusora foram escolhidas para atender da melhor forma aos atributos desejáveis:

**a) Sincronia entre a velocidade de avanço do êmbolo e da alma:** visando eliminar os problemas de aderência resultantes do deslizamento entre o revestimento e a alma, um mecanismo de engrenagens integrado aos dois fusos, um que movimenta o êmbolo e o outro que movimenta a alma, é interligado através do eixo secundário para obter a sincronia. Nota-se ainda a existência de um acoplamento no meio do eixo secundário, útil para os momentos onde não há necessidade de sincronismo.

**b) Capaz de extrudar diferentes tipos de revestimento:** Com base no estudo realizado sobre a propriedade do material, visto no item 4.1, no qual foram consideradas as maiores pressões de extrusão, as piores condições de atrito e um modelo geométrico conservador, observa-se que do mesmo modo a nova máquina é projetada para superar o caso mais crítico quanto ao tipo de revestimento.

**c) Pequena e de fácil transporte:** pesando apenas 22 kg e com menos de 900 mm de comprimento e 500 mm de largura a máquina poderia ser facilmente transportada num automóvel.

**d) Custo reduzido para fabricação:** todos os componentes utilizados na máquina, desde parafusos até chapas e tubos, foram selecionados com base em produtos comerciais, o que reduz significativamente o custo de fabricação. Segundo a Metalúrgica Jhonmaq, onde foi realizado o orçamento para fabricação da máquina seu custo total seria de aproximadamente R\$ 4.600,00, muito menor do que o custo da máquina de extrusão de eletrodos que está no LS&TC.

**e) Operar manualmente:** ao contrário de outras máquinas que necessitam de energia elétrica para funcionar, essa máquina será operada manualmente através dos seus volantes. Nesses volantes, o esforço máximo, quando a máquina for submetida às piores condições de pressão de extrusão e atrito, não ultrapassará 29 kg, portanto passível de ser operada por um ser humano que em média é capaz de produzir 70 kg de esforço num volante, segundo indicações do Protec, 1978.

**f) Fácil de limpar:** Observando as operações de limpeza na máquina extrusora do LS&TC, após o processo de extrusão de eletrodo revestido, foi possível notar que a massa verde fica incrustada em peças de geometria complexa onde o excesso de contornos favorece essa ocorrência. Desta forma, na nova máquina as peças possuem uma geometria que evita esse problema e facilita a operação de limpeza em reduzido tempo.

**g) Capaz de extrudar diferentes diâmetros de revestimento:** no projeto está previsto a possibilidade de revestir eletrodos com outras espessuras apenas alterando duas peças, a matriz que deverá possuir o diâmetro desejado, e o fuso que deverá possuir um passo adequado a nova relação de velocidade.

**h) Capaz de extrudar dupla camada de revestimento:** dentre as ideias discutidas e os conceitos elaborados, este é o que melhor atenderia a possibilidade de realizar a extrusão com dupla camada. De fato, com algumas alterações na camisa, no êmbolo e na matriz seria possível acrescentar a segunda camada com os mesmos mecanismos empregados nessa máquina de revestimento simples. Porém, por não se tratar do foco deste trabalho, as modificações não serão demonstradas, mas ficam como possibilidade para trabalhos futuros.

#### 4.4. Projeto Executivo – Dimensionamento

A partir das considerações efetuadas sobre o conceito do equipamento e dos requisitos para o seu funcionamento, para uma maior segurança quanto ao comportamento dos componentes, passa-se ao dimensionamento dos mesmos. É importante ressaltar que para obter as dimensões da máquina, conforme exposto no Apêndice A, todos os elementos da dela foram adequadamente analisados, no entanto, apenas os cálculos mais complexos serão detalhados a seguir:

##### 4.4.1. Recipiente de Extrusão

No processo de extrusão o recipiente é submetido a elevados níveis de pressão, os quais advêm em parte devido as energias envolvidas na redução de seção que ocorre na matriz e em parte devido ao atrito que ocorre na camisa e na matriz. Considerando o pior caso de atrito, no qual  $m = 1$ , a pressão máxima pode ser calculada, conforme o método dos blocos, através da Equação (4.5):

$$p_t = \frac{\left[ \left( m \times \frac{\sigma_m}{\sqrt{3}} \right) \pi \mu L_A (D_A + d_A) \right]_A + \left\{ A_A \sigma_m \left( \frac{b_B + 1}{b_B} \right) \left[ 1 - \left( \frac{A_{iB}}{A_{fB}} \right)^b \right] \right\}_B + \left[ \left( m \times \frac{\sigma_m}{\sqrt{3}} \right) \pi \mu D_C L_C \right]_C}{A_A} \quad (4.5)$$

O volume da camisa está predeterminado, de modo a conter massa verde suficiente para produzir 15 eletrodos, o diâmetro interno da camisa,  $D_A$ , o diâmetro externo do centralizador,  $d_A$ , e o comprimento da camisa,  $L_A$ , podem ser selecionados em função da menor



pressão de extrusão ou a menor força no êmbolo. Na Figura 4.11, para o volume constante, pode-se observar que conforme a variação do comprimento da camisa valores diferentes de pressão de extrusão e da força no êmbolo podem ser obtidos. A explicação para isso se dá pela seguinte relação: ao reduzir a área do êmbolo menos força é necessária para obter a mesma pressão, porém, com isso o comprimento da camisa aumenta bem como a energia despendida com o atrito e conseqüentemente a pressão de extrusão necessária para o processo.

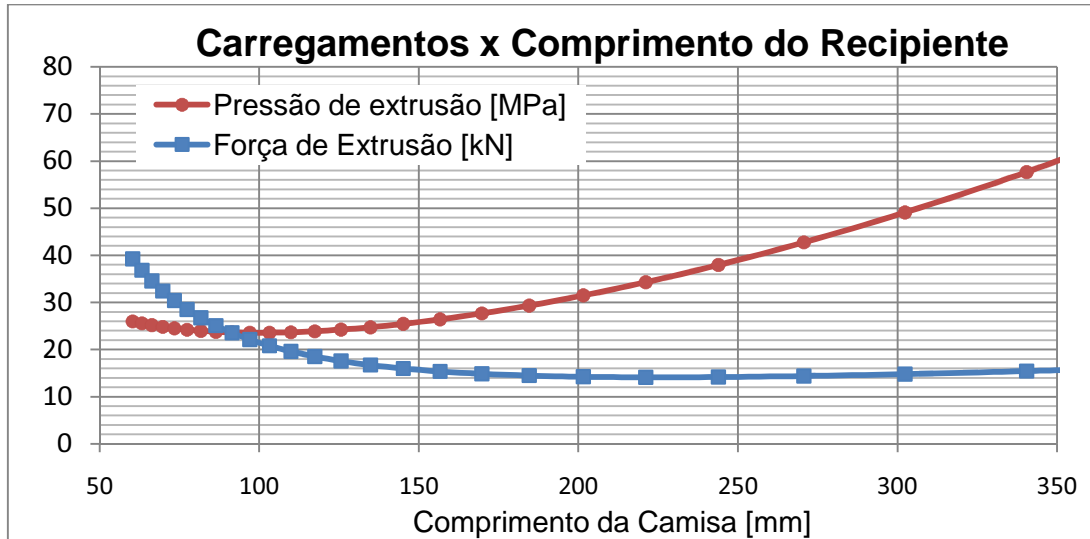


Figura 4.11 – Variação da pressão de extrusão e da força no êmbolo em função do comprimento do recipiente.

Em vista da relação observada na Figura 4.11 e das análises descritas chega-se às seguintes dimensões  $D_A= 30$  mm,  $d_A= 10$  mm e  $L_A= 145$  mm, sendo eles os valores adequados para o recipiente, com os quais se obtêm  $F_e= 15,98$  kN de força no êmbolo, próxima da mínima possível, sem aumentar muito a pressão de extrusão que resulta em  $p_e= 25,45$  MPa.

Para determinar a espessura do recipiente e do centralizador utiliza-se a Equação (4.6, que serve para obter a tensão tangencial máxima,  $\sigma_m$ , e validar o modelo em elementos finitos elaborado para analisar com mais detalhes o comportamento mecânico. Uma comparação entre os dois métodos demonstra que a divergência é mínima, visto que para uma espessura de 7,5 mm a equação resulta em 66,17 MPa assim como o modelo numérico, conforme visto em algumas regiões na Figura 4.12.

$$\sigma_t = \frac{r_i^2 p_t}{r_e^2 - r_i^2} \left( 1 + \frac{r_e^2}{r_i^2} \right) \quad (4.6)$$

onde  $r_i$  é raio interno da camisa,  $r_e$  é o raio externo da camisa.

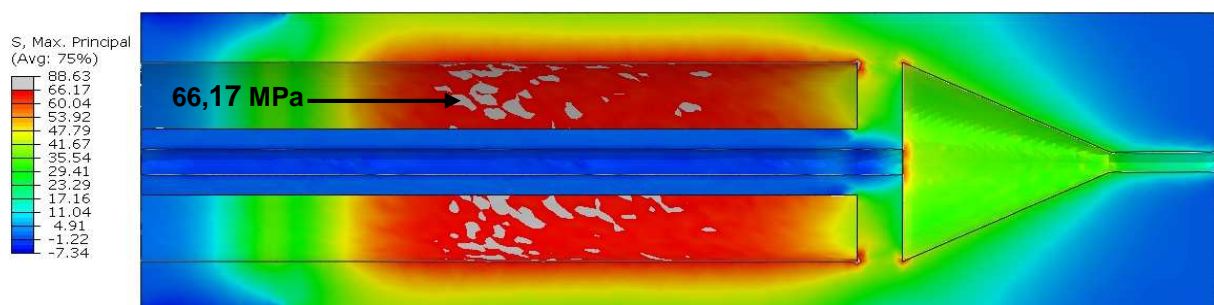


Figura 4.12 – Tensão máxima no recipiente [MPa].

Atento a possibilidade de abaulamento da camisa com conseqüente aumento da folga entre ela e o êmbolo, da mesma forma que foi realizada a análise das tensões em elementos finitos, foi efetuada a análise das deformações e percebeu-se que com a espessura de 7,5 mm o deslocamento máximo seria de  $5 \times 10^3$  mm no interior da camisa. De posse desses resultados, considerando um coeficiente de segurança igual a 3 determina-se que será utilizado o aço SAE 1020 para fabricar o recipiente. Esse aço tem baixo custo e o seu limite de escoamento é de 210 MPa.

#### 4.4.2. Torque no Volante

A partir da força de 15,98 kN requerida para movimentar o êmbolo é possível utilizar a Equação (4.7) para calcular o torque total,  $T_T = 71,71$  Nm, requerido no volante A. No torque total estão incluídos os efeitos de atrito no fuso de rosca trapezoidal com diâmetro 20 mm e passo 2 mm e na bucha de nylon, nos quais o coeficiente de atrito é 0,25 para o primeiro e 0,1 para o segundo, sem considerar qualquer lubrificação.

$$T_T = \frac{F_t d_m}{2} \left( \frac{l + \pi f d_m \sec \alpha}{\pi d_m - f l \sec \alpha} \right) + \frac{F_t f d_c}{2} \quad (4.7)$$

onde  $T_P$  é torque devido ao atrito no fuso, em Nm,  $T_B$  é o torque devido ao atrito na bucha de nylon, em Nm,  $d_m$  é o diâmetro médio da rosca trapezoidal, em m,  $d_c$  é o diâmetro médio de contato da bucha, em m,  $f$  é o coeficiente de atrito,  $\alpha$  é o ângulo de avanço da rosca,  $l = np$ , onde  $n$  é o número de fios de rosca e  $p$  é passo da rosca.

Tendo  $T_T = 71,71$  Nm e selecionando um volante com diâmetro de 500 mm, o esforço necessário para girar o volante será de 28,86 kg.

#### 4.4.3. Seleção da Engrenagem

O mecanismo de engrenagens é utilizado para sincronizar a velocidade de avanço do êmbolo com a da alma, sendo assim, no máximo elas serão submetidas aos esforços advindos da força necessária para mover a alma. Considerando que esse esforço atinja o limite de 10 kg, o torque máximo na engrenagem B, que é a mais solicitada, será de 1,61 Nm. A partir desse torque,  $T$ , da Equação (4.8) e considerando o coeficiente de segurança,  $N_b$ , igual a 3 é possível determinar que a espessura,  $b$ , das engrenagens que será de 6,35 mm ou 1/4 de polegada, dimensão padrão logo acima do resultado obtido da equação 4.12, 5,85 mm.

$$b = \frac{2T}{m^2 Z_p} \frac{N_b K_v K_o K_i K_t K_r}{JK_L \left( \frac{77,3 H_B + 12800}{145} \right)} \quad (4.8)$$

onde  $m$  é o módulo da engrenagem, que para as engrenagens dessa máquina será 1,  $Z_p$  é o número de dentes da engrenagem,  $K_v$  é o fator dinâmico, que resulta 1,048 através do cálculo da Equação (4.9).

$$K_v = \left( \frac{50 + 60(1 - B) + \sqrt{\frac{200 d_p n_r}{60}}}{50 + 60(1 - B)} \right)^B \quad (4.9)$$

onde  $B = 0,25(12 - Q_v)^{\frac{2}{3}}$ ,  $Q_v$  é o índice de qualidade das engrenagens, nesse caso igual 5,  $d_p$  é o diâmetro primitivo da engrenagem, em m,  $n_r$  é o número de rotações por minuto, estimado em 20 para essa engrenagem,  $K_o$  é o fator de sobrecarga, igual a 1,25 considerando a operação manual e a possibilidade de ocorrer algum choque moderado,  $K_i$  é o fator de ciclo, igual a 1 por se tratar de uma engrenagem não vazia,  $K_t$  é o fator de temperatura, igual a 1 por

trabalhar abaixo de 121°C,  $K_r$  é o fator de confiabilidade, igual a 1 por possuir 99% de confiabilidade,  $H_B$  é a dureza do aço selecionado, no caso igual a 160 HB por se tratar de um aço ASTM de boa qualidade endurecido completamente,  $K_L$  é o fator de vida, igual a 1,10, considerando uma vida de 1 milhão de ciclos e a engrenagem com dureza de 160 HB, e  $J$  que é o fator geométrico de resistência a flexão, igual 0,425 para a transmissão entre as engrenagens de 40 e 138 dentes.

#### 4.4.4. Dimensionamento do Eixo Secundário

Tendo que o torque máximo no eixo,  $T$ , será de 1,61 Nm quando uma força de 10 kg for requerida para mover o arame, é possível calcular a tensão máxima no eixo secundário através da Equação(4.10). Visto que as menores dimensões para tubos treilados com limite de escoamento 210 MPa encontrados no comércio possuem diâmetro externo 3/8 polegadas e espessura 2,31 mm, a tensão resultante é menor que 10 MPa, bastante baixa. Apesar de a tensão resultante ser baixa, ainda será utilizado esse tubo, que por ser comercial tem baixo custo, caso contrário, teríamos que usar um tarugo que aumentaria o peso da estrutura e não seria significativamente econômico.

$$\tau_{\max} = \frac{32Tr}{\pi(d_o^4 - d_i^4)} \quad (4.10)$$

#### 4.4.5. Dimensionamento do Eixo do Êmbolo

O dimensionamento do êmbolo será feito tomando-se por base a Norma Técnica da ABNT NB14. Neste dimensionamento, os cálculos serão efetuados com o objetivo de evitar o fenômeno de flambagem do êmbolo e a utilização do aço SAE 1020 para fabricação.

Adotando um diâmetro resistente de 17,50 mm para o eixo do êmbolo e um comprimento total,  $L_e$ , de 210 mm tem-se para o índice de esbeltez,  $\lambda=(0,6L_e/i)=28,8$ , onde  $i$  é o raio de giração, considerado 25% do diâmetro resistente. Pela norma, como  $\lambda<100$ , utiliza-se a relação de Johnson, Equação (4.11), para o cálculo da tensão máxima axial,  $\sigma_f$ , que pode ser aplicada sem que ocorra flambagem:

$$\sigma_f = \left( \sigma_e - \frac{\sigma_e^2}{4\pi^2 E} \lambda \right) \quad (4.11)$$

onde  $E$  é o módulo de elasticidade do aço, igual a  $2,07 \times 10^5$  MPa, e  $\sigma_e$  é a tensão de escoamento do material.

Da equação (4.11) resulta que 209 MPa é a máxima tensão que poderá ser suportada pelo eixo do êmbolo sem que falhe por flambagem. Calculando a tensão de compressão resultante da força no êmbolo encontra-se 137, ou seja, o eixo pode ser considerado seguro.

## 5. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

O planejamento inicial do presente trabalho previa realizar durante o período de 4 meses o projeto informacional, o conceitual, o executivo, a otimização e por final a fabricação da máquina extrusora. No entanto, com o andamento do projeto houve a necessidade de ajustar o planejamento, foi incluído um tempo maior para estudar sobre o material que seria extrudado e removida a etapa de fabricação, conseqüentemente deixando-a para depois da entrega deste trabalho.

Ao pesquisar dados sobre as propriedades mecânicas da massa verde, os resultados obtidos na internet e em diversas bibliografias não foram satisfatórios, as informações eram bastante superficiais e não se encaixavam perfeitamente ao problema. No início, a ideia de encontrar um material semelhante ao das composições do revestimento em alguma bibliografia e copiar suas propriedades parecia interessante, porém ao estudar com detalhes o processo de extrusão percebeu-se que ela não era viável. Durante o preparo das composições utilizadas como revestimento, além da diferença entre as porcentagens de minério eram inseridas diferentes quantidades de aglutinante e água em cada mistura, isso dificulta a equivalência de



propriedades com outros materiais, para o projeto era necessário conhecer as propriedades mecânicas do material sob as condições do processo de extrusão.

Como não era possível solucionar essa dificuldade com ensaios típicos de tração ou compressão, foram estudados diversos métodos de cálculo e através das informações obtidas observando os processos de extrusão de eletrodo revestido realizados no LS&TC foi possível encontrar a propriedade mecânica adequada. Em suma, seria interessante ter fabricado a máquina a tempo de apresentar esse trabalho, porém depois de aprofundar os estudos sobre a massa verde é possível dizer que a mudança no cronograma valeu apenas e permitiu projetar a máquina extrusora com maior segurança.

## 6. CONCLUSÃO

- O projeto atende aos atributos requisitados em seu início e pode ser operada manualmente.

- O número reduzido de peças e a seleção de materiais comerciais garantem ao equipamento um baixo custo de fabricação. Seu peso de 22 kg e seu tamanho permitem que ela seja transportada facilmente.

- O mecanismo de engrenagem soluciona o problema da falta de sincronia entre as velocidades de avanço do êmbolo e da alma.

- A máquina possui uma geometria simples e de fácil acesso, sua operação não exige nenhum treinamento complexo e a limpeza e manutenção podem ser realizadas com facilidade.

Em linhas gerais, o estudo permitiu um maior entendimento sobre o processo de fabricação de eletrodos revestidos, bem como sobre os detalhes que envolvem o projeto de uma máquina de extrusão. Como sugestão para trabalhos futuros existe a possibilidade de realizar algumas otimizações no projeto atual com vistas a preparar o equipamento para extrudar eletrodos de dupla camada de revestimento.

## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALTAN, Taylan, **“Conformação de Metais: Fundamentos e Aplicações”**, São Carlos, SP: EESC-USP, 1999.

AVITZUR, B.; **“Hydrostatic Extrusion”**, J. of Eng. For Ind., Trans. Of ASME, nov. 1965.

BUTTON, Sérgio Tonini, **“Desenvolvimento de uma máquina de laboratório para a extrusão hidrostática de metais não ferrosos”**, Dissertação de Mestrado, Unicamp, Campinas, 1985.

DIETER, George E., **“Metalurgia Mecânica”**, Rio de Janeiro, Ed. Guanabara Dois, 2ª edição, 1981.

FORTES, Cleber. **“Eletrodos Revestidos OK”**, <http://www.esab.com.br>. Acessado em 12/04/2011.

FOX, R.; MCDONALD, A.; PRITCHARD, P.; **“Introdução à Mecânica dos Fluidos”**; tradução de Ricardo Nicolau Nassar Koury, Geraldo Augusto Campolina França; Rio de Janeiro, 6ª edição, 2006.

MACHADO, Ivan Guerra, **“Soldagem & Técnicas Conexas: Processos”**, Porto Alegre, Editado pelo Autor, 1996

NB-14 – Norma Técnica ABNT – **“Cálculo e Execução de Estrutura de Aço”**.

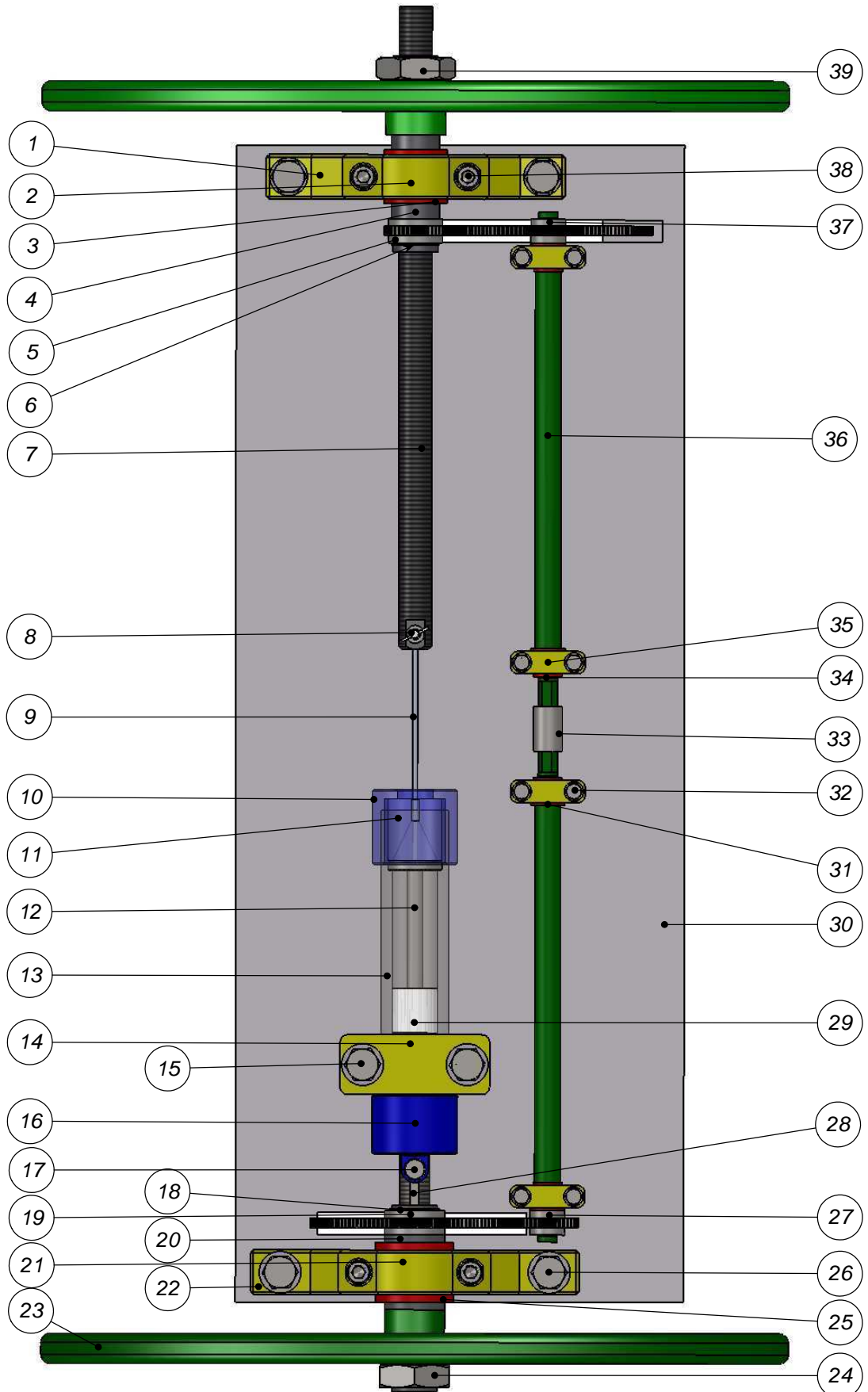
NERY, Fernando Antonio da Costa, **“Desenvolvimento de uma máquina extrusora de laboratório para fios de metais não ferrosos”**, Dissertação de Mestrado, Unicamp, Campinas, 1980.

PROVENZA, Francesco, **“PROTEC - Prontuário de Projetista de Máquinas”**, São Paulo. Escola PROTEC, 4ª Ed., 1978.

SHIGLEY, J.E; Mishke, C.R.; **“Projeto de Engenharia Mecânica”**, Bookman, 7ª edição, 2005.

MORAIS, Willy Ank, **“Conformação Plástica dos Metais”**, Apostila UNISANTA, 2003.

## 8. APÊNDICE A



### TOLERÂNCIAS NÃO INDICADAS

DIMENSÃO DE / A	MÉDIA
0,5 / 6	±0,1
6 / 30	±0,2
30 / 120	±0,3
120 / 315	±0,5
315 / 1000	±0,8
1000 / 2000	±1,2
2000 / 4000	± 2
4000 / 8000	± 3
8000 / 12000	± 4
12000 / 16000	± 5
16000 / 20000	± 6

TOLERÂNCIAS NÃO ESPECIFICADAS  
CONFORME DIN 7168 GRAU MÉDIO

DESCRIÇÃO: Máquina para extrusão  
de Eletrodo Revestido



ESCALA: 1:20

Peso (Kg)  
**22**

FL: 16

Desenhista:  
Diogo Bettoni  
Visto:  
Diogo Bettoni  
Aprovado:


**Nº**

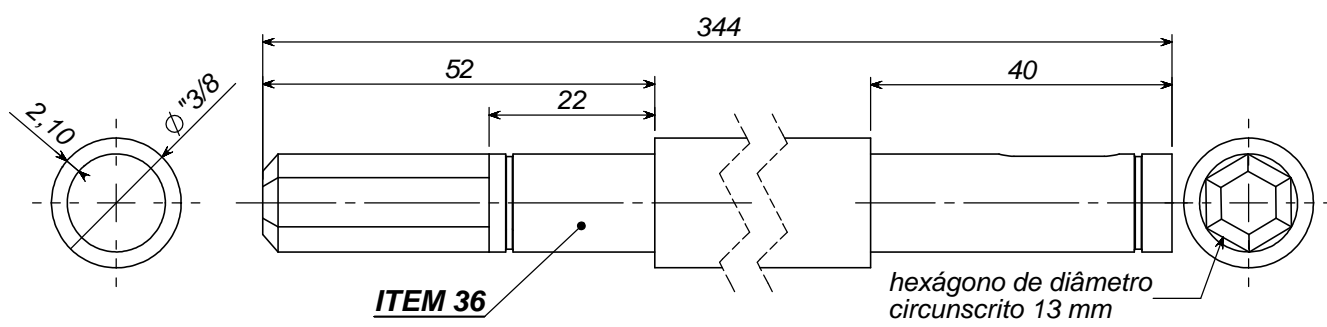
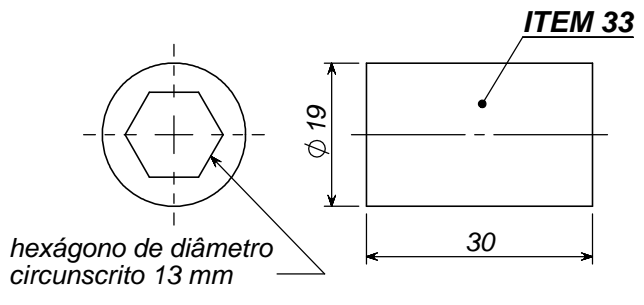
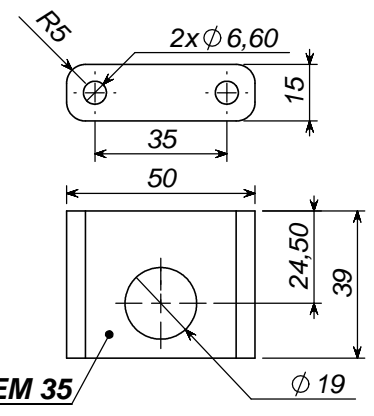
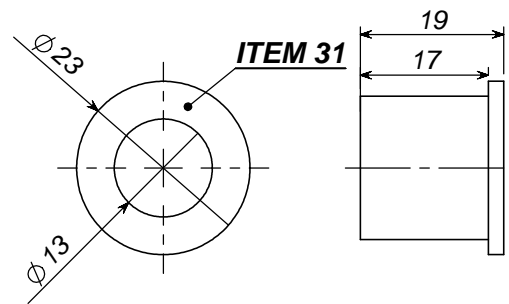
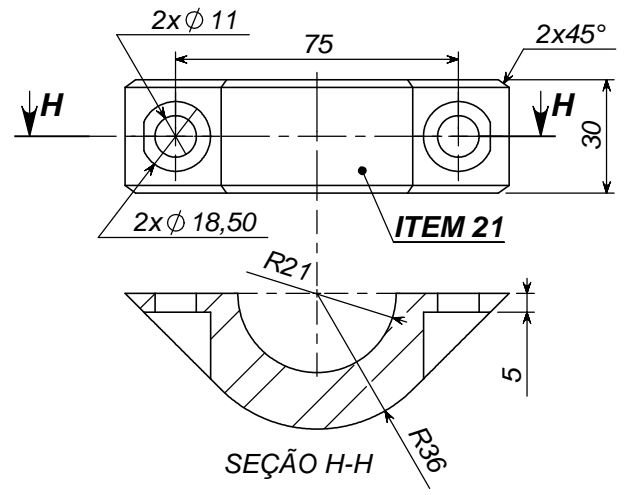
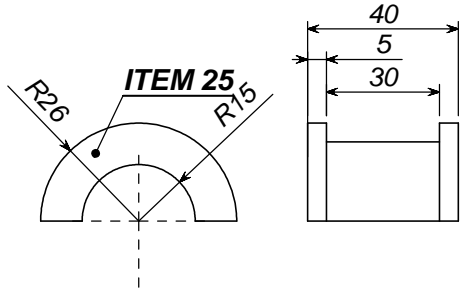
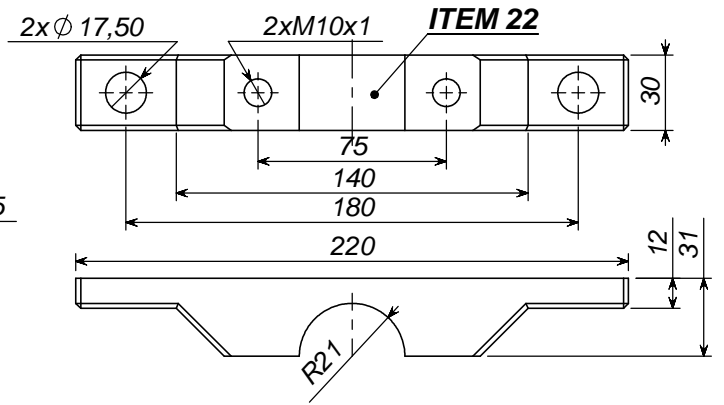
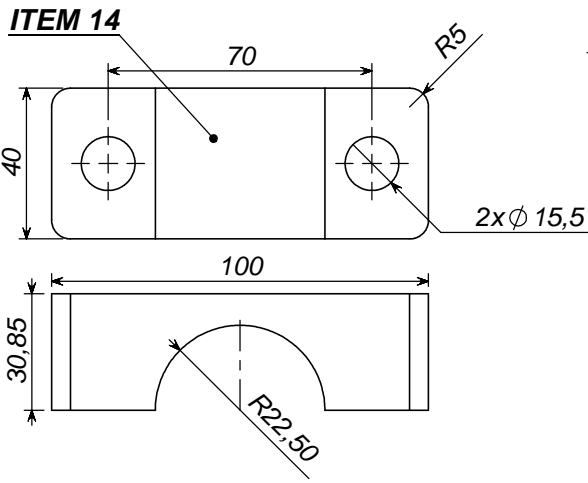
A4

Data:  
02/06/2011  
Data:  
02/06/2011  
Data:

REV.

39	Porca M22x4	Comercial	1	—
38	Parafuso M10x1,5x20	Comercial	4	—
37	Engrenagem D	Aço SAE 1020	1	0,76
36	Eixo secundário	Aço SAE 1020	2	0,32
35	Mancal D	Aço SAE 1020	4	0,17
34	Anel Elástico C de diâmetro interno 11,2	Comercial	4	—
33	Acoplamento	Aço SAE 1020	1	0,042
32	Parafuso M6x1x60	Comercial	8	—
	Porca M6x1	Comercial	8	—
	Arruela	Comercial	16	—
31	Bucha C	Nylon 6.6	4	0,024
30	Mesa	Alumínio 5052	1	6
29	Embolo	Teflon	1	0,02
28	Fuso B	Aço SAE 1020	1	0,4
27	Engrenagem C	Aço SAE 1020	1	0,08
26	Parafuso M14x2x60	Comercial	2	—
	Porca M14x2	Comercial	2	—
	Arruela	Comercial	4	—
25	Bucha B "metade"	Nylon 6.6	2	0,05
24	Porca M30x3,5	Comercial	1	0,15
23	Volante	Alumínio 5052	2	1,6
22	Mancal C inferior	Aço SAE 1020	1	0,93
21	Mancal C superior	Aço SAE 1020	1	0,335
20	Peça 2	Aço SAE 1020	1	0,49
19	Engrenagem B	Aço SAE 1020	1	0,76
18	Anel Elástico B de diâmetro interno 28,2	Comercial	1	—
17	Parafuso M8x1,25x30	Comercial	1	—
	Porca M8x1,25	Comercial	2	—
	Tampa B	Aço SAE 1020	1	0,43
15	Parafuso M14x2x100	Comercial	2	—
	Porca M14x2	Comercial	2	—
	Arruela M14	Comercial	4	—
14	Mancal B "metade"	Aço SAE 1020	2	0,64
13	Camisa	Aço SAE 1020	1	1,47
12	Centralizador	Aço SAE 1020	1	0,086
11	Matriz	Aço SAE 1020	1	0,23
10	Tampa A	Aço SAE 1020	1	0,53
9	Alma	0	0	0
8	Parafuso borboleta M4x0,5x12	Comercial	1	—
	Arruela M4	Comercial	1	—
7	Fuso A	Aço SAE 1020	1	1,19
6	Anel Elástico A de diâmetro interno 26,4	Comercial	1	—
5	Engrenagem A	Aço SAE 1020	1	0,05
4	Peça 1	Aço SAE 1020	1	0,48
3	Bucha A "metade"	Nylon 6.6	2	0,015
2	Mancal A superior	Aço SAE 1020	1	0,305
1	Mancal A inferior	Aço SAE 1020	1	0,92

Número	Descrição	Material	Quantidade	Peso (kg)																								
<p><b>TOLERÂNCIAS NÃO INDICADAS</b></p> <table border="1"> <tr> <th>DIMENSÃO DE / A</th> <th>MÉDIA</th> </tr> <tr><td>0,5 / 6</td><td>±0,1</td></tr> <tr><td>6 / 30</td><td>±0,2</td></tr> <tr><td>30 / 120</td><td>±0,3</td></tr> <tr><td>120 / 315</td><td>±0,5</td></tr> <tr><td>315 / 1000</td><td>±0,8</td></tr> <tr><td>1000 / 2000</td><td>±1,2</td></tr> <tr><td>2000 / 4000</td><td>±2</td></tr> <tr><td>4000 / 8000</td><td>±3</td></tr> <tr><td>8000 / 12000</td><td>±4</td></tr> <tr><td>12000 / 16000</td><td>±5</td></tr> <tr><td>16000 / 20000</td><td>±6</td></tr> </table>					DIMENSÃO DE / A	MÉDIA	0,5 / 6	±0,1	6 / 30	±0,2	30 / 120	±0,3	120 / 315	±0,5	315 / 1000	±0,8	1000 / 2000	±1,2	2000 / 4000	±2	4000 / 8000	±3	8000 / 12000	±4	12000 / 16000	±5	16000 / 20000	±6
DIMENSÃO DE / A	MÉDIA																											
0,5 / 6	±0,1																											
6 / 30	±0,2																											
30 / 120	±0,3																											
120 / 315	±0,5																											
315 / 1000	±0,8																											
1000 / 2000	±1,2																											
2000 / 4000	±2																											
4000 / 8000	±3																											
8000 / 12000	±4																											
12000 / 16000	±5																											
16000 / 20000	±6																											
<p>DESCRIPÇÃO: Lista de Peças</p>		<p>FL: 17</p>		<p>A4</p>																								
 <p><b>UFRGS</b> UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL</p>		<p>Desenhista: Diogo Bettoni</p>		<p>Data: 02/06/2011</p>																								
		<p>Visto: Diogo Bettoni</p>		<p>Data: 02/06/2011</p>																								
		<p>Aprovado:</p>		<p>Data:</p>																								
<p>Peso (Kg)</p>		<p>Nº</p>		<p>REV.</p>																								

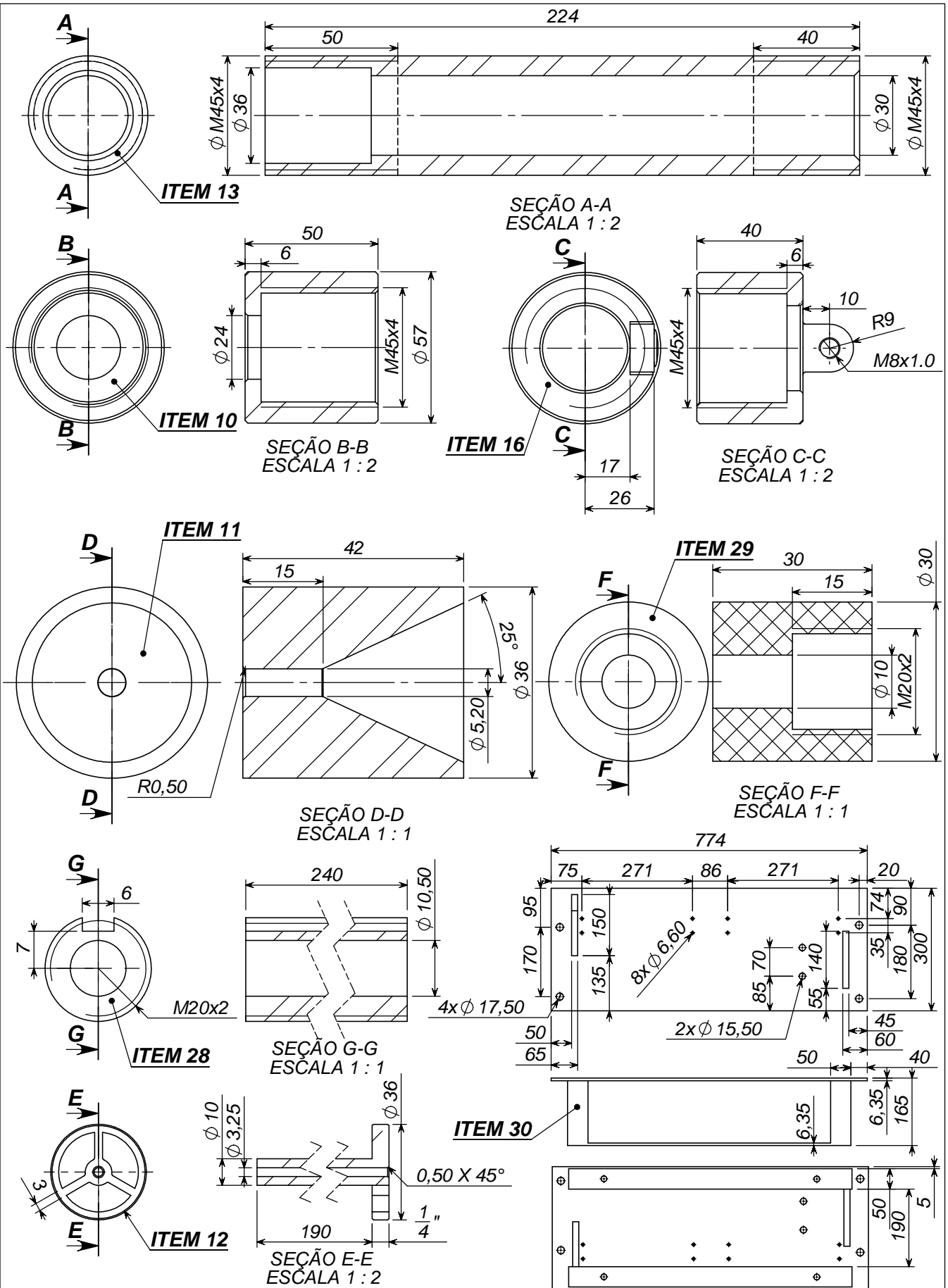


TOLERÂNCIAS NÃO INDICADAS	
DIMENSÃO DE / A	MÉDIA
0,5 / 6	±0,1
6 / 30	±0,2
30 / 120	±0,3
120 / 315	±0,5
315 / 1000	±0,8
1000 / 2000	±1,2
2000 / 4000	±2
4000 / 8000	±3
8000 / 12000	±4
12000 / 16000	±5
16000 / 20000	±6

TOLERÂNCIAS NÃO ESPECIFICADAS CONFORME DIN 7168 GRAU MÉDIO


DESCRIÇÃO:	
Peças para fabricação	
	ESCALA
	Peso (Kg)

FL: 18		A4	
Desenhista: Diogo Bettoni		Data: 02/06/2011	
Visto: Diogo Bettoni		Data: 02/06/2011	
Aprovado:		Data:	
<b>Nº</b>		REV.	

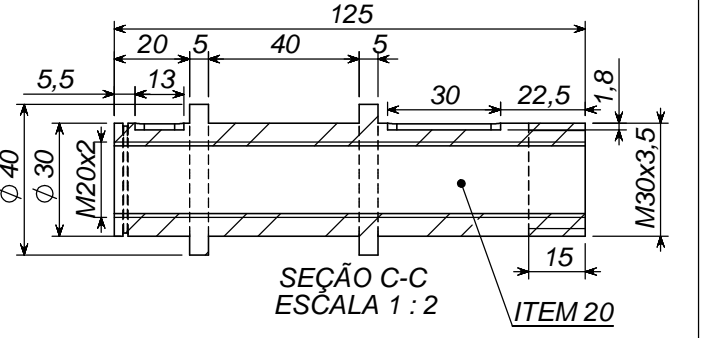
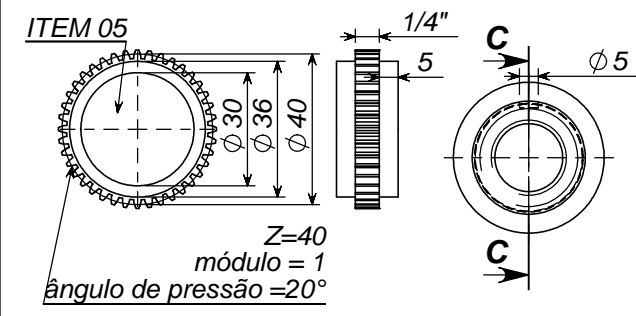
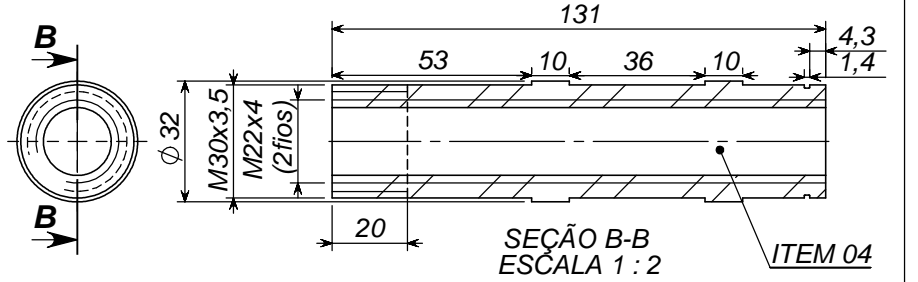
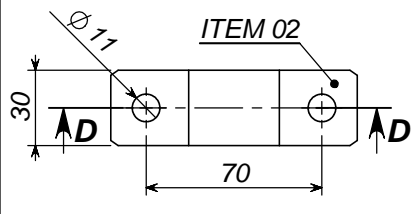
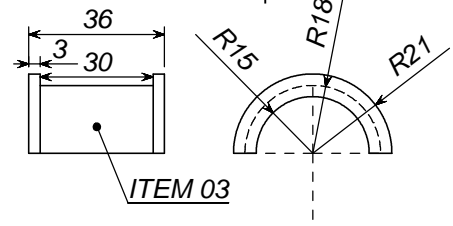
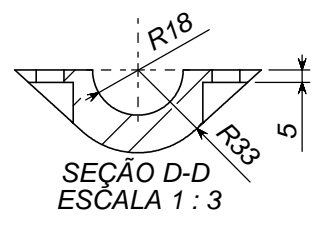
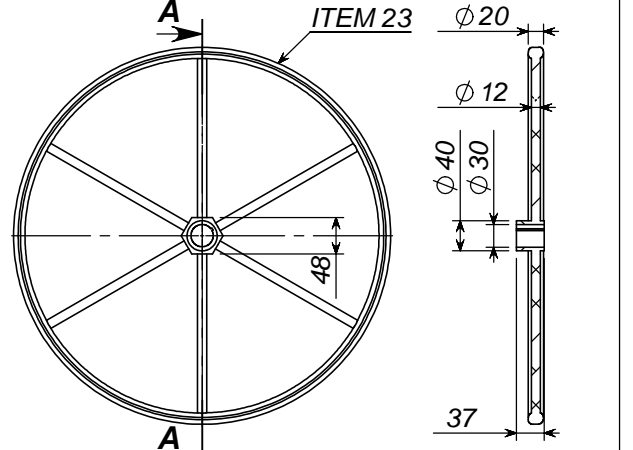
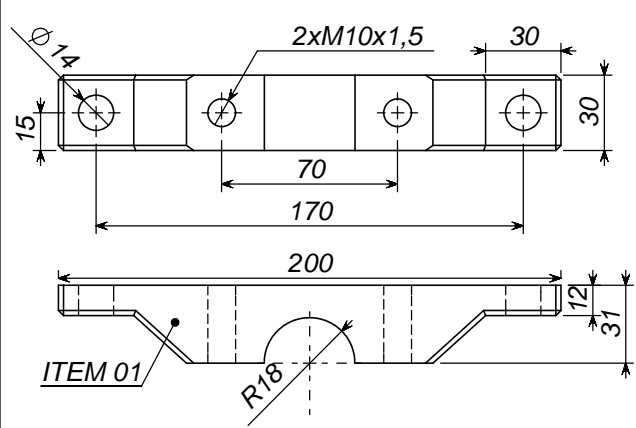
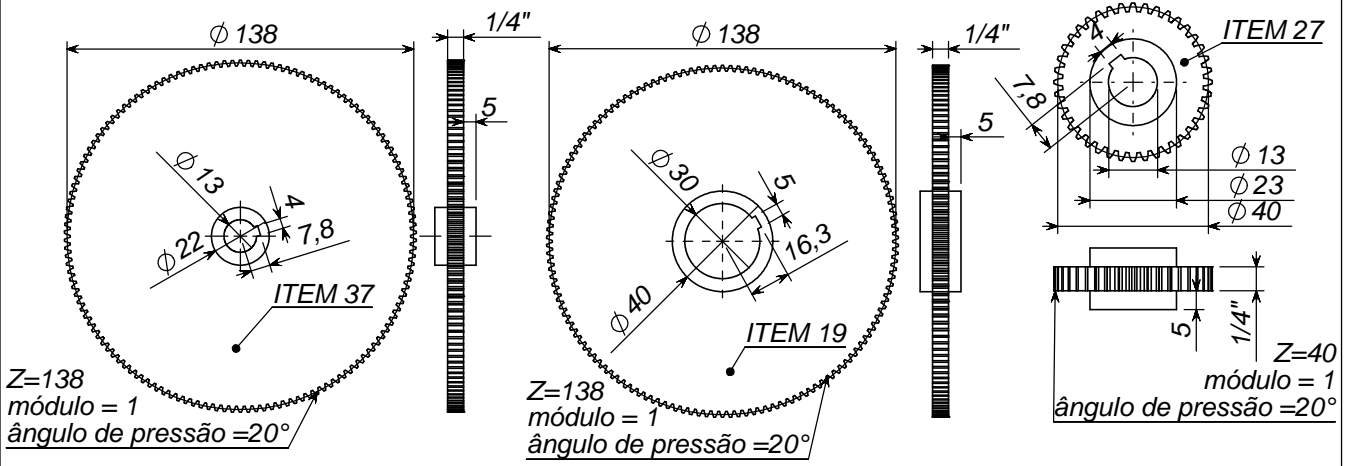


TOLERÂNCIAS NÃO INDICADAS	
DIMENSÃO DE / A	MÉDIA
0,5 / 6	±0,1
6 / 30	±0,2
30 / 120	±0,3
120 / 315	±0,5
315 / 1000	±0,8
1000 / 2000	±1,2
2000 / 4000	±2
4000 / 8000	±3
8000 / 12000	±4
12000 / 16000	±5
16000 / 20000	±6

TOLERÂNCIAS NÃO ESPECIFICADAS  
CONFORME DIN 7168 GRAU MÉDIO

DESCRIÇÃO: Peças em 2D.	
	ESCALA
Peso (Kg)	Nº

FL: 19	A4
Desenhista: Diogo Bettoni	Data:
Visto: Diogo Bettoni	Data: 02/06/2011
Aprovado:	Data: 02/06/2011
REV.	



TOLERANCIAS NÃO INDICADAS	
DIMENSÃO DE / A	MÉDIA
0,5 / 6	$\pm 0,1$
6 / 30	$\pm 0,2$
30 / 120	$\pm 0,3$
120 / 315	$\pm 0,5$
315 / 1000	$\pm 0,8$
1000 / 2000	$\pm 1,2$
2000 / 4000	$\pm 2$
4000 / 8000	$\pm 3$
8000 / 12000	$\pm 4$
12000 / 16000	$\pm 5$
16000 / 20000	$\pm 6$

TOLERANCIAS NÃO ESPECIFICADAS  
CONFORME DIN 7168 GRAU MÉDIO

DESCRIÇÃO:	
Peças para a fabricação.	
ESCALA	
Peso (Kg)	

FL: 20		A4	
Desenhista:	Diogo Bettoni	Data:	02/06/2011
Visto:	Diogo Bettoni	Data:	02/06/2011
Aprovado:		Data:	
Nº		REV.	

