

DESENVOLVIMENTO DE UMA MÁQUINA EXTRUSORA DE  
LABORATÓRIO PARA FIOS DE METAIS NÃO-FERROSOS

37/80

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
FACULDADE DE ENGENHARIA DE CAMPINAS  
SETOR DE FABRICAÇÃO

DESENVOLVIMENTO DE UMA MÁQUINA EXTRUSORA DE LABORATÓRIO  
PARA FIOS DE METAIS NÃO-FERROSOS

*Fernando Antonio da Costa Nery*

Trabalho apresentado à Comissão de Pós-Graduação da Faculdade de Engenharia de Campinas, como parte dos requisitos para a obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA.

- 1980 -

UNICAMP  
BIBLIOTECA CENTRAL

## A G R A D E C I M E N T O S

O autor agradece inicialmente aos colegas CECÍLIA A. DE CARVALHO ZAVAGLIA, NORTON DE ALMEIDA e IVAN BALDUCCI, pelo acompanhamento e incentivo durante o desenvolvimento do trabalho, aos engenheiros NOSMAR RUELLA JUNIOR e MIGUEL EXPOSITO, pela realização da fase inicial do projeto da máquina, ANTONIO ROBERTO DONADON, pelos serviços fotográficos, MARCOS ANTONIO PADULA e LUIZA MARIA PETROCELLI, pela confecção dos desenhos, MARIA ALAÍDE GOMES CABRAL pelos trabalhos de datilografia, CARLOS ALBERTO SANTAROSA, ANTONIO LAERTE STRUZZIATO, GILBERTO DOURADO e ELIAS COSTA NETO, pela colaboração na fabricação e montagem do equipamento. Agradece ainda o apôio recebido da TELEBRÁS (Telecomunicações Brasileiras S.A.) e do CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico).

Fundamental foi a colaboração do Prof. Dr. ETTORE BRESCIANI FILHO, pela orientação, dedicação e incentivo demonstrados durante o transcorrer desse trabalho, que tornou possível a sua realização.

Aos meus pais MARIO e RAPHAELLA  
LAURIA, e a minha esposa GISLAINE.

## RESUMO

O presente trabalho, que é parte das pesquisas que estão sendo realizadas no Projeto UNICAMP-TELEBRÁS/MGE, tem como principais objetivos o projeto e construção de uma máquina extrusora de laboratório destinada a obtenção de fios de metais não-ferrosos. É efetuada uma descrição do processo de extrusão de fios e uma análise teórica do método de determinação da força de extrusão. Descreve-se os critérios de projeto e construção da máquina extrusora de laboratório e, a partir de experiências preliminares efetuadas com o chumbo e o alumínio comercialmente puros, são analisados os problemas práticos de funcionamento da máquina construída, apresentando-se soluções para eliminá-los. É feita também uma comparação entre forças de extrusão determinadas experimentalmente e as calculadas segundo o modelo físico-matemático adotado.

## ABSTRACT

The present work as a main objective the design and construction of a laboratory extrusion machine whose purpose is to produce wires from non-ferrous metals ingots. This is part of a research line which is being developed in the Electronic Grade Material Project at UNICAMP, sponsored by the Brazilian Telecommunications Company (TELEBRÁS). A description of the wire extrusion process is made as well as a theoretical analysis of a method of determination of the extrusion force. After design criteria were established, and the equipment constructed some experiences were made with aluminium and lead which permitted to analyse operational problems and consequently solutions are proposed. Finally a comparison is made between measured experimental extrusion forces and production furnished by an adapted mathematical model.

## ÍNDICE

	<u>PÁGINA</u>
CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO .....	1
1.1. Objetivos do Trabalho .....	1
1.2. Justificativas do Trabalho .....	1
1.3. Referências Bibliográficas .....	6
CAPÍTULO 2 - ANÁLISE MECÂNICA DO PROCESSO DE EXTRUSÃO DE FIOS .....	7
2.1. Princípios do Processo .....	7
2.2. Método de Análise das Tensões de Extrusão ...	10
2.3. Referências Bibliográficas .....	30
CAPÍTULO 3 - MÁQUINA EXTRUSORA DE LABORATÓRIO .....	33
3.1. Descrição da Máquina .....	33
3.2. Projeto da Máquina .....	36
i - Critérios de Projeto .....	36
ii - Cálculo da Força de Extrusão .....	37
iii - Dimensionamento das Ferramentas de Extrusão .....	40
iv - Dimensionamento dos Componentes Estru <u>turais</u> .....	45
v - Especificação de Sistemas .....	69
3.3. Fabricação e Montagem .....	81
3.4. Referências Bibliográficas .....	95

	<u>PÁGINA</u>
CAPÍTULO 4 - ANÁLISE DE FUNCIONAMENTO DA MÁQUINA .....	97
4.1. Desenvolvimento Experimental .....	97
4.2. Problemas Apresentados e Soluções Propostas	103
4.3. Análise das Forças de Extrusão .....	106
CAPÍTULO 5 - CONCLUSÕES .....	110
APÊNDICE - CUSTO ESTIMADO DA MÁQUINA .....	112
BIBLIOGRAFIA .....	113
SIMBOLOGIA .....	119
ÍNDICE DE FIGURAS E TABELAS .....	122

## CAPÍTULO 1

### INTRODUÇÃO

#### 1.1. Objetivos do Trabalho

Os principais objetivos do trabalho são:

(1) Projetar e construir uma máquina extrusora de laboratório destinada a obtenção de fios de metais não-ferrosos (especificamente de ouro e liga de alumínio - silício com 1% de silício) de grau eletrônico;

(2) Analisar os problemas práticos de funcionamento da máquina construída, através da extrusão do chumbo e alumínio comercialmente puros, assim como comparar os valores das forças de extrusão, obtidas experimentalmente, com os previstos teoricamente.

#### 1.2. Justificativas do Trabalho

O presente trabalho é parte das pesquisas que estão sendo realizadas no projeto UNICAMP-TELEBRÁS/MGE com relação a formação de recursos humanos e desenvolvimento de tecnologia nacional na área de materiais de grau eletrônico.

Entende-se por materiais de grau eletrônico (MGE) todos os materiais utilizados, direta ou indiretamente, na fabricação de dispositivos eletrônicos<sup>(1)</sup>. O termo "Grau Eletrônico" traduz a característica fundamental dessa classe de materiais, ou seja, a sua elevada e controlada pureza quí-

mica se comparada à pureza exigida dos materiais industriais convencionais<sup>(2)</sup>.

O uso do processo de extrusão decorre da necessidade da utilização de um processo de transformação das barras de metais de grau eletrônico, obtidas através de um processo de purificação (por exemplo, por fusão zonal), em fios de diâmetros médios ou finos, para serem, posteriormente, trefi lados visando a obtenção de fios capilares, como indica a figura I.1. Esses fios são utilizados na indústria eletrônica como elementos de ligação em circuitos integrados e transisto res<sup>(3)</sup>.

O ouro é o metal mais utilizado para a fabricação de fios capilares devido a sua alta ductilidade, elevada condutibilidade elétrica e resistência a corrosão. É possível obter, pelo processo de trefilação, fios de ouro de até 10 micra<sup>(4)</sup>. O uso dos fios capilares de alumínio tem crescido muito ultimamente em virtude do menor custo do metal, além de outros fatores tais como a compatibilidade metalúrgica com o material do ponto de soldagem no dispositivo eletrônico. Contudo, devido a sua baixa resistência mecânica, normalmente é utilizado uma liga de alumínio - silício com 1% de silício<sup>(5)</sup>.

As composições químicas para esses dois metais são dados pelas Tabelas I.1 e I.2 respectivamente.

A máquina extrusora de laboratório foi desenvolvida não somente com o objetivo de produção de fios destinados a trefilação, como também com a finalidade de se ter um equipa mento de produção, com condições controladas, necessárias ao processamento de materiais especiais, como os materiais de

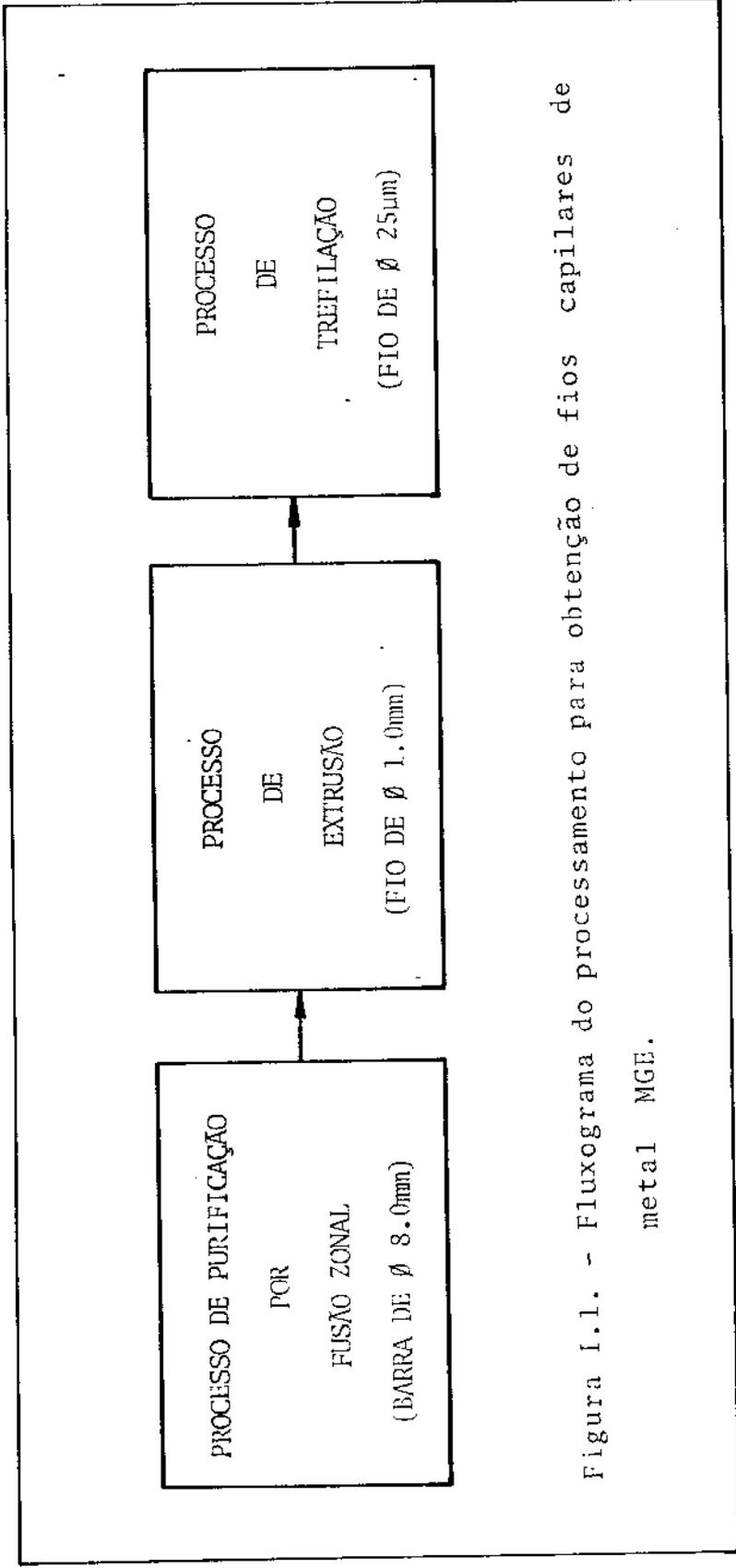


Figura I.1. - Fluxograma do processamento para obtenção de fios capilares de metal MGE.

Tabela .I.1- Composição Química dos Fios de Ouro <sup>(6)</sup>		
Composição (%)		
Elemento	Grau 99,99	Grau 99,995
Ouro, min	99,99	99,995
Prata, max	0,009	0,001
Cobre, max	0,005	0,001
Paládio, max	0,005	0,001
Ferro, max	0,002	0,001
Chumbo, max	0,002	0,001
Silício, max	0,005	0,001
Magnésio, max	0,003	0,001
Arsênio, max	0,003	...
Bismuto, max	0,002	0,001
Estanho, max	0,001	0,001
Cromo, max	0,0003	0,0003
Níquel, max	0,0003	...

Tabela I.2.- Composição Química dos Fios de Liga Alumínio-Silício <sup>(7)</sup>	
Al	99,0% ± 0,15%
Si	1,0% ± 0,15%
Total de impurezas	< 0,005%

grau eletrônico. Entre as condições especiais pode-se destacar as representadas pela contaminação causada pelo lubrificante, ou pelos materiais constituintes das ferramentas de extrusão. Com as máquinas industriais, comumente encontradas, nem sempre isso seria possível pois são máquinas destinadas a elevadas produções e, além disso, são de elevado custo de aquisição.

As etapas que constituem o trabalho de desenvolvimento da máquina de extrudar de laboratório são as seguintes:

- 1º - projeto e construção da máquina;
- 2º - análise do desempenho de funcionamento da máquina, com vistas as modificações necessárias no projeto inicial;
- 3º - otimização das condições de trabalho na extrusão de metais de grau eletrônico (inicialmente estanho e alumínio e, posteriormente, liga de alumínio-silício e ouro) ; e
- 4º - entrada em regime normal no processamento de matéria prima para a trefilação de fios capilares de metais de grau eletrônico.

Os estudos que constituem a presente dissertação tratam das duas primeiras etapas acima referidas.

### 1.3. Referências Bibliográficas

- (1) CAMPOS Fº, M.P. - Dados e Idéias, 3(6): 24-32, Jun/Jul., 1978, in Ref. (2), p. 1.
- (2) MEI, P.R. - Desenvolvimento do Processo de Purificação por Fusão Zonal Horizontal para Metais de Baixo Ponto de Fusão e sua Aplicação ao Estanho, Tese de Mestrado, UNICAMP/DEM, Campinas, 1979, p. 1.
- (3) ZAVAGLIA, C.A.C. - Contribuição ao Estudo da Trefilação de Fios Capilares de Metais Não-Ferrosos, Tese de Mestrado, UNICAMP/DEM, Campinas, 1979, p. 1.
- (4) Idem ibidem Ref. (3), p. 5.
- (5) Idem ibidem Ref. (3), p. 9.
- (6) Standard Specification for Refined Gold - Norma Técnica da ASTM B 562-73, vol.8, 1975, Philadelphia, pp. 667-669, in Ref. (3), p. 33.
- (7) Catálogo da Tanaka Electronic Industry - Wire Drawing , Tokyo, pp. 5-6, in Ref. (3), p. 33.

## CAPÍTULO 2

### ANÁLISE MECÂNICA DO PROCESSO DE EXTRUSÃO DE FIOS

#### 2.1. Princípios do Processo<sup>(1,2)</sup>

A extrusão é um processo de conformação por deformação plástica no qual um tarugo metálico (de forma cilíndrica) é comprimido por um punção, em um recipiente, e escoá através de uma matriz, que apresenta um orifício com as dimensões da secção transversal do produto que se deseja obter. A passagem do tarugo pela matriz, com orifício de secção menor do que o do tarugo, provoca a deformação plástica. Portanto, o fio é obtido pela redução de diâmetro do tarugo com consequente aumento de comprimento. Esse comprimento é limitado pelo volume do tarugo inicial.

O processo de extrusão, quanto ao sentido de escoamento do material, pode ser classificado em processo de extrusão direta e inversa.

Na extrusão direta o material escoá no mesmo sentido em que avança o punção (figura II.1); já na extrusão inversa, o escoamento é em sentido contrário ao movimento do punção (figura II.2).

Como não há movimento relativo do tarugo com a parede interna do recipiente na extrusão inversa, são menores as forças de atrito e necessita-se menos potência do que para a

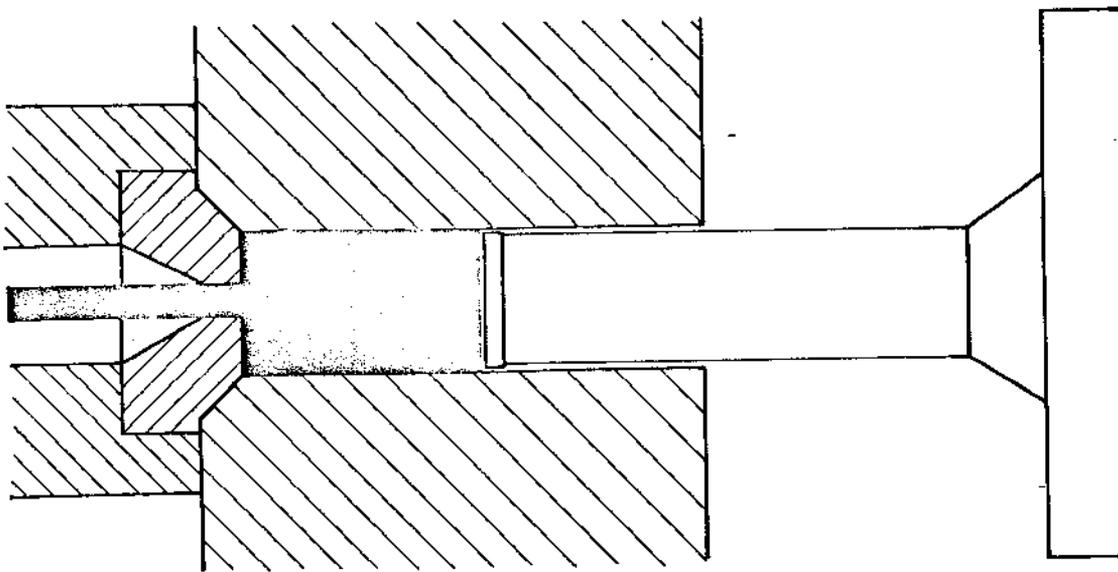


Figura II.1. - Representação esquemática da extrusão direta.

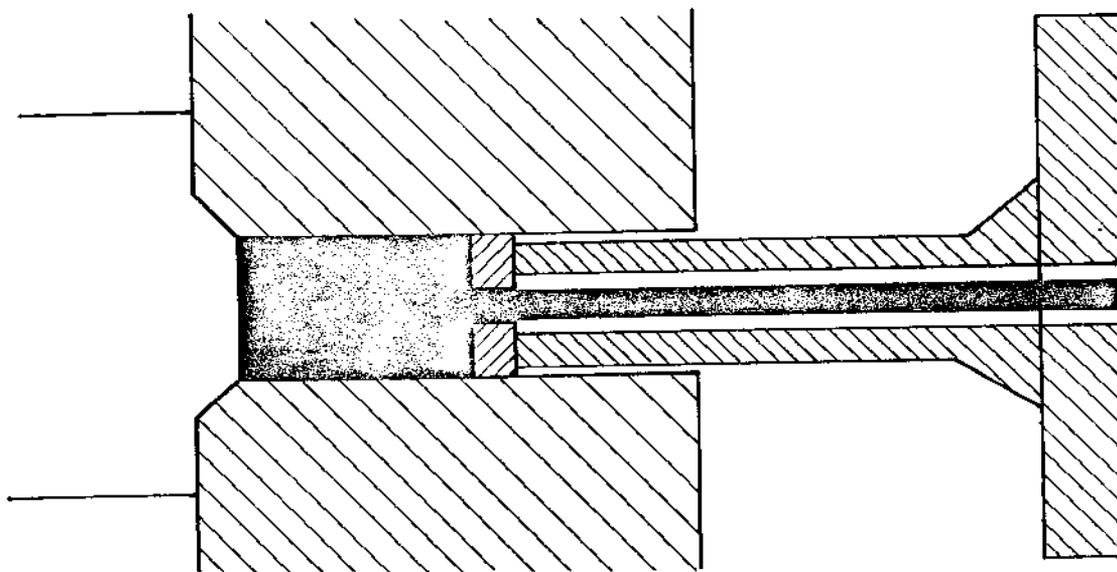


Figura II.2. - Representação esquemática da extrusão inversa.

extrusão direta.

A redução do atrito, quando do emprego da extrusão direta, consegue-se com o uso de lubrificantes resistentes às temperaturas elevadas.

Com o objetivo básico de diminuir a resistência à deformação, tornando o metal mais dútil, o processo é realizado a quente, ou seja, o processamento do tarugo é realizado sob condições tais (de tempo e temperatura) que, simultaneamente com a deformação, se produzem os fenômenos estruturais de recuperação e recristalização pelos quais o material metálico não se encrua, ou seja, não aumenta a resistência à conformação devido a deformação. Logo, a temperatura de trabalho é igual ou superior a temperatura de recristalização do metal.

Como a estrutura metálica do fio se encontra na condição recristalizada, é possível aplicar ao metal extrudado intensos trabalhos posteriores de deformação a frio (com temperatura de trabalho inferior a temperatura de recristalização do metal) adicionais, como no caso específico à obtenção de fios capilares pelo processo de trefilação.

É importante ressaltar que o fio poderia ser obtido também através do processo de laminação. Entretanto, a utilização do processo de extrusão, nesse caso, é mais recomendável ao invés do processo de laminação, apesar da limitação de comprimento do fio, pois a extrusão permite obter um produto mais homogêneo estrutural e dimensionalmente e menos atacado por oxidação superficial. A primeira vantagem resulta da manutenção da temperatura de trabalho em níveis mais constantes, e a segunda vantagem decorre do pequeno contato

do tarugo com o meio ambiente durante o processamento<sup>(3)</sup>. Contudo, a extrusão apresenta também desvantagens em relação à laminação, como custo maior na construção do equipamento, velocidade de trabalho menor e maior desuniformidade de deformação ao final do processo.

Diante dessas características o processo de extrusão pode ser classificado como um processo contínuo, quase - estacionário, primário, a quente, de compressão indireta e, no caso específico, destinado à fabricação de fios.

O processo se classifica como de compressão indireta pois o esforço originalmente aplicado é de compressão e o esforço resultante que provoca o escoamento é de compressão e em outra direção, ou seja, são as paredes internas da matriz que provocam, devido a reação à pressão do punção, a ação de compressão sobre o tarugo, deformando-o.

## 2.2. Método de Análise das Tensões de Extrusão

Desde a década de 30 vem sendo estabelecidos métodos para o cálculo da força de extrusão<sup>(4,5)</sup>. Esses métodos são baseados na mecânica da deformação plástica onde se estuda a matéria como meio contínuo que se deforma quando solicitada mecanicamente, ou mais particularmente, baseiam-se na teoria da plasticidade<sup>(6,12)</sup>.

Na realidade, torna-se difícil obter uma solução exata em um processo de conformação plástica, portanto, as soluções propostas predizem valores aproximados, para menos ou para mais, dependendo da formulação do modelo físico-matemático adotado em cada método.

(i) Energias Envolvidas

De um modo geral a energia total envolvida no processo é composta das seguintes parcelas:

- (a) energia utilizada para deformar o tarugo até uma dada redução de diâmetro;
- (b) energia redundante, definida como a energia gasta na deformação interna no metal, e que não contribui à mudança de dimensões;
- (c) energia necessária para vencer o atrito na superfície de contato tarugo-recipiente e tarugo-ferramenta;

(ii) Método do Limite Superior

No presente trabalho adotou-se o método do limite superior, segundo a solução proposta por AVITZUR<sup>(13-16)</sup>. Esse método está baseado no teorema do limite superior, formulado por PRAGER-HODGE<sup>(17)</sup>, e estabelece uma aproximação, por excesso, da tensão de extrusão.

O procedimento para obter-se o limite superior da tensão de extrusão, isto é, a tensão que no mínimo é suficiente para provocar a deformação, pode assim ser apresentado<sup>(18)</sup>:

- (a) estabelecer um campo de velocidades cinematicamente admissível para o corpo, que atenda as condições cinéticas nos limites e se aproxima do escoamento real;
- (b) determinar a potência (para a deformação plástica) interior ( $\dot{W}_1$ ) correspondente ao

campo de velocidades cinematicamente admissível, que se compõe de duas parcelas; uma para pontos onde a velocidade é contínua, outro para os pontos de superfícies de descontinuidades;

(c) determinar a potência externa aplicada ( $\dot{W}_e$ );

(d) estabelecer a relação:  $\dot{W}_e = \dot{W}_i$

As seguintes hipóteses são adotadas:

(a) o material do tarugo é considerado como material de von MISES<sup>(19)</sup>, ou seja, rígido-plástico, isotrópico, homogêneo e contínuo;

(b) o modelo do campo de velocidades cinematicamente admissível, tanto para a extrusão direta como para a inversa, é o esquematizado na figura II.3.

O tarugo é dividido em quatro zonas de velocidades contínuas:

ZONA I - Zona onde o material não está deformado, a velocidade é uniforme ( $V_0$ ) e tem somente uma componente axial;

ZONA II- É a zona onde o material é deformado - plásticamente; ela é limitada pelas superfícies esféricas  $\tau_1$  e  $\tau_2$  e pela superfície cilíndrica  $\tau_3$ . Nessa zona o vetor velocidade converge para o ápice (O) do cone virtual, de semi-ângulo  $\alpha$ . Em um sistema de coordenadas esféricas

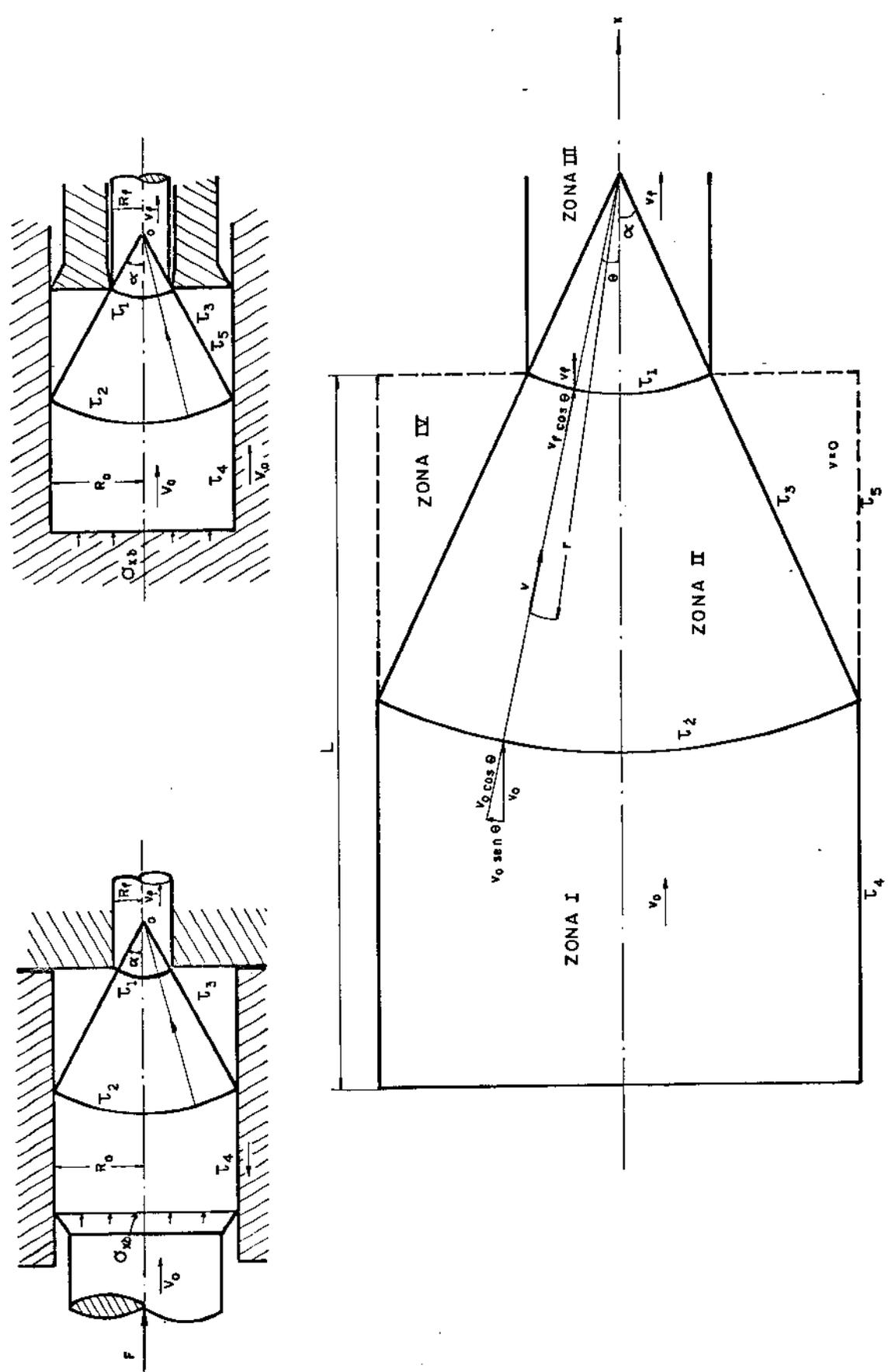


Figura II.3. - Representação esquemática do modelo do campo de velocidades cinematicamente admissível (20).

(r,  $\theta$ ,  $\phi$ ) os componentes de velocidades são:

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_r = V = -V_f r^2 \frac{\cos\theta}{r^2} \\ \dot{U}_\theta = \dot{U}_\phi = 0 \end{aligned} \right\} \quad (2.1)$$

ZONA III - Zona que compreende o produto extrudado; a velocidade é uniforme ( $V_f$ ) e tem somente uma componente axial;

ZONA IV - Zona de material estacionário (zona morta); ela é formada devido ao fato do material cisalhar internamente (para escoar) sobre a superfície de semi-ângulo  $\alpha$ , constante, denominado semi-ângulo da zona morta; nesse caso as componentes de velocidades se reduzem a zero.

Através das superfícies  $\tau_i$ , onde  $i = 1, \dots, 5$ , as componentes normais de velocidades são contínuas, entretanto, existem descontinuidades de velocidades paralelas a essas superfícies, e que são:

$$\left. \begin{aligned} \tau_1 \rightarrow \Delta V &= V_f \cdot \text{sen}\theta \\ \tau_2 \rightarrow \Delta V &= V_0 \cdot \text{sen}\theta \\ \tau_3 \rightarrow \Delta V &= V_f r^2 \frac{\cos\alpha}{r^2} \\ \tau_4 \rightarrow \Delta V &= V_0 \text{ (extrusão direta)} \\ \Delta V &= 0 \text{ (extrusão inversa)} \end{aligned} \right\} \quad (2.2)$$

$$\left. \begin{aligned} \tau_5 \rightarrow \Delta V &= 0 && \text{(extrusão direta)} \\ \Delta V &= V_0 && \text{(extrusão inversa)} \end{aligned} \right\} \quad (2.2)$$

(c) as perdas durante o processamento do tarugo são devidas ao atrito entre tarugo-recipiente e por cisalhamento nas superfícies de descontinuidades;

(d) os modelos de atrito considerados são<sup>(21)</sup>:  
modelo de Coulomb, com  $\tau = \mu p$  e modelo da camada limite, com  $\tau = m\tau_0$ .

O teorema do limite superior quando aplicado ao campo de velocidades da figura II.4, expressa a seguinte relação<sup>(22)</sup>:

$$\dot{W}_e = \dot{W}_i = \dot{W}_u + \dot{W}_s \quad (2.3)$$

onde:

$\dot{W}_e$  = potência externa aplicada;

$\dot{W}_u$  = potência de deformação sobre o volume deformado;

$\dot{W}_s$  = potência dissipada pelas superfícies de descontinuidades de velocidades.

sendo que;

$$\left. \begin{aligned}
 \dot{W}_e &= \int_{S_i} T_i V_i ds \\
 \dot{W}_u &= \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_0 \int_V \sqrt{\frac{1}{2} \dot{\epsilon}_{ij} \cdot \dot{\epsilon}_{ij}} \cdot dv \\
 \dot{W}_s &= \int_{S_\tau} \tau \Delta V ds
 \end{aligned} \right\} (2.4)$$

onde:

$T_i$  = tensão aplicada no tarugo

$V_i$  = velocidade na zona II

$ds$  = elemento de superfície

$\sigma_0$  = limite de escoamento do material

$\dot{\epsilon}_{ij}$  = componentes do tensor de velocidade de deformação

$dv$  = elemento de volume da zona deformada

$\tau$  = componentes da tensão de cisalhamento

$\Delta V$  = descontinuidades de velocidades

(iii) Etapas de Cálculo da Tensão de Extrusão

O cálculo da tensão de extrusão é desenvolvido em

três etapas:

1º - Cálculo da potência externa aplicada; a integral do produto das tensões pelas velocidades para cada elemento de superfície, na zona I, conduz a expressão:

$$\dot{W}_e = \int_{S_i} T_i V_i ds = - \Pi \cdot V_f \cdot R^2 \sigma_{xb} \quad (2.5)$$

onde:

$$T_i = \sigma_{xb}$$

$$V_i = V_0$$

$$ds = 2\pi r dr$$

2º - Cálculo da potência de deformação; as deformações na zona II são discutidas em termos de um sistema de coordenadas esféricas (r,  $\theta$ ,  $\phi$ ); no caso específico de simetria axial com relação ao eixo  $\phi$ , tem-se:

$$\left. \begin{aligned} \dot{\epsilon}_{rr} &= \frac{\partial \dot{U}_r}{\partial r} \\ \dot{\epsilon}_{\theta\theta} &= \frac{\dot{U}_r}{r} \\ \dot{\epsilon}_{\phi\phi} &= \frac{\dot{U}_r}{r} = - (\dot{\epsilon}_{rr} + \dot{\epsilon}_{\theta\theta}) \\ \dot{\epsilon}_{r\theta} &= \frac{1}{2r} \frac{\partial \dot{U}_r}{\partial \theta} \\ \dot{\epsilon}_{\theta\phi} &= \dot{\epsilon}_{r\phi} = 0 \end{aligned} \right\} \quad (2.6)$$

Aplicando-se as equações (2.6) no campo de velocidades de acordo com as equações (2.1), as seguintes velocidades de deformações são obtidas:

$$\left. \begin{aligned} \dot{\epsilon}_{rr} &= -2\dot{\epsilon}_{\theta\theta} = -\dot{\epsilon}_{\phi\phi} = 2V_f r_f^2 \cos\theta / r^3 \\ \dot{\epsilon}_{r\theta} &= \frac{1}{2} V_f r_f^2 \operatorname{sen}\theta / r^3 \\ \dot{\epsilon}_{\theta\phi} &= \dot{\epsilon}_{r\phi} = 0 \end{aligned} \right\} \quad (2.7)$$

como:

$$\dot{W}_u = \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_0 \int_V \sqrt{\frac{1}{2} \dot{\epsilon}_{ij} \cdot \dot{\epsilon}_{ij}} \, dv$$

logo substituindo-se (2.6) na expressão acima, resulta:

$$\dot{W}_u = 2\pi\sigma_0 V_f R_f^2 f(\alpha) \ell_n R_0 / R_f \quad (2.8a)$$

onde: (2.8b)

$$f(\alpha) = \frac{1}{\operatorname{sen}^2 \alpha} \left\{ \frac{1 - \cos\alpha \sqrt{1 - \frac{11}{12} \operatorname{sen}^2 \alpha}}{12} + \frac{1}{\sqrt{11/12}} \cdot \frac{1 + \sqrt{11/12}}{(\sqrt{11/12} \cos\alpha + \sqrt{1 - \frac{11}{12} \operatorname{sen}^2 \alpha})} \right\}$$

3º - Cálculo das potências dissipadas pelas superfícies de descontinuidades de velocidades

a - ao longo das superfícies  $\tau_1$  e  $\tau_2$

$$\dot{W}_{S_{1-2}} = \int_{S_{1-2}} \tau \Delta V ds = \int_{S_1} \tau \Delta V ds + \int_{S_2} \tau \Delta V ds = 2/\sqrt{3} \sigma_0 \pi V_f R_f^2 \cdot \left[ \frac{\alpha}{\operatorname{sen}^2 \alpha} - \cot\alpha \right] \quad (2.9)$$

onde:  $\tau = \sigma_0/\sqrt{3}$  ( tensão de cisalhamento segundo o critério de escoamento de von-MISES)

na superfície  $\tau_1$ , tem-se que

$$\begin{cases} \Delta V = V_f \cdot \text{sen}\theta \\ ds = 2\pi r_f \text{sen}\theta \cdot r_f d\theta \end{cases}$$

e na superfície  $\tau_2$

$$\begin{cases} \Delta V = V_0 \cdot \text{sen}\theta \\ ds = 2\pi r_i \text{sen}\theta r_i d\theta \end{cases}$$

b - ao longo da superfície  $\tau_3$

$$\dot{W}_{S_3} = \int_{S_3} \tau \Delta V ds = 2/\sqrt{3} \sigma_0 \pi V_f R_f^2 \cot\alpha \ell_n R_0/R_f \quad (2.10)$$

onde:

$$\tau = \sigma_0/\sqrt{3}$$

$$\Delta V = V_f r_f^2 \cos\alpha / r^2$$

$$ds = 2\pi r \frac{dr}{\text{sen}\alpha}$$

c - ao longo da superfície  $\tau_4$  (extrusão direta)

Como foi referido anteriormente a superfície  $\tau_4$  compreende o limite entre o tarugo e a parede do recipiente, portanto, a potência dissipada é influenciada pelas condições de atrito estabelecidas através de lubrificação e que podem

ser consideradas através dos distintos modelos de atrito. Considerando-se inicialmente o modelo da camada limite, onde  $\tau = m\sigma_0/\sqrt{3}$  resulta:

$$\dot{W}_{S_4} = \int_{S_4} \tau \Delta V ds = \frac{2}{\sqrt{3}} m\sigma_0 \Pi V_f \cdot R_f^2 \left\{ L/R_0 - \left(1 - \frac{R_f}{R_0}\right) \cot \alpha \right\} \quad (2.11)$$

No caso do modelo de Coulomb, onde  $\tau = \mu p$ , a potência dissipada na superfície  $\tau_4$  é obtida da seguinte maneira: isola-se um elemento diferencial de material dentro da zona I e se estabelece sobre ele o equilíbrio estático de tensões. Supõe-se que as tensões sobre as superfícies transversais do corpo livre são normais, uniformemente distribuídas e sem componentes de cisalhamento. Considera-se que prevalecem as condições de simetria cilíndrica e que para incrementos  $dx$ , as tensões normais variem de uma quantidade  $d\sigma_x$ . Supõe-se ainda que na interface tarugo-recipiente atuem uma pressão normal "p" e uma tensão de cisalhamento " $\mu p$ ", conforme indicado na figura II.4.

Fazendo-se o equilíbrio estático na direção longitudinal, aplicando-se o critério de escoamento de von MISES à equação obtida e integrando-se a equação diferencial resultante tem-se:

$$\ell_n = (\sigma_0 + \sigma_x) = - \frac{2\mu}{R_0} x + C \quad (2.12)$$

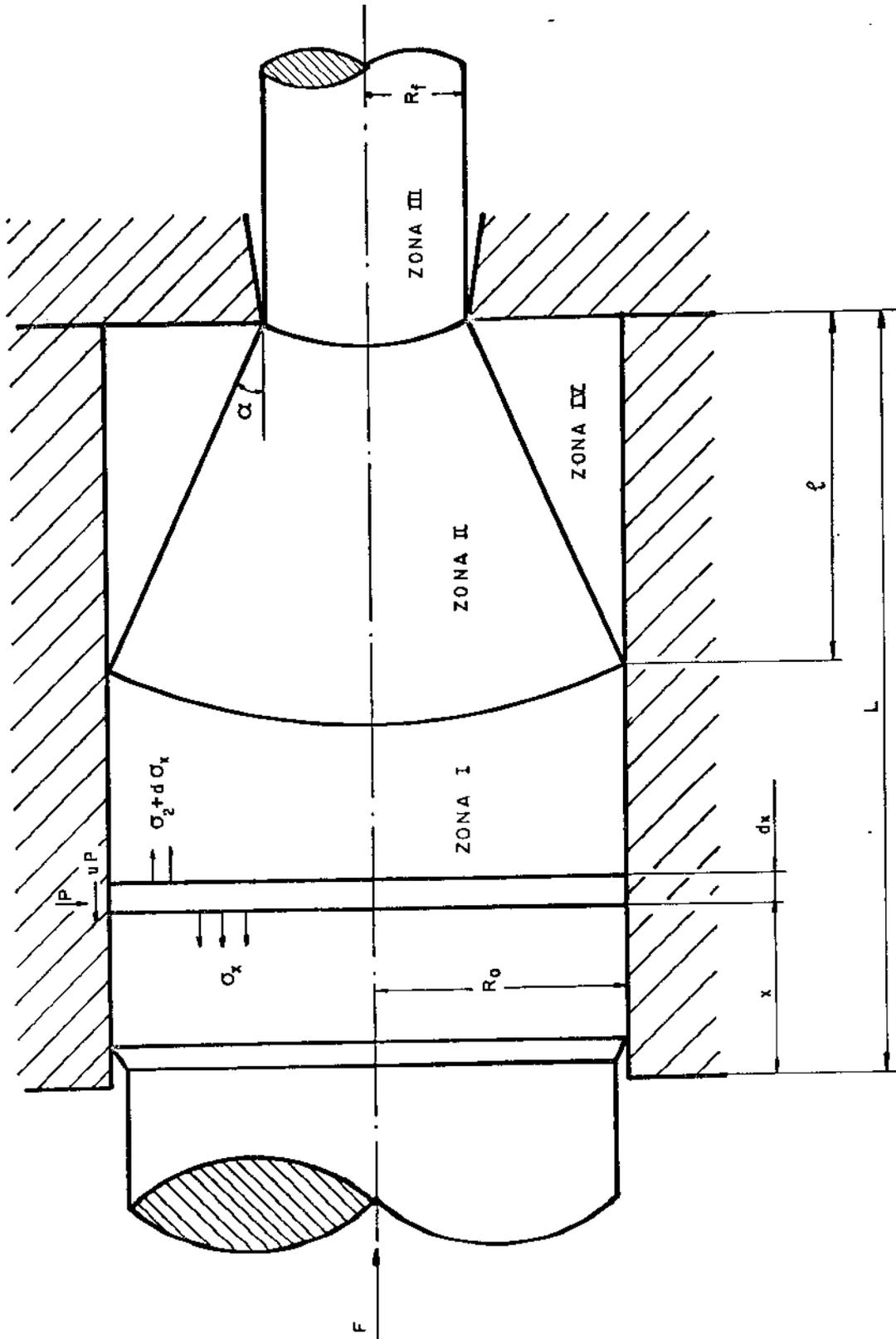


Figura II.4. Tensões atuantes no elemento diferencial (23)

para  $x = 0$ ;  $\sigma_x = \sigma_{xb}$

$$C = \ell_n (\sigma_0 + \sigma_{xb}) \quad (2.13)$$

logo substituindo (2.13) em (2.12) e considerando-se o critério de escoamento de von MISES, tem-se:

$$p = -(\sigma_0 + \sigma_x) = -\sigma_0 \left(1 - \frac{\sigma_{xb}}{\sigma_0}\right) \exp. \left(-2 \frac{\mu}{R_0} x\right) \quad (2.14)$$

como

$$\dot{W}_{S_4} = \int_{S_4} \tau \Delta ds = -2 \Pi V_f R_f^2 \frac{\mu}{R_0} \int_{x=0}^{L-\ell} p dx \quad (2.15)$$

logo substituindo-se (2.14) em (2.15), considerando-se que  $\ell = (R_0 - R_f) \cot \alpha$  e integrando-se, resulta:

$$\dot{W}_{S_4} = \Pi V_f R_f^2 \sigma_0 \left(1 + \frac{\sigma_{xb}}{\sigma_0}\right) \left\{ \exp \left[ -2\mu \left[ \frac{L}{R_0} - \left(1 - \frac{R_f}{R_0}\right) \cot \alpha \right] \right] - 1 \right\} \quad (2.16)$$

d - ao longo da superfície  $\tau_5$  (extrusão inversa)

O modelo da camada limite quando aplicado a superfície  $\tau_5$ , resulta:

$$\dot{W}_{S_5} = \int_{S_5} \tau \Delta V ds = 2/\sqrt{3} m \sigma_0 \Pi V_f R_f^2 \left(1 - \frac{R_f}{R_0}\right) \cot \alpha \quad (2.17)$$

e ao assumir-se o modelo de Coulomb, onde é suposto que a

zona morta está sob o estado de pressão hidrostática, igual a pressão sobre a matriz, tem-se:

$$\dot{W}_{S_5} = -2\pi\mu\sigma_{xb} V_f R_f^2 \cot\alpha / \left(1 + \frac{R_f}{R_0}\right) \quad (2.18)$$

Quando os valores das potências anteriormente calculadas são substituídas na relação 2.3, resulta as expressões para a tensão de extrusão, dadas pelas equações 2.19-2.20.

#### (iv) Determinação de Semi-Ângulos

Os valores dos semi-ângulos da zona morta podem ser obtidos diferenciando-se as expressões 2.14-2.22 e igualando-as a zero, com:

$$\left(\frac{\partial\sigma_{xb}}{\partial\alpha}\right) = 0 \quad (2.23)$$

Sendo que as figuras II.5-II.8, apresentam graficamente os resultados para as respectivas equações, onde o semi-ângulo da zona morta está associado a tensão de extrusão para uma faixa de variáveis.

#### (v) Análise da Variação da Tensão de Extrusão

A variação da tensão de extrusão em função do movimento de avanço do punção, durante o processamento do tarugo, para a extrusão direta e inversa é mostrada genericamente na figura II.9.

O aumento na tensão desde o ponto "0" até o ponto

Extrusão direta

(a) assumindo-se o modelo de atrito da camada limite:

(2.19)

$$\frac{\sigma_{xb}}{\sigma_0} = -2 \left\{ f(\alpha) \ln \frac{R_0}{R_f} + \frac{1}{\sqrt{3}} \left\langle \left( \frac{\alpha}{\sin^2 \alpha} - \cot \alpha \right) + \cot \alpha \right\rangle \ln \frac{R_0}{R_f} + m \left[ \frac{L}{R_0} - \left( 1 - \frac{R_f}{R_0} \right) \cot \alpha \right] \right\} \quad (2.19)$$

(b) assumindo-se o modelo de atrito de Coulomb:

(2.20)

$$\frac{\sigma_{xb}}{\sigma_0} = \left\{ 1 - 2 \left[ f(\alpha) \ln \frac{R_0}{R_f} + \frac{1}{\sqrt{3}} \left\langle \left( \frac{\alpha}{\sin^2 \alpha} \right) + \cot \alpha \right\rangle \ln \frac{R_0}{R_f} \right] \exp \left\{ 2\mu \left[ \frac{L}{R_0} - \left( 1 - \frac{R_f}{R_0} \right) \cot \alpha \right] \right\} \right\}^{-1} \quad (2.20)$$

Extrusão inversa

(a) assumindo-se o modelo de atrito da camada limite:

(2.21)

$$\frac{\sigma_{xb}}{\sigma_0} = -2 \left\{ f(\alpha) \ln \frac{R_0}{R_f} + \frac{1}{\sqrt{3}} \left[ \left( \frac{\alpha}{\sin^2 \alpha} - \cot \alpha \right) + \cot \alpha \ln \frac{R_0}{R_f} + m \left( 1 - \frac{R_f}{R_0} \right) \cot \alpha \right] \right\}$$

(b) assimilando-se o modelo de atrito de Coulomb:

(2.22)

$$\frac{\sigma_{xb}}{\sigma_0} = \frac{2 \left\{ f(\alpha) \ln \frac{R_0}{R_f} + \frac{1}{\sqrt{3}} \left[ \left( \frac{\alpha}{\sin^2 \alpha} - \cot \alpha \right) + \cot \alpha \ln \frac{R_0}{R_f} \right] \right\}}{1 - \frac{2\mu \cot \alpha}{1 + \frac{R_f}{R_0}}}$$

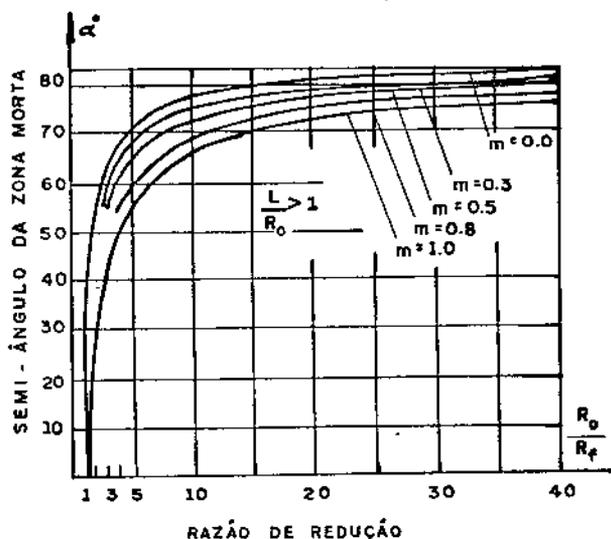


Figura II.5. - Efeito da redução e do fator de cisalhamento constante  $m$  sobre o semi-ângulo de zona morta, na extrusão direta (24).

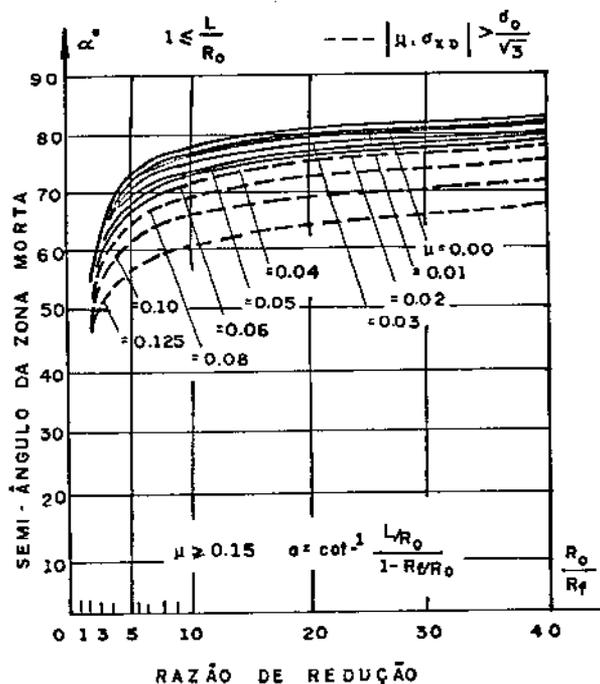


Figura II.6. - Efeito da redução e do coeficiente de atrito  $\mu$  sobre o semi-ângulo da zona morta, na extrusão direta (25).

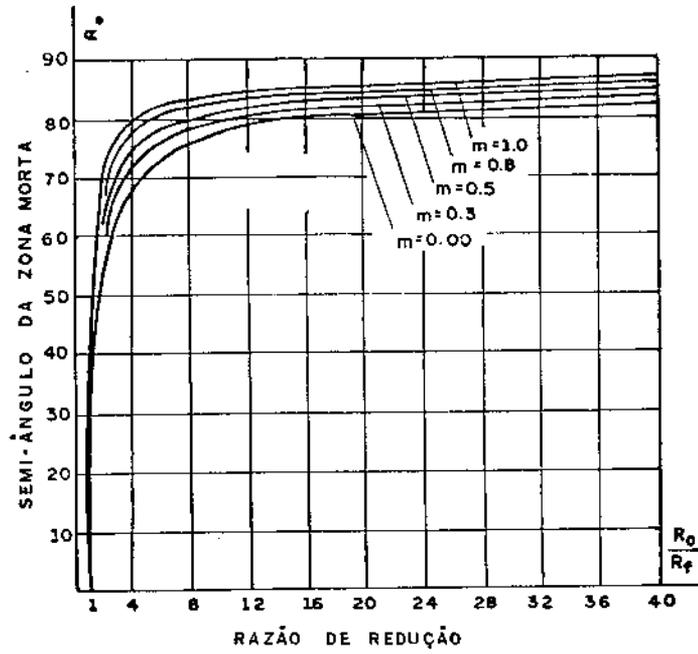


Figura II.7. - Efeito da redução e do fator de cisalhamento constante  $m$  sobre o semi-ângulo da zona morta, na extrusão inversa (26).

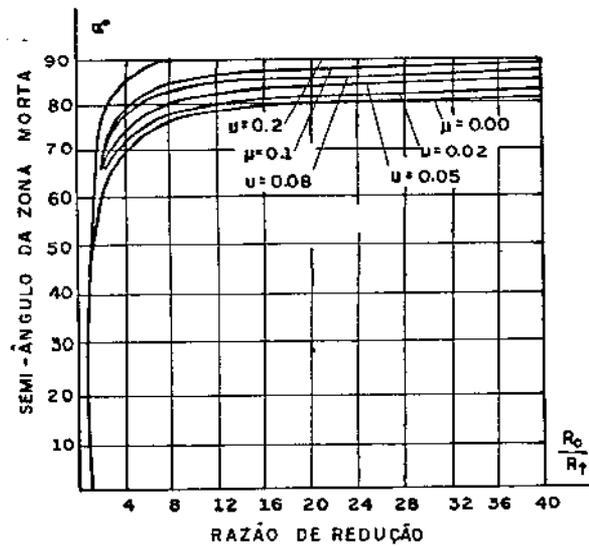


Figura II.8. - Efeito da redução e do coeficiente de atrito ou  $u$  sobre o semi-ângulo da zona morta na extrusão inversa (27).

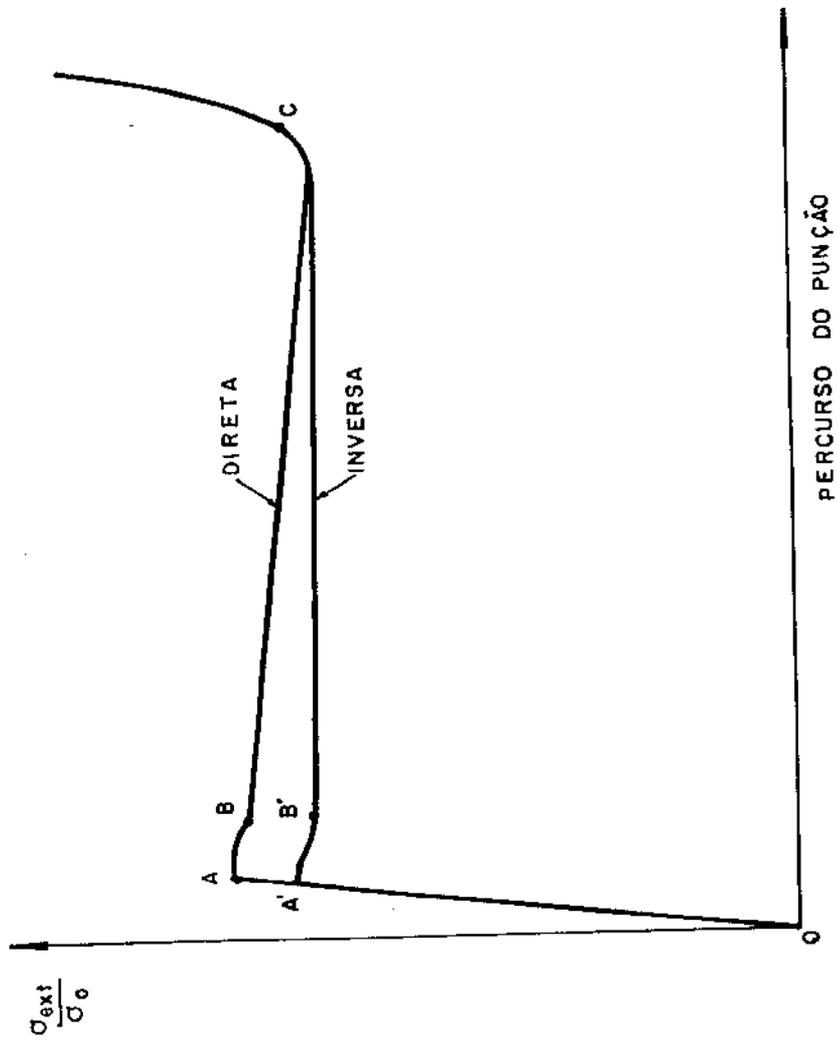


Figura 11.9. - Variação da tensão de extrusão durante o processamento do tarugo (13).

"A" é atribuído ao ajustamento do tarugo no recipiente, com pactação do material, deformação elástica das ferramentas de extrusão e outros fatores. A tensão eleva-se rapidamente até o ponto "A" devido ao início do cisalhamento que se produz na formação da zona morta; contudo, logo que o processo entra em regime de escoamento contínuo a tensão diminui ligeiramente pois é menor a tensão de atrito ao longo da superfície de descontinuidade  $\tau_3$ . Para a extrusão direta, a pressão no ponto "B" é devida a resistência ao atrito (e perdas) ao longo da superfície de contato do tarugo com o recipiente (superfície  $\tau_4$ ). Essas perdas diminuem significativamente com o avanço do punção e, por conseguinte, com a diminuição do comprimento do tarugo. Na extrusão inversa essas perdas são eliminadas, já que não há movimento entre tarugo-recipiente, por essa razão a extrusão inversa requer menor tensão de trabalho; entretanto, uma nova perda por atrito atua ao longo da superfície  $\tau_5$ .

Com o comprimento do tarugo se aproximando a zero, perdas por atrito ao longo das superfícies de descontinuidades  $\tau_2$  e  $\tau_3$  são então predominantes, causando um aumento exponencial da tensão a partir do ponto "C". Então o processamento do tarugo deve ser interrompido, já que uma tensão infinita é requerida para completar a extrusão.

A análise efetuada por AVITZUR, refere-se ao trecho BC das curvas, já que nesses trechos o escoamento permanece em regime, o que implica na suposição do campo de velocidades.

### 2.3. Referências Bibliográficas

- (1) PEARSON, C.E. - The Extrusion of Metals, Chapman & Hall Ltd, London, 1953, pp. 1-28.
- (2) BRESCIANI Fº, E. - Análise do Processo de Extrusão de Barras (Trabalho a ser Publicado, FEC/UNICAMP).
- (3) PAPANONI, F. - Trafilati di Rame, Revista Il Rame, Cisar, nº 23, Setembro, 1968, pp.4-7.
- (4) SIEBEL, E.; FANGMEIER, E. - Researches in Power Consumption in the Extrusion and Punching of Metals, Mitt. K. W. Inst. Eisenforschung, 13: pp. 29-43, 1931, in Ref. 5, p. 280.
- (5) THOMSEN, E.G. ; YANG, C.T.; KOBAYASHI, S. - Mechanics of Plastic Deformation in Metal Processing, Mc Millan Co., New York, 1965, pp. 280-281.
- (6) Idem ibidem Ref. (5), Cap. 5,6; pp. 69-80; 106-127.
- (7) JOHNSON, W.; MELLOR, P.B. - Engineering Plasticity, van Nostrand, London, 1973, Cap.1, pp.1-34.
- (8) BAQUE, P.et alli - Mise en Forme de Métaux - Calculs par la Plasticité, Dunod, Paris, 1973, Partie B, pp. 75-173.

- (9) KACHANOV, L.M. - Fundamentals of the Theory of Plasticity, Mir Publishers, Moscou, 1974, Cap. II, pp. 48-105.
- (10) DIETER, G.E. - Mechanical Metallurgy, McGraw Hill, Kogakusha, Tokyo, 1976, Cap.3, pp. 72-94.
- (11) AVITZUR, B. - Metal Forming : Process and Analysis, Tata McGraw Hill Co. Ltd. , New Delhi, 1977, Cap. 2,3,4; pp. 21-28; 29-41; pp. 43-51.
- (12) BRESCIANI Fº, E. - Conformação Plástica dos Metais , Apostila Pós-Graduação, UNICAMP/FEC, Campinas, 1977, Cap. III, pp.55-81.
- (13) AVITZUR, B. - Analysis of Metal Extrusion, Trans. ASME, Ser. B., Vol. 87, 1965, pp.57-70.
- (14) Idem ibidem REf. (11), Cap. 10, pp. 250-294.
- (15) AVITZUR, B. - Analysis of Wire Drawing and Extrusion Through Conical Dies of Small Cone Angle, Trans. ASME, Series B, Vol. 85 , 1963, pp.89-96.
- (16) AVITZUR, B. . Analysis of Wire Drawing and Extrusion Through Conical Dies of Large Cone Angle, Trans. ASME, Series B, Vol. 86, nº 4, 1964, pp. 305-316.

- (17) PRAGER, W.; HODGE Jr, P.G. - Theory of Perfectly Solids, Champman & Hall Ltd., London, 1951, in Ref. (11), p. 63.
- (18) Idem ibidem Ref. (12), pp.80-81
- (19) Idem ibidem Ref. (11), p. 50
- (20) Idem ibidem Ref. (13), p.58
- (21) Idem ibidem Ref. (11), pp. 60-61
- (22) Idem ibidem Ref. (13), p.60
- (23) Idem ibidem Ref. (11), pp. 261
- (24) Idem ibidem Ref. (13), p.63
- (25) Idem ibidem Ref. (13), p.62
- (26) Idem ibidem Ref, (13), p.65
- (27) Idem ibidem Ref, (13), p.64

## CAPÍTULO 3

### MÁQUINA EXTRUSORA DE LABORATÓRIO

#### 3.1. Descrição da Máquina

A máquina é composta basicamente das seguintes partes:

- componentes estruturais;
- ferramentas de extrusão;
- sistema de aquecimento;
- sistema hidráulico; e
- painel de controle

Sobre a estrutura, na forma de uma mesa, está fixada uma base na qual estão montados as ferramentas de extrusão e que são:

- recipiente de extrusão;
- conjunto matriz/porta-matriz; e
- punção

Duas placas verticais, uma em cada extremidade da base, servem de suporte a duas barras tirantes; essas barras são fixadas por meio de porcas, em posição horizontal e paralela, e servem de guias a três suportes móveis. Dois desses suportes sustentam o recipiente de extrusão. O terceiro suporte sustenta a haste do cilindro hidráulico e o conjunto porta-punção. Além disso, na parte central dessas placas verticais estão fixadas, em uma, o conjunto matriz/porta-matriz e, na

outra, o cilindro hidráulico.

O sistema de aquecimento é composto de um termo-elemento, de um sensor de temperatura, de um controlador de temperatura, de um contator e de um variador de tensão.

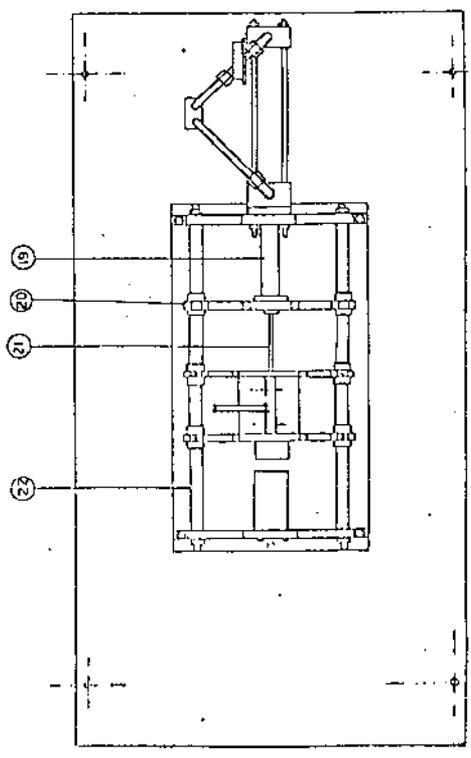
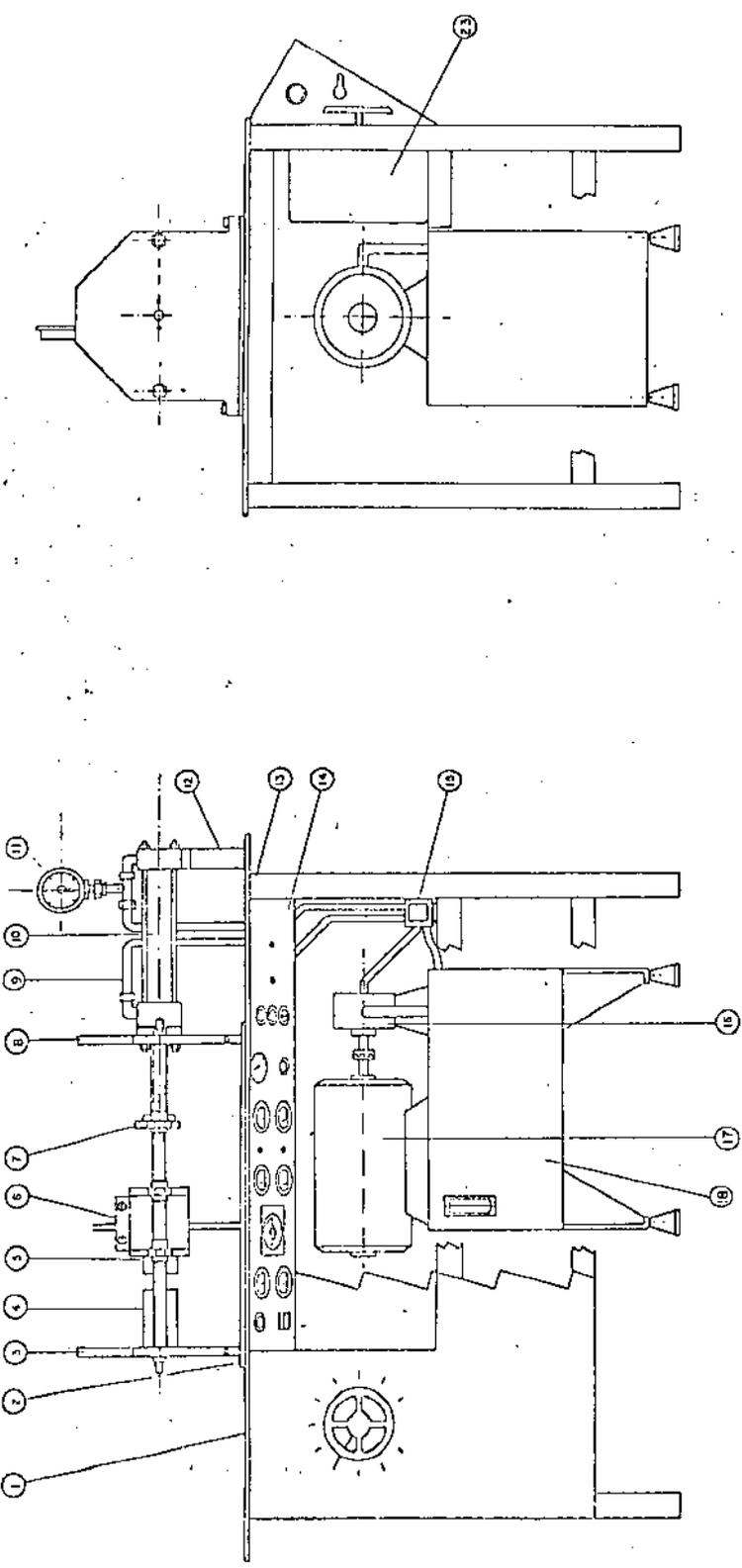
O sistema hidráulico é composto de um tanque, de um conjunto motor-bomba, de uma válvula reguladora de pressão, de uma válvula direcional, de duas válvulas controladoras de fluxo, de dois manômetros e de um cilindro hidráulico.

No painel de controle estão localizados os instrumentos de controle necessários a operação e que são: voltímetros, amperímetros, chaves de contato, controle de temperatura, controle de tensão, etc.

Nos itens seguintes trata-se com detalhes cada parte componente da máquina cujo desenho de conjunto é apresentado na figura III.1.

As seguintes etapas são necessárias ao funcionamento do equipamento.

- 1 - energização dos sistemas;
- 2 - regulagem do controlador de temperatura na temperatura de extrusão;
- 3 - regulagem do variador de tensão;
- 4 - introdução do tarugo no recipiente;
- 5 - aquecimento e homogeneização da temperatura do tarugo;
- 6 - acoplamento do recipiente com o conjunto matriz/porta-matriz;
- 7 - acionamento do conjunto motor-bomba;
- 8 - acionamento da válvula direcional no sentido



- |                                     |                                   |
|-------------------------------------|-----------------------------------|
| 1 - Chapa da mesa                   | 13 - Estrutura da mesa            |
| 2 - Base                            | 14 - Painel de controle           |
| 3 - Placa porta matriz              | 15 - Válvula direcional           |
| 4 - Apóio                           | 16 - Bomba                        |
| 5 - Conjunto matriz/porta-matriz    | 17 - Motor                        |
| 6 - Recipiente e termo-elemento     | 18 - Tanque                       |
| 7 - Porta-punção                    | 19 - Haste do cilindro hidráulico |
| 8 - Placa porta-cilindro hidráulico | 20 - Suportes                     |
| 9 - Duto hidráulico                 | 21 - Punção                       |
| 10 - Cilindro hidráulico            | 22 - Guias                        |
| 11 - Manômetro                      | 23 - Variador de tensão           |
| 12 - Suporte do cilindro hidráulico |                                   |

Figura III.1.-Desenho de conjunto da máquina extrusora

de avanço do punção;

- 9 - extrusão do tarugo;
- 10 - acionamento da válvula direcional no sentido de retorno do punção;
- 11 - desacoplamento do recipiente e conjunto matriz/porta-matriz; e
- 12 - limpeza do recipiente e da matriz

### 3.2. Projeto da Máquina

#### (i) Critérios de Projeto

O material tomado como referência, como metal a ser extrudado para a elaboração do projeto, foi o alumínio comercialmente puro. A adoção desse metal, diante de suas características mecânicas e de conformação, aliadas a adoção de um coeficiente de segurança garantem o dimensionamento da máquina para a extrusão do ouro e da liga de alumínio - silício, com 1% de silício de pureza elevada.

De um modo geral o projeto foi desenvolvido, calculando-se os parâmetros essenciais ao dimensionamento dos componentes da máquina, com base nas informações encontradas nas referências<sup>(1,2)</sup>.

Adotou-se a seguinte sequência para o desenvolvimento do projeto:

- cálculo da força de extrusão;
- dimensionamento das ferramentas de extrusão;
- dimensionamento dos componentes estruturais, e
- especificações de sistemas

(ii) Cálculo da Força de Extrusão

A força de extrusão é o parâmetro básico para a execução do projeto, já que dela dependem os dimensionamentos das partes que compõem a máquina.

Para a escolha das dimensões do tarugo, fez-se as seguintes observações:

- o comprimento do fio a ser obtido é proporcional as dimensões do tarugo;
- as dimensões do tarugo influem sensivelmente a força de extrusão;
- o comprimento do tarugo é limitado pelo comprimento do punção, já que a carga sobre esse (força de extrusão) não pode ultrapassar a carga de flambagem.

Inicialmente, tomando-se várias dimensões para o punção, e conseqüentemente para o tarugo, determinou-se a carga com a respectiva força de extrusão. Como resultado dessa comparação adotou-se o tarugo com as seguintes dimensões:

$$D_t = 8,0 \text{ mm}$$

$$L_t = 50 \text{ mm}$$

para a extrusão direta, e:

$$D_t = 10,0 \text{ mm}$$

$$L_t = 50 \text{ mm}$$

para a extrusão inversa; onde  $D_t$  e  $L_t$  são respectivamente o diâmetro e o comprimento do tarugo.

Considerando-se as dimensões adotadas o fio a ser obtido, teoricamente, terá o comprimento igual a 3,2 e 5,0

metros, respectivamente na extrusão direta e inversa.

Para a extrusão direta, o cálculo da força de extrusão será feito considerando-se inicialmente a expressão 2.19, ou seja, considerando-se o modelo de atrito da camada limite; tendo sido já adotadas as dimensões para o tarugo e para o produto a ser extrudado, determina-se, então, a razão de redução, logo:

$$R_0/R_f = 8$$

para esse valor e admitindo-se o fator de cisalhamento máximo,  $m = 1$ , através da figura II.5 determina-se o valor do semi-ângulo da zona morta, que é aproximadamente igual a:

$$\alpha = 63^\circ$$

e pela equação 2.8b, tem-se que:

$$f(\alpha) = 1,03974$$

substituindo-se os valores acima determinados na expressão 2.19, obtém-se que:

$$\frac{\sigma_{xb}}{\sigma_0} = - 20$$

adotando-se  $\sigma_0 = 2 \text{ kgf/mm}^2$  (estado recozido), resulta:

$$\sigma_{xb} = 40 \text{ kgf/mm}^2$$

logo a força de extrusão será:

$$F_{\text{ext}} = 2t$$

Considerando-se agora a expressão 2.20, ou seja, segundo o modelo de atrito de Coulomb, temos que o valor do semi-ângulo da zona morta é dado através da figura II.6. Adotando-se o coeficiente de atrito  $\mu = 0,125$ , para uma razão de redução igual a 8, resulta:

$$\alpha \cong 57^{\circ}$$

logo, pela equação 2.8b, tem-se que:

$$f(\alpha) = 1,03974$$

substituindo-se os valores acima determinados na expressão 2.20 e novamente adotando-se  $\sigma_0 = 2 \text{ kgf/mm}^2$ , a força de extrusão será:

$$F_{\text{ext}} = 11,3t$$

Para o caso da extrusão inversa, resolvendo-se as expressões 2.21 e 2.22, respectivamente segundo os modelos de atrito da camada limite e de Coulomb, pode-se concluir que o valor da força de extrusão independe do modelo considerado, pois os valores das forças calculadas são aproximadamente iguais; e então:

$$F_{\text{ext}} = 0,7t$$

O valor da força de extrusão para o ouro, utilizando-se a expressão 2.19 (camada limite) e adotando-se o limite de escoamento  $\sigma_0 = 0,34 \text{ kgf/mm}^2$  (estado recozido), será:

$$F_{\text{ext}} \cong 0,34t$$

e considerando-se a expressão 2.20 (Coulomb), resulta:

$$F_{\text{ext}} = 2t$$

Considerando-se que a expressão 2.19, modelo de atrito segundo a camada limite, estabelece um baixo limite superior para a tensão de extrusão<sup>(3)</sup>, adotou-se então o valor da força calculada para o alumínio através dessa expressão ( $F_{\text{ext}} = 2t$ ) para o dimensionamento das partes que compõem a máquina.

### (iii) Dimensionamento das Ferramentas de Extrusão

#### PUNÇÃO

Como foi referido no item precedente, o comprimento do punção é limitado pela carga de flambagem. Aqui mostra-se como obteve-se essa carga, segundo a norma NB-14<sup>(4)</sup>.

Inicialmente determinou-se o índice de esbeltz do punção ( $\lambda$ ) que é dado pela seguinte expressão:

$$\lambda = L_{f\ell} / i \quad (3.1)$$

onde,  $L_{f\ell}$  = comprimento de flambagem e

$i$  = raio de giração mínimo

O comprimento de flambagem depende do comprimento real do punção e de seus vínculos externos. Para o presente caso adotou-se  $L_{f\ell} = 0,6 L_p$ , onde  $L_p$  é o comprimento do punção. O raio de giração mínimo para o caso de uma secção circular é igual a  $D_p/4$ , onde  $D_p$  é o diâmetro do punção. Logo o índice de esbeltz é:

$$\lambda = 15$$

Como  $\lambda < 100$ , a fórmula a ser empregada para o cálculo da tensão de flambagem é a de JOHNSON ou seja:

$$\sigma_{f\ell} = \sigma_0 - \frac{\sigma_e^2}{4\pi^2 E} \lambda^2 \quad (3.2)$$

onde:

- $\sigma_{f\ell}$  = tensão de flambagem
- $\sigma_0$  = limite de escoamento
- E = módulo de elasticidade

como,

$$\begin{aligned} \sigma_e &= 100 \text{ kgf/mm}^2 \\ E &= 20 \times 10^3 \text{ kgf/mm}^2 \end{aligned}$$

tem-se que:

$$\sigma_{f\ell} = 97 \text{ kgf/mm}^2$$

Adotando-se um coeficiente de segurança igual a 1,5, a tensão de flambagem admissível é:

$$\bar{\sigma}_{f\ell} = 64,6 \text{ kgf/mm}^2$$

logo a carga acima da qual se produzirá o fenômeno é:

$$\bar{F}_{f\ell} \cong 3,2t$$

Portanto, como  $F_{ext} < \bar{F}_{f\ell}$ , as dimensões do punção satisfazem.

### RECIPIENTE DE EXTRUSÃO

As tensões de extrusão produzem no recipiente tensões de compressão e tensões de tração tangenciais elevadas. Essas últimas são de maior importância já que podem levar o recipiente à fratura<sup>(5)</sup>.

O recipiente foi dimensionado como um tubo de parede grossa (fórmula de Lamé). Na figura III.2 estão representados os diagramas das variações das tensões radiais e tangenciais ao longo da espessura do tubo sujeito a uma pressão interna "p"; o valor da tensão tangencial ( $\sigma_t$ ) atinge o máximo junto a superfície interna e é dada pela seguinte expressão<sup>(6)</sup>:

$$\sigma_{t(r=a)} = p \frac{b^2 + a^2}{b^2 - a^2} \quad (3.3)$$

onde a e b são os raios do recipiente, respectivamente raio interno e raio externo; e a tensão radial é igual a -p.

A tensão tangencial máxima para o caso de um tubo de parede grossa deve ser inferior a cerca de 15 a 20% do limite de escoamento, na temperatura de trabalho do aço que constituirá o recipiente<sup>(5)</sup>.

como, a = 4,0 mm

$$\left. \begin{array}{l} b = 35,0 \text{ mm} \\ p = 60 \text{ kgf/mm}^2 \end{array} \right\} \text{ (Adotados)}$$

logo a tensão tangencial máxima é:

$$\sigma_t = 61,5 \text{ kgf/mm}^2$$

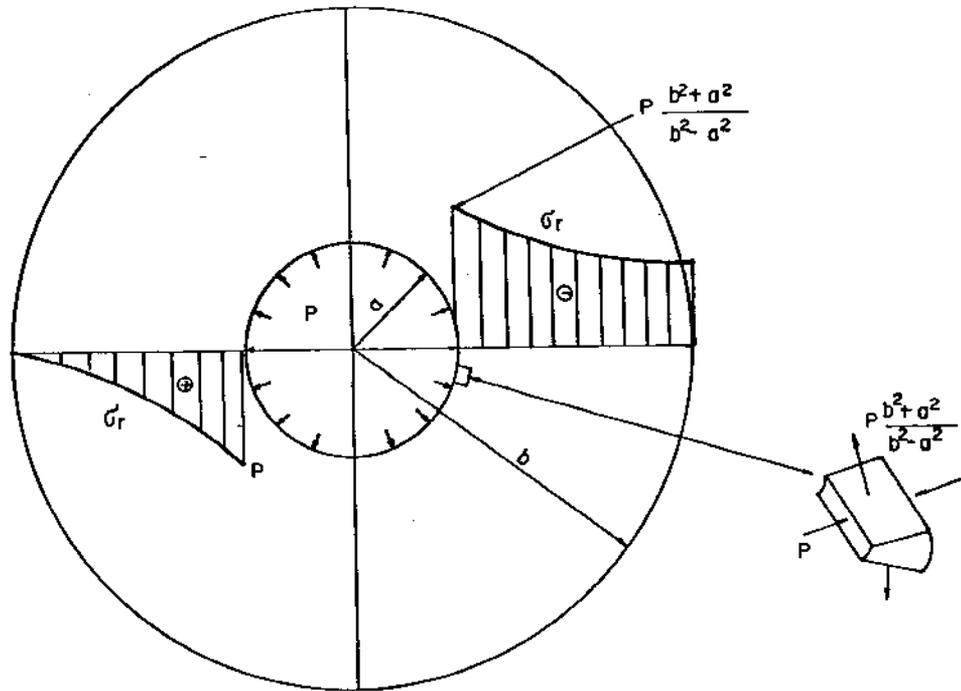


Figura III.2. Diagramas de variação das tensões radiais e tangenciais ao longo da espessura do tubo de parede grossa submetido a uma pressão interna  $p^{(6)}$ .

Como o aço especificado para a fabricação do recipiente apresenta, a 500°C, o limite de escoamento igual a 100 kgf/mm<sup>2</sup>, conclui-se que as dimensões adotadas satisfazem os critérios de resistência.

#### CONJUNTO MATRIZ/PORTA-MATRIZ

A espessura da matriz foi obtida considerando-se a tensão admissível de cisalhamento oriunda da força aplicada pelo cilindro hidráulico. A tensão de cisalhamento é dada pela seguinte expressão<sup>(7)</sup>:

$$\tau = 0,75\bar{\sigma} = F/A \quad (3.4)$$

onde:

$\bar{\sigma}$  = tensão admissível sobre a matriz

F = força máxima aplicada pelo cilindro hidráulico

A = área sujeita ao cisalhamento

como:

$$\bar{\sigma} = 17 \text{ kgf/mm}^2 \text{ (Adotado)}$$

$$F = 4436 \text{ kgf}$$

$$A = 2\pi R\ell = 25,12 h_m$$

então:

$$h_m \cong 14 \text{ mm}$$

e, para o diâmetro da matriz ( $D_m$ ) adotou-se:

$$D_m = 30 \text{ mm}$$

Com relação as dimensões do porta-matriz adotou-se as especificadas na figura III.5.

(iv) Dimensionamento dos Componentes Estruturais

PLACAS VERTICAIS

As placas verticais, placa porta-matriz e placa porta-cilindro hidráulico estão sujeitas a esforços de flexão. A tensão admissível nas placas é dada pela seguinte expressão<sup>(8)</sup>:

$$\bar{\sigma} = \frac{M_{\max}}{W} \quad (3.5)$$

sendo:

$$M_{\max} = \frac{F \cdot \ell}{4} \quad \text{e} \quad W = \frac{bh^2}{6}$$

onde:

$M_{\max}$  = momento fletor máximo

$W$  = módulo de flexão

$F$  = força máxima aplicada pelo cilindro hidráulico

$b$  = largura da placa

$h_p$  = espessura da placa

$\ell$  = comprimento da placa

como:

$$\left. \begin{aligned} \bar{\sigma} &= 16 \text{ kgf/mm}^2 \\ b &= 340 \text{ mm} \\ \ell &= 300 \text{ mm} \end{aligned} \right\} \text{ (Adotados)}$$

$F = 4436 \text{ kgf}$

logo a espessura mínima da placa é:

$$h_p = 19 \text{ mm}$$

A flexa máxima  $\bar{f}$  dada pela seguinte expressão:

$$f_{\max} = \frac{F}{E.J} \cdot \frac{l^3}{48} \quad (3.6)$$

sendo:

$$J = bh^3/12$$

onde:

E = módulo de elasticidade

J = momento de inércia

logo:

$$f_{\max} = 0,006 \text{ mm}$$

então as dimensões satisfazem.

Como a força cortante máxima ocorre em posição diferente a do momento fletor máximo, esta foi desprezada.

### GUIAS

As guias estão sujeitas a esforços de tração, portanto, tem-se<sup>(7)</sup>:

$$\bar{\sigma}_t = F/A \quad (3.7)$$

onde:

$\bar{\sigma}_t$  = tensão admissível de tração

F = força aplicada na guia

A = área da secção transversal da guia

logo, o diâmetro mínimo da guia é dado pela seguinte expressão:

$$D_{g_{\min.}} \cong \left( \frac{F \cdot 4}{\pi \bar{\sigma}} \right)^{1/2} \quad (3.8)$$

como:

$$F = 2218 \text{ kgf e}$$

$$\sigma = 20 \text{ kgf/mm}^2 \text{ (adotado)}$$

resulta:

$$D_{g_{\min.}} \cong 12 \text{ mm}$$

Para a fixação das guias adotou-se o tipo com rêsca; portanto, o dimensionamento foi feito como se segue:

$$\bar{\sigma}_t = F/A \quad (3.9)$$

onde:

$\bar{\sigma}$  = tensão admissível de tração

A = área de secção transversal do núcleo necessário à fixação

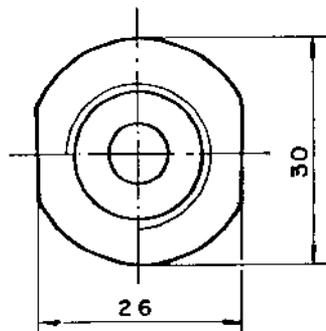
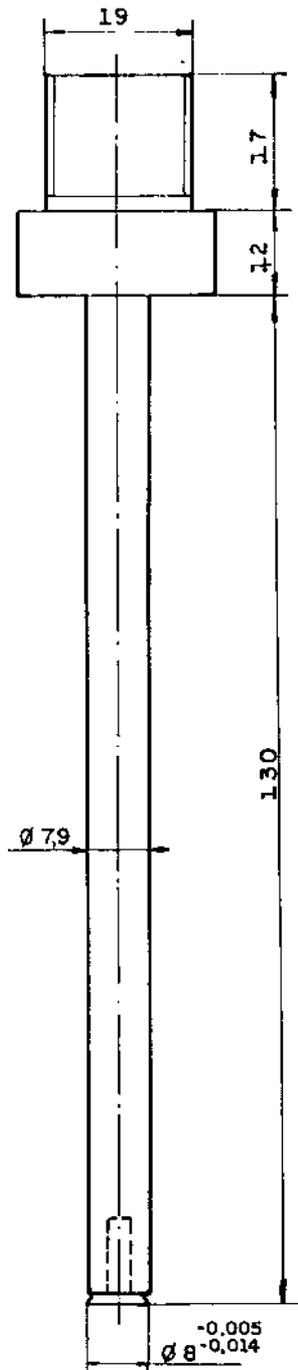
logo:

$$A \cong 110 \text{ mm}^2$$

para esse valor é especificado rosca M16 e porca sextavada M16 normalizada<sup>(9)</sup>.

Levando-se em consideração o ressalto da guia adotou-se como o diâmetro da guia:

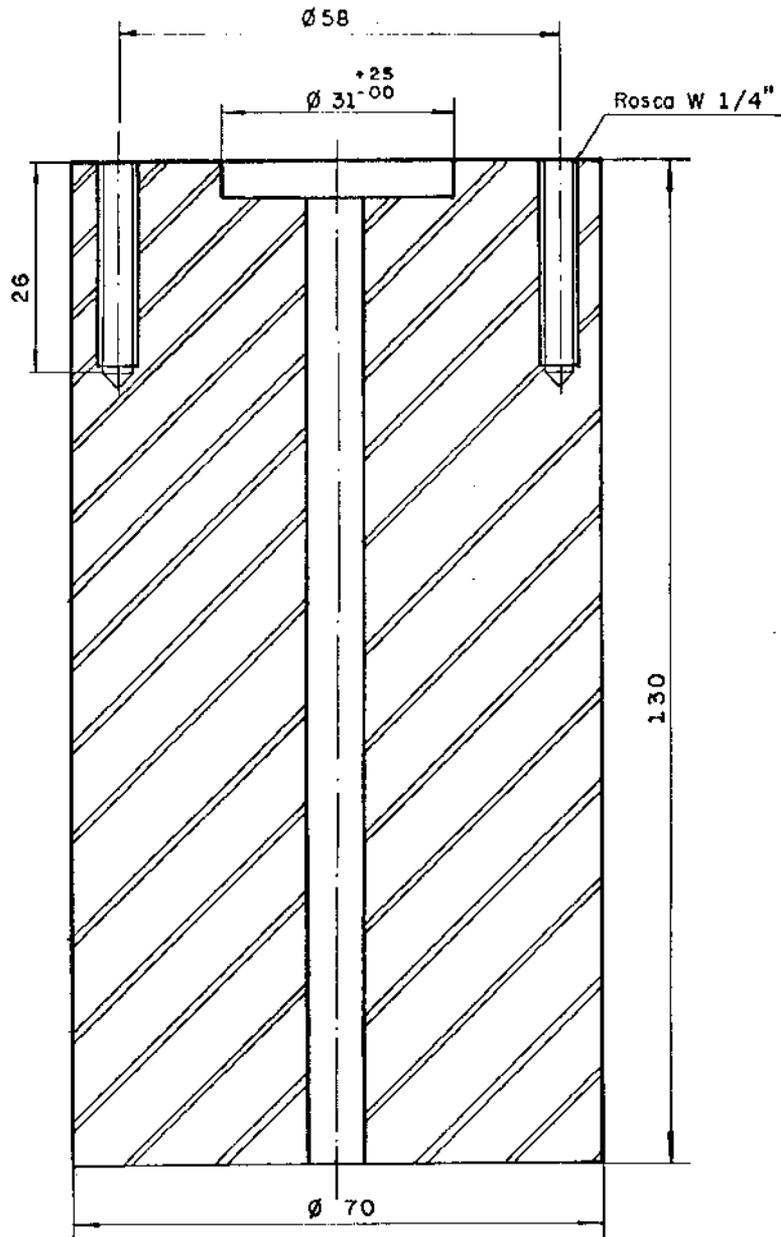
$$D_g = 24 \text{ mm}$$



Material: Aço VPCW

Escala: 1:1

Figura III.3. - Punção



CORTE AA

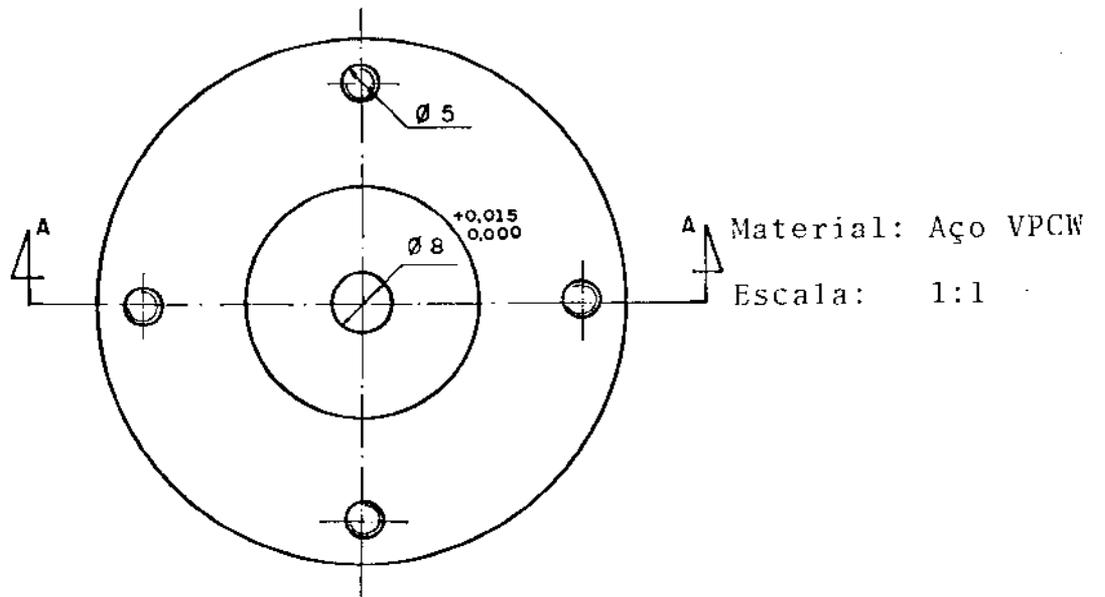
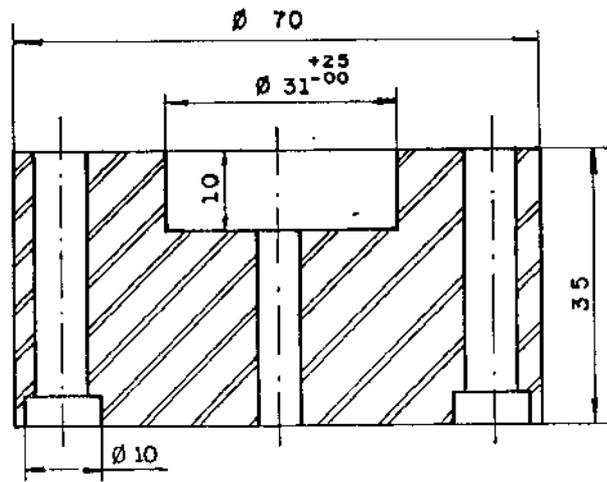
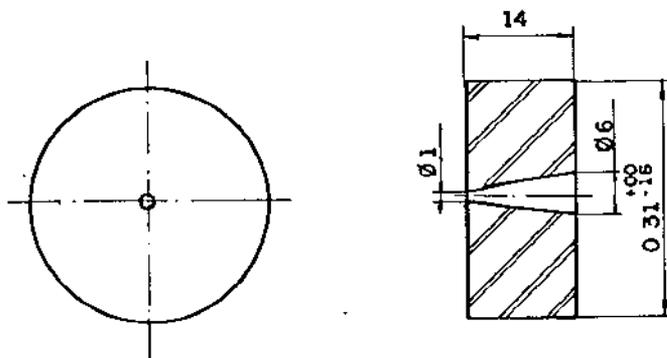
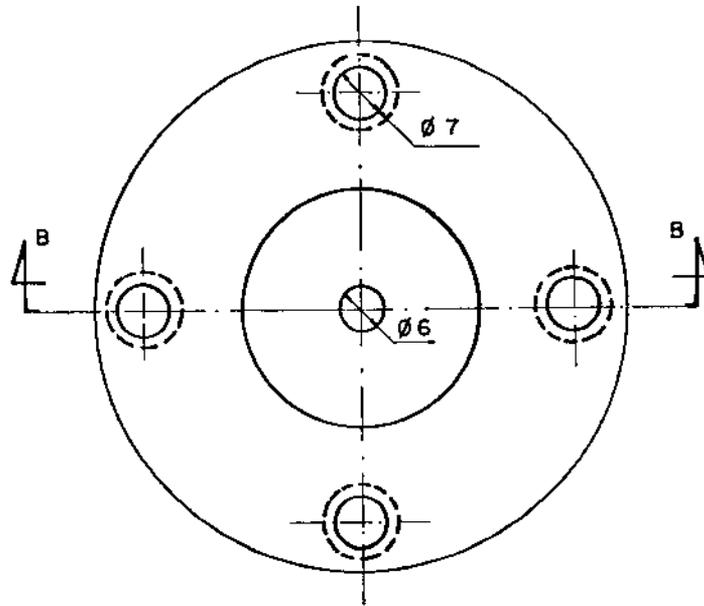


Figura III.1. - Recipiente de extrusão



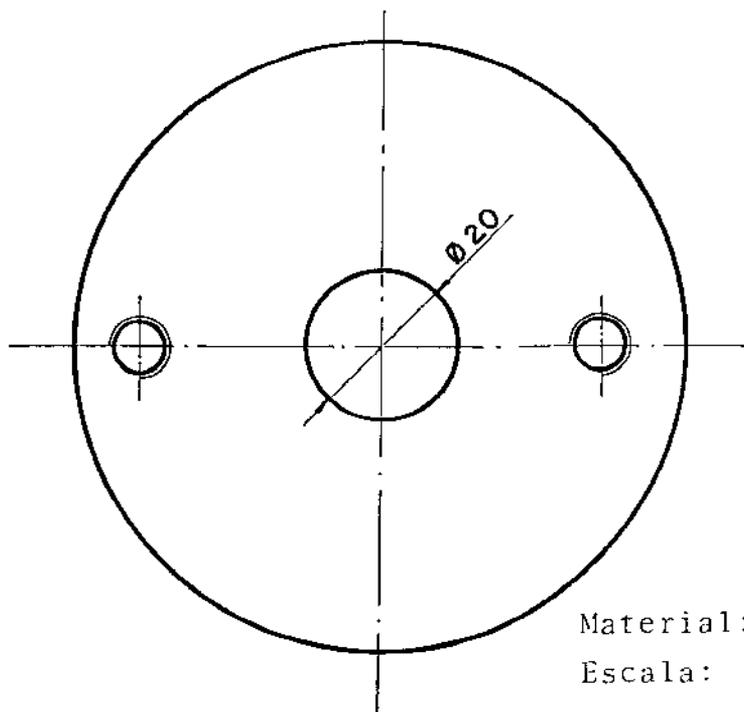
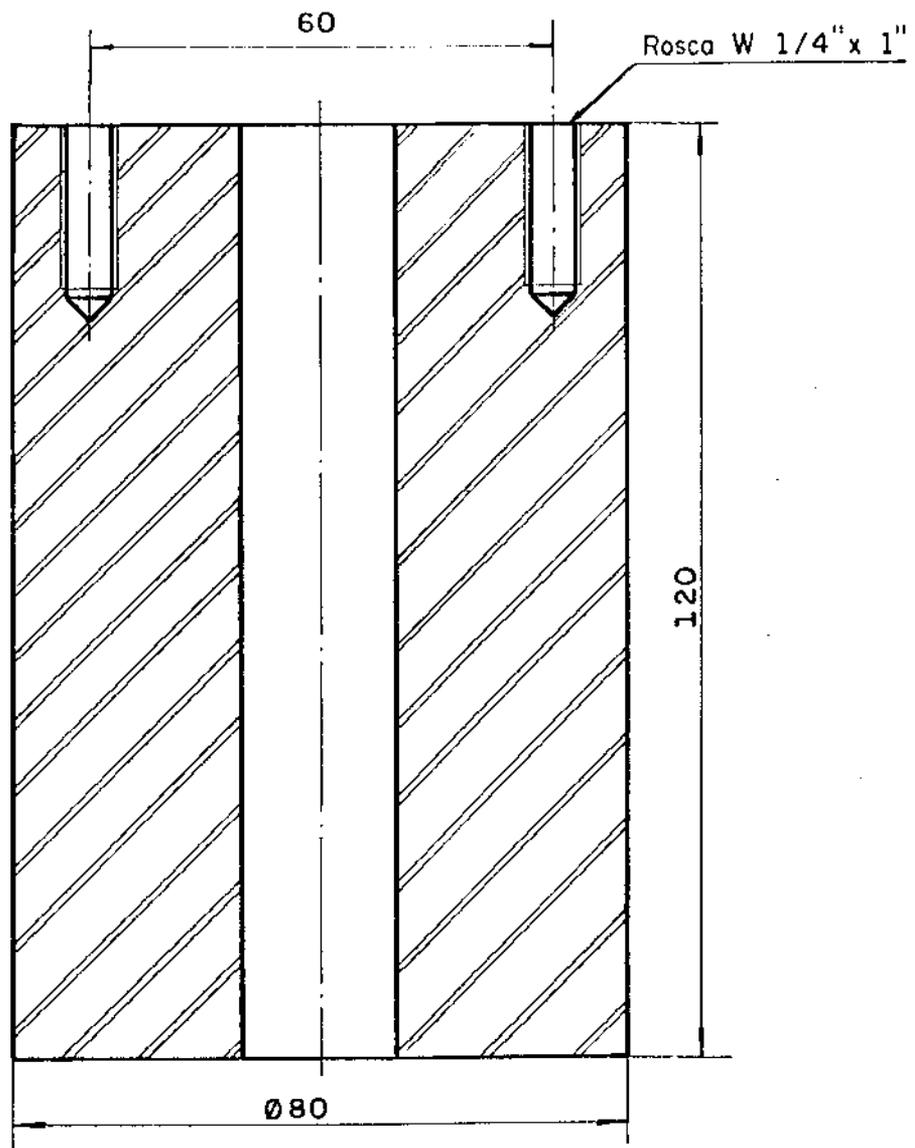
CORTE BB



Material: Aço VPCW

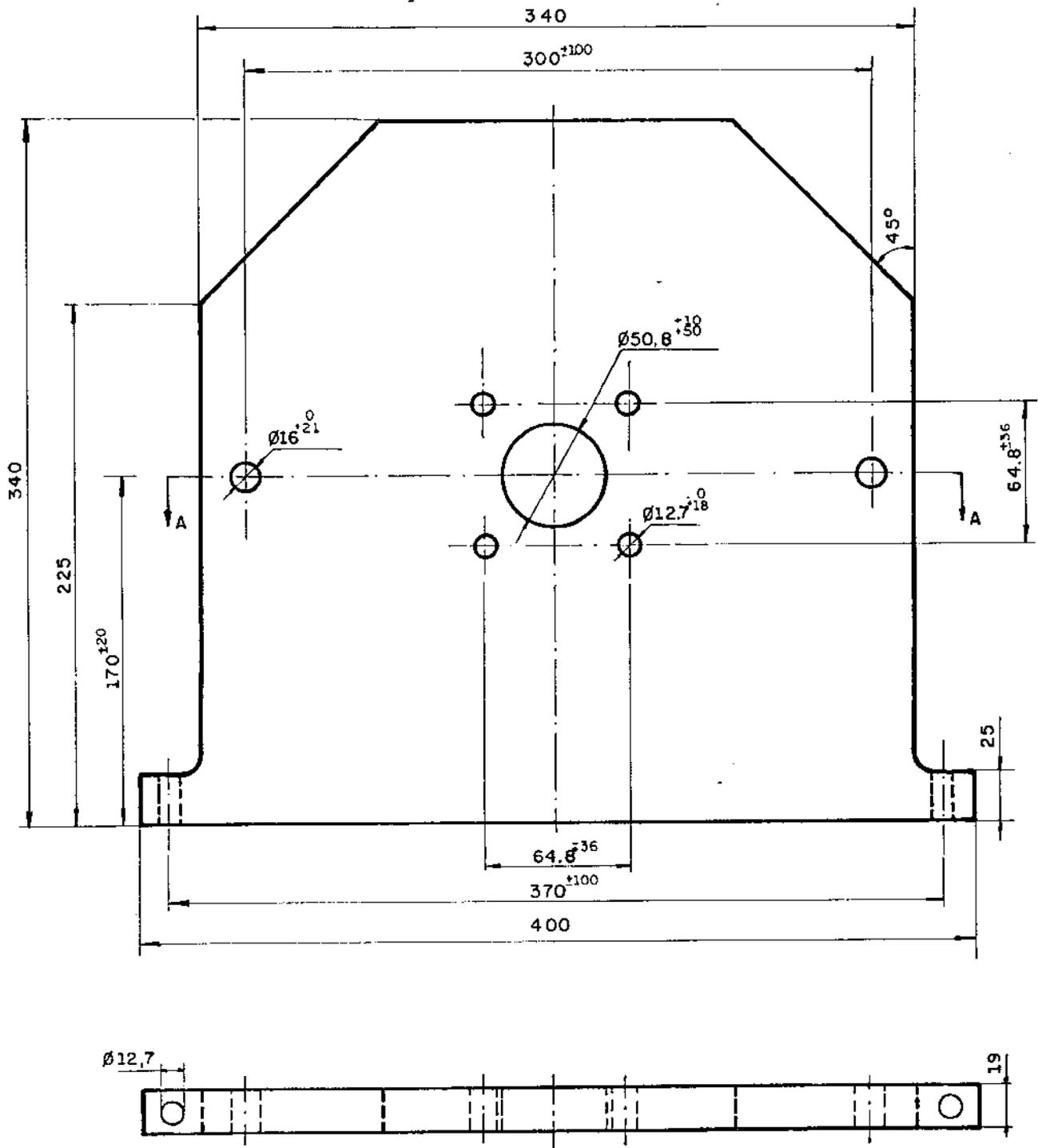
Escala: 1:1

Figura III.5. - Conjunto matriz/porta-matriz



Material: Aço ABNT 1020  
 Escala: 1:1

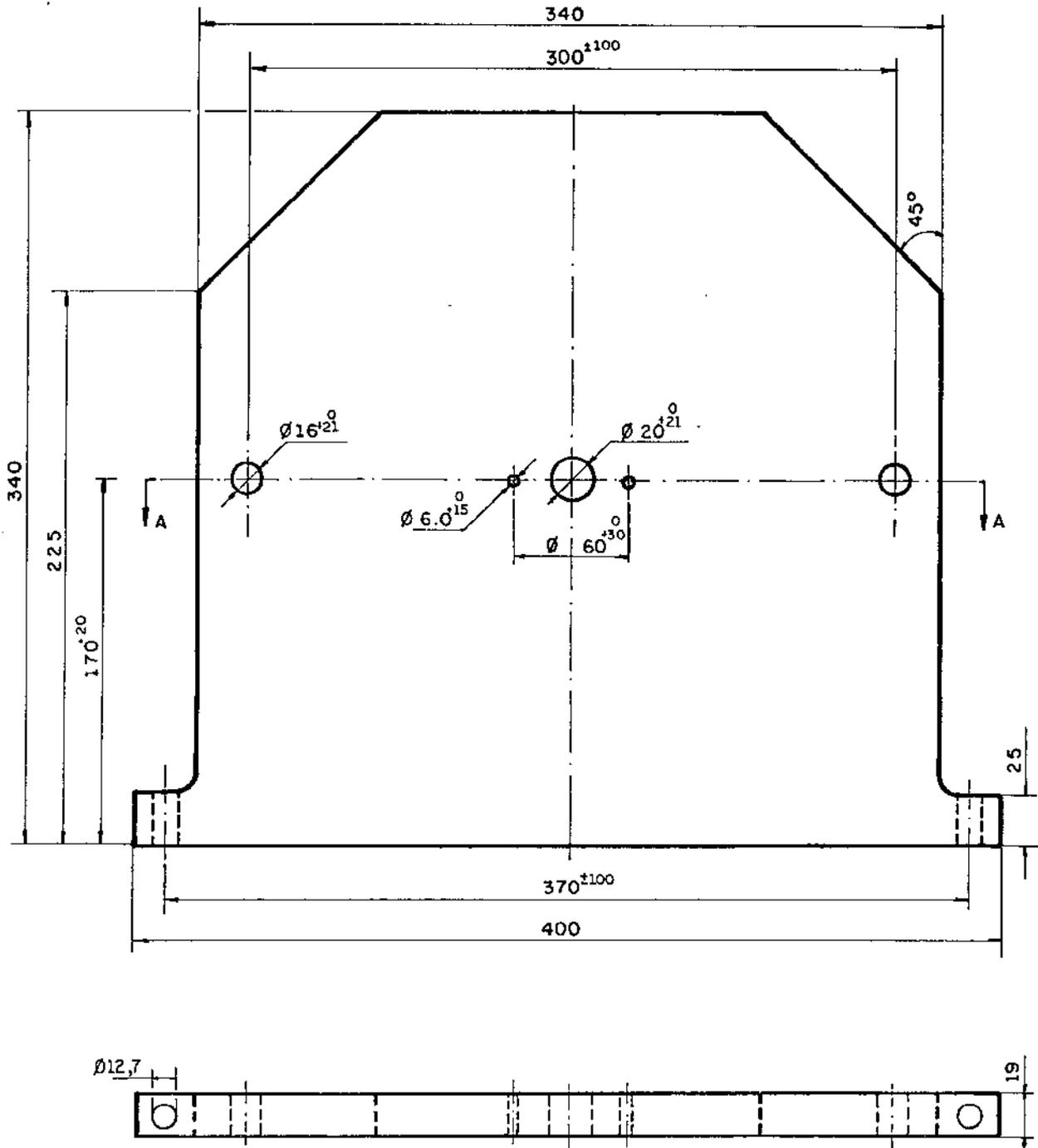
Figura III.6. - Apôio



Material: Aço ABNT 1020

Escala: 1:3

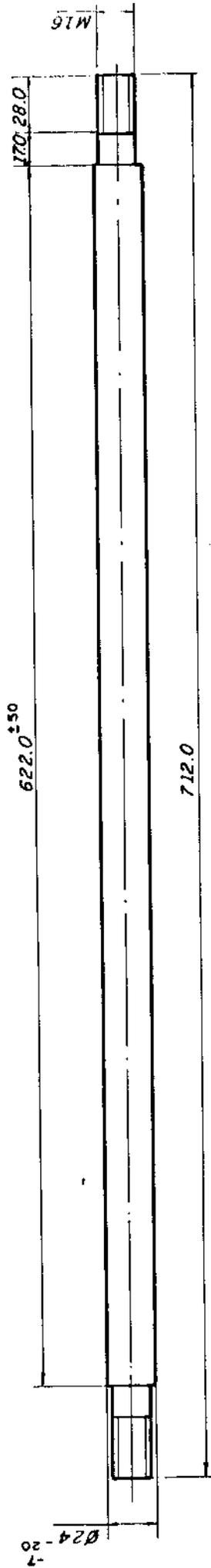
Figura III.7. - Placa porta - cilindro hidráulico



Material: Aço ABNT 1020

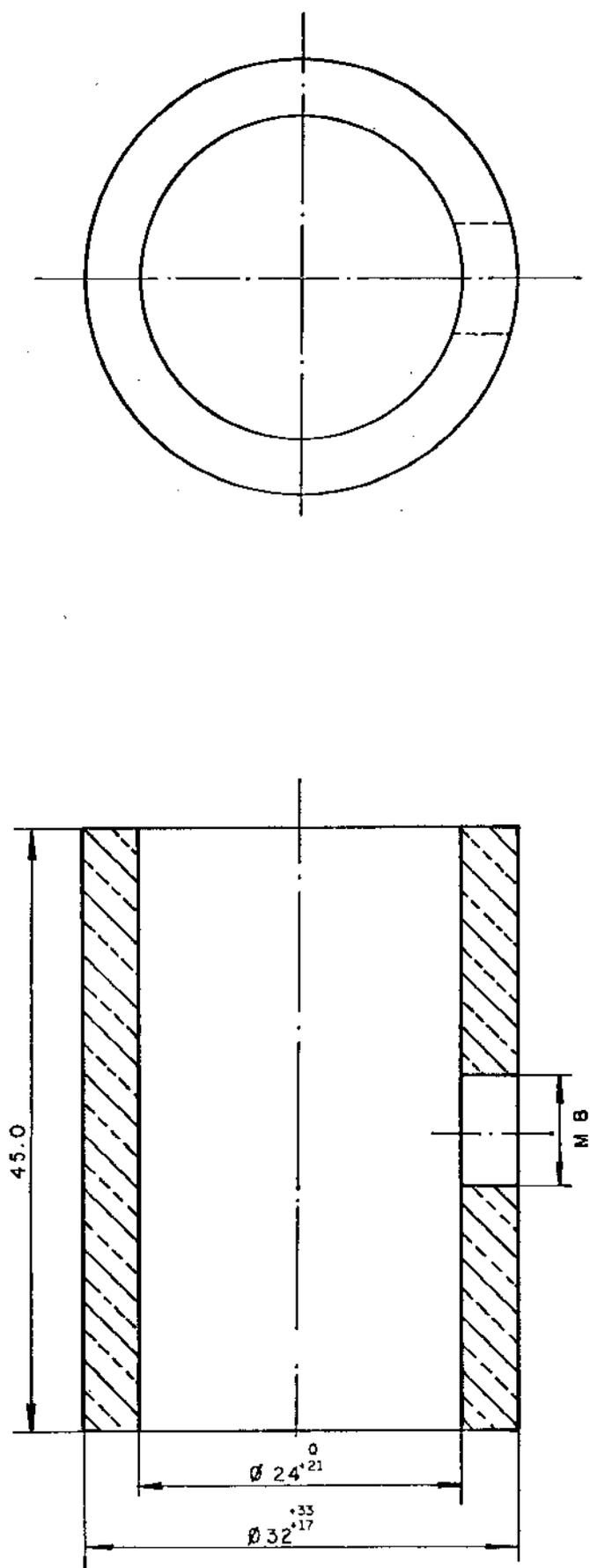
Escala: 1:3

Figura III.8. - Placa porta-matriz



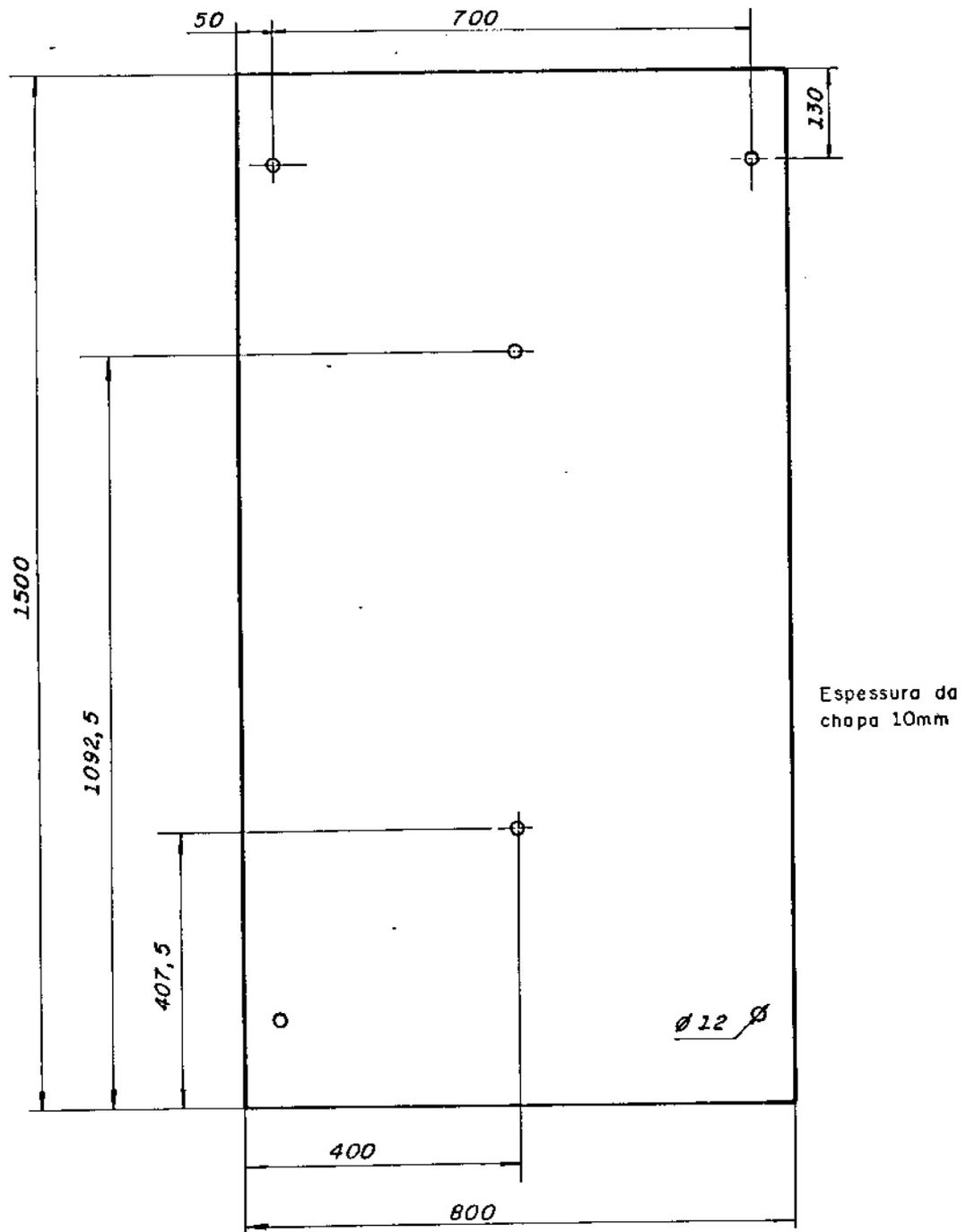
Material: Aço ABNT 1045  
 Escala: 1:3  
 Quantidade: 2 peças

Figura III.9. - Guia



Material: Bronze  
Escala: 2:1  
Quantidade: 6 peças

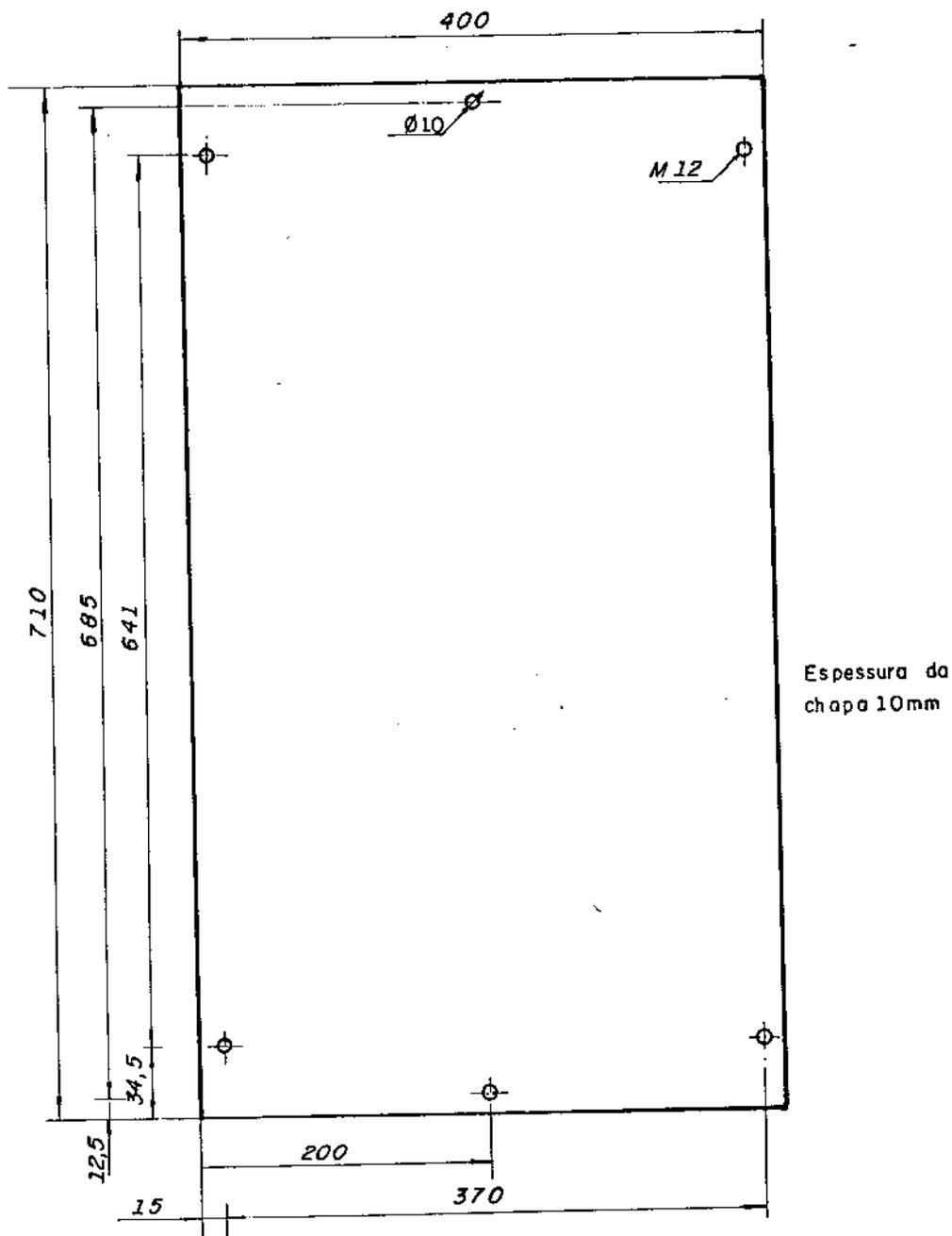
Figura III.10. - Bucha



Material: Aço ABNT 1020

Escala: 1:100

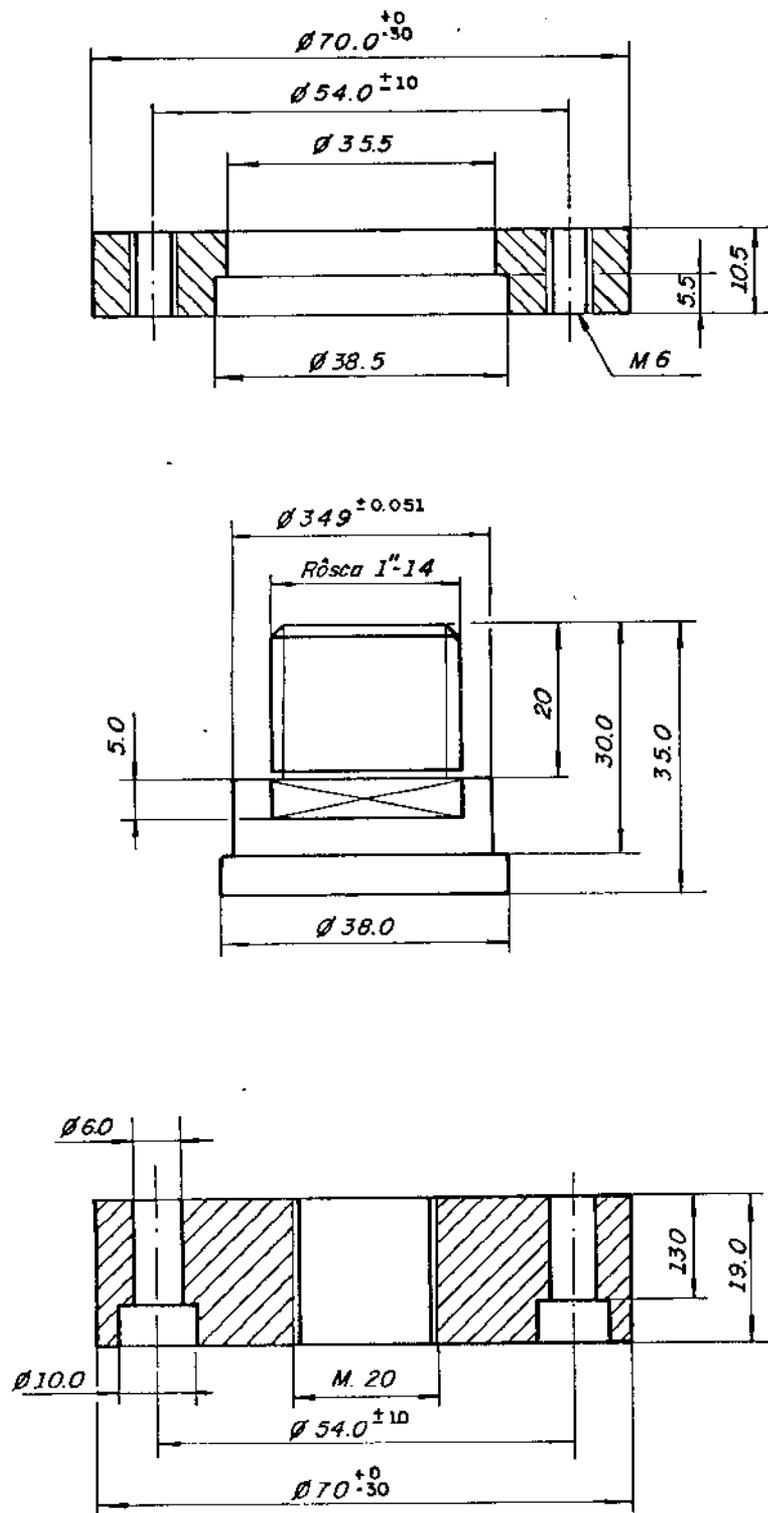
Figura III.11. - Chapa da mesa



Material: Aço ABNT 1020

Escala: 1:50

Figura III.12. - Base



Material: Aço ABNT 1020

Escala: 1:1

Figura 111.15. - Conjunto porta-punção

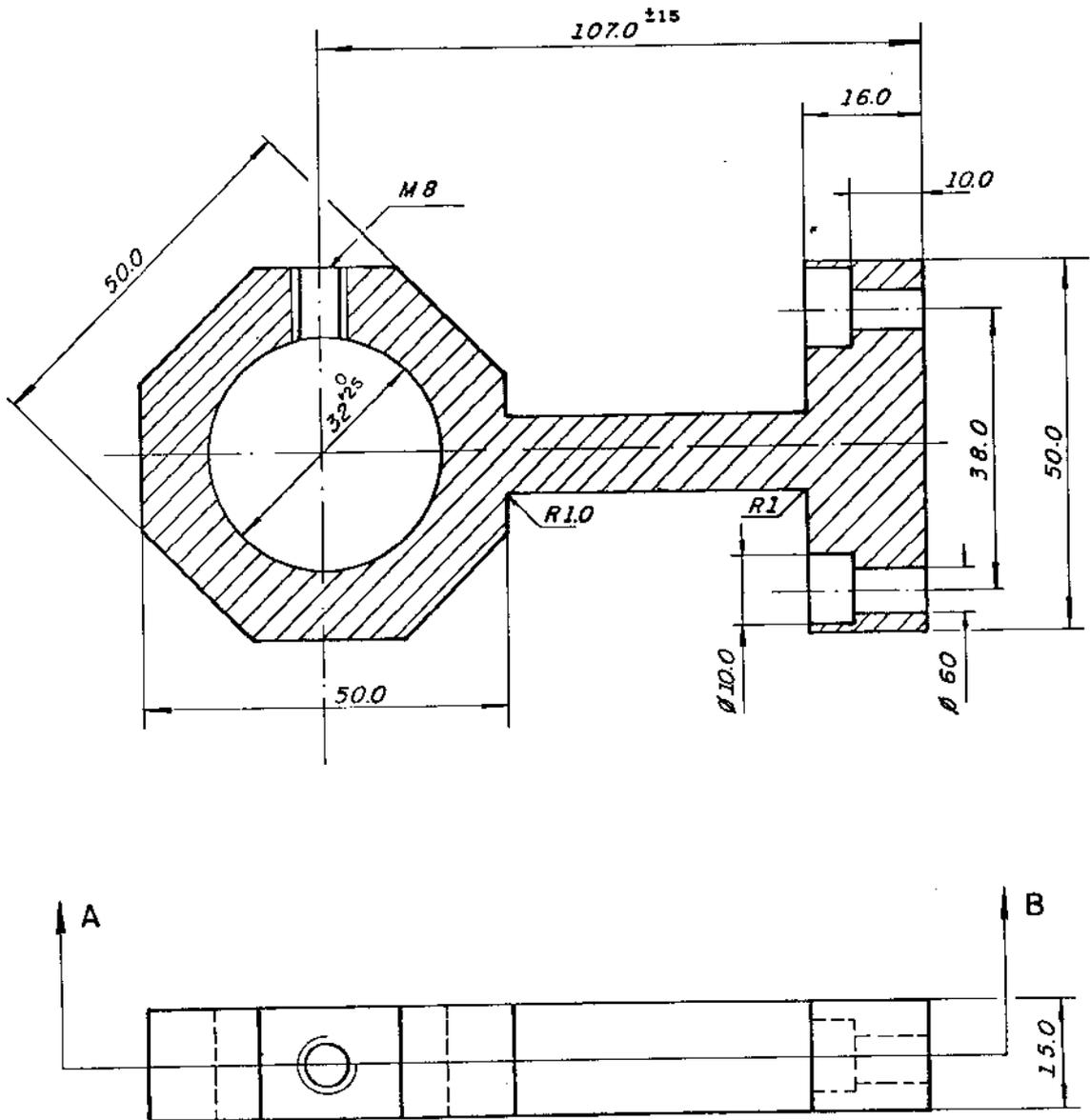
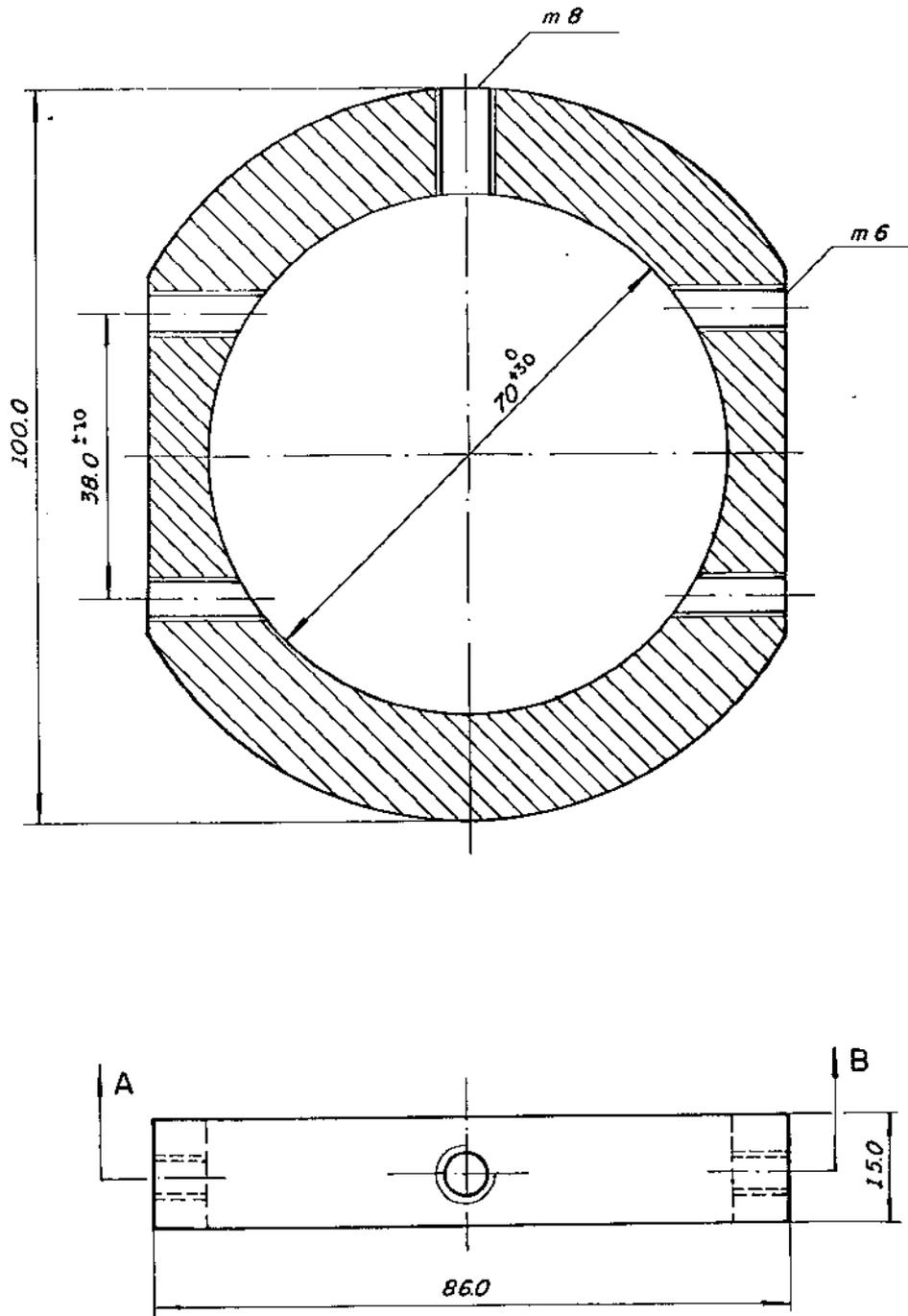


Figura III.14(a). - Suportes do recipiente e do porta-punção

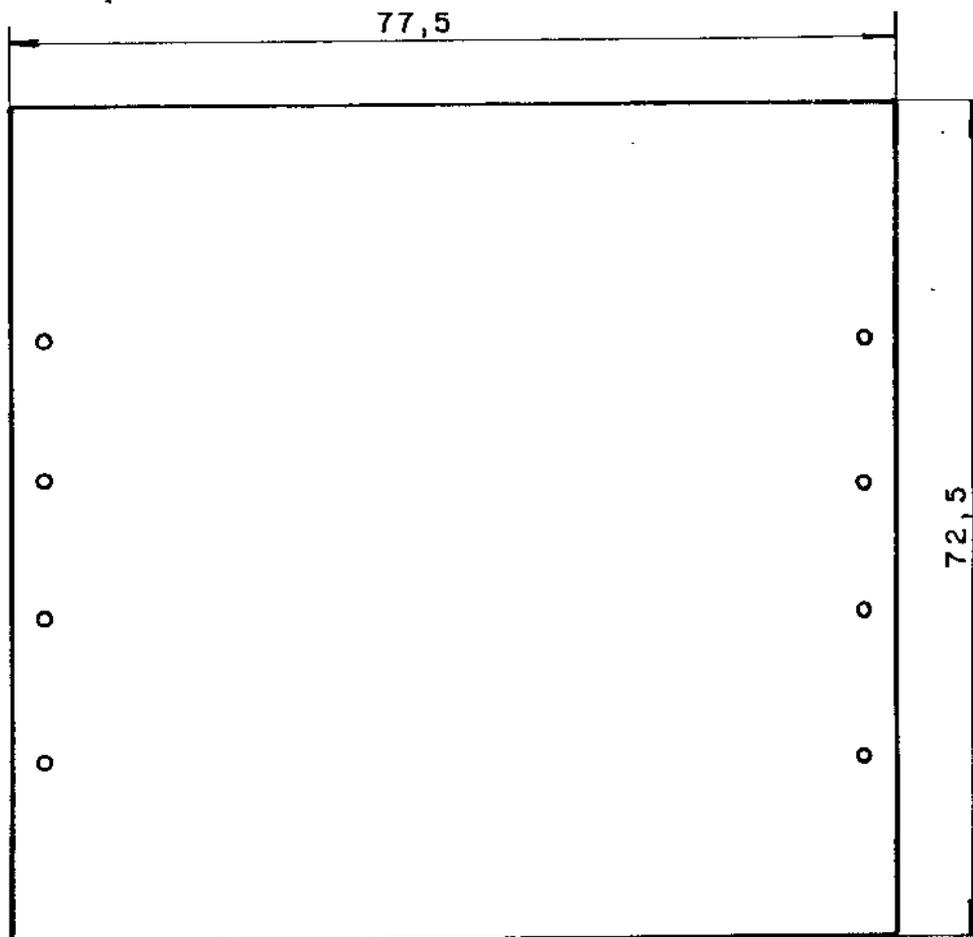


Material: Aço ABNT 1020

Escala: 1:1

Quantidade: 3 conjuntos

Figura III.14(b). - Suportes do recipiente e do porta-punção



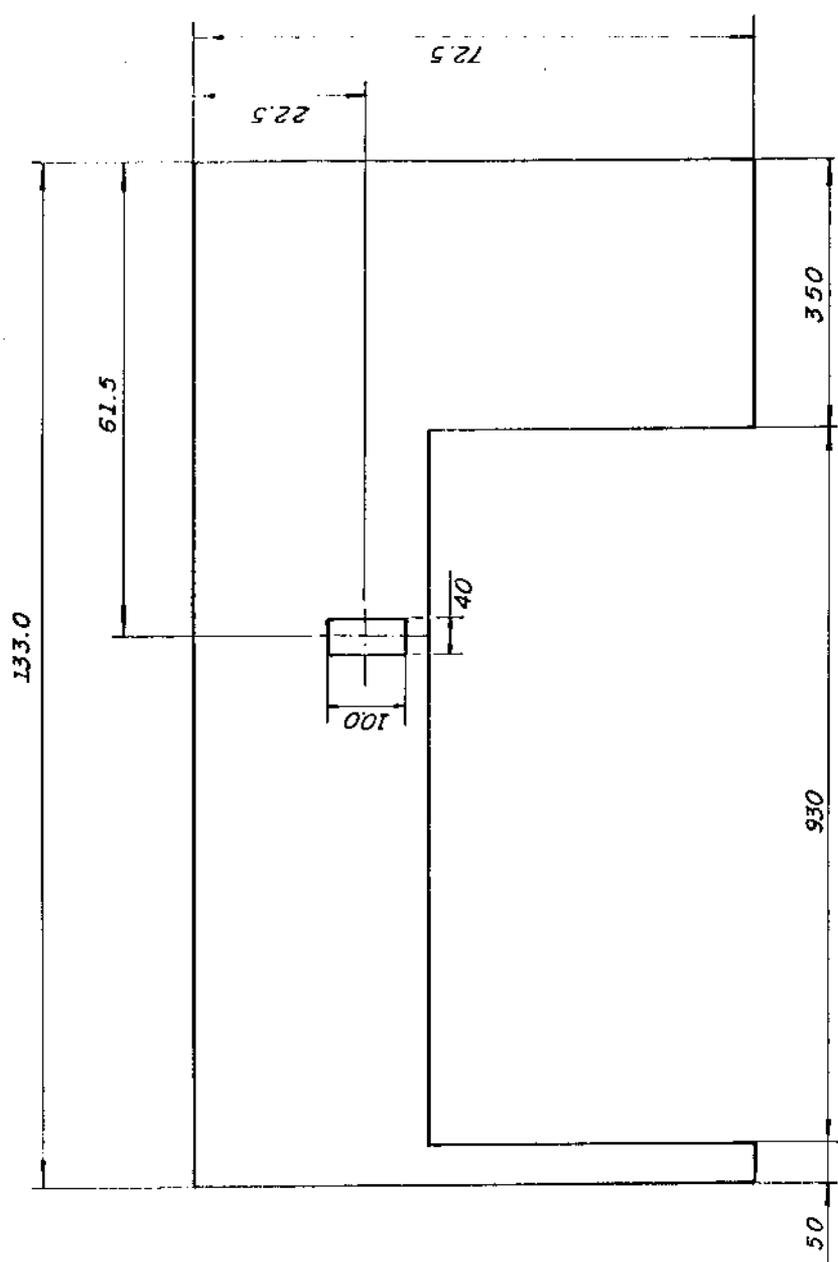
Espessura da  
chapa de 1,5mm

Material: Aço ABNT 1020

Escala: 1:7

Quantidade: 2 peças

Figura III.15. - Chapa lateral



Material: Aço ABNT 1020

Escala: 1:10

Figura III.16. - Chapa frontal

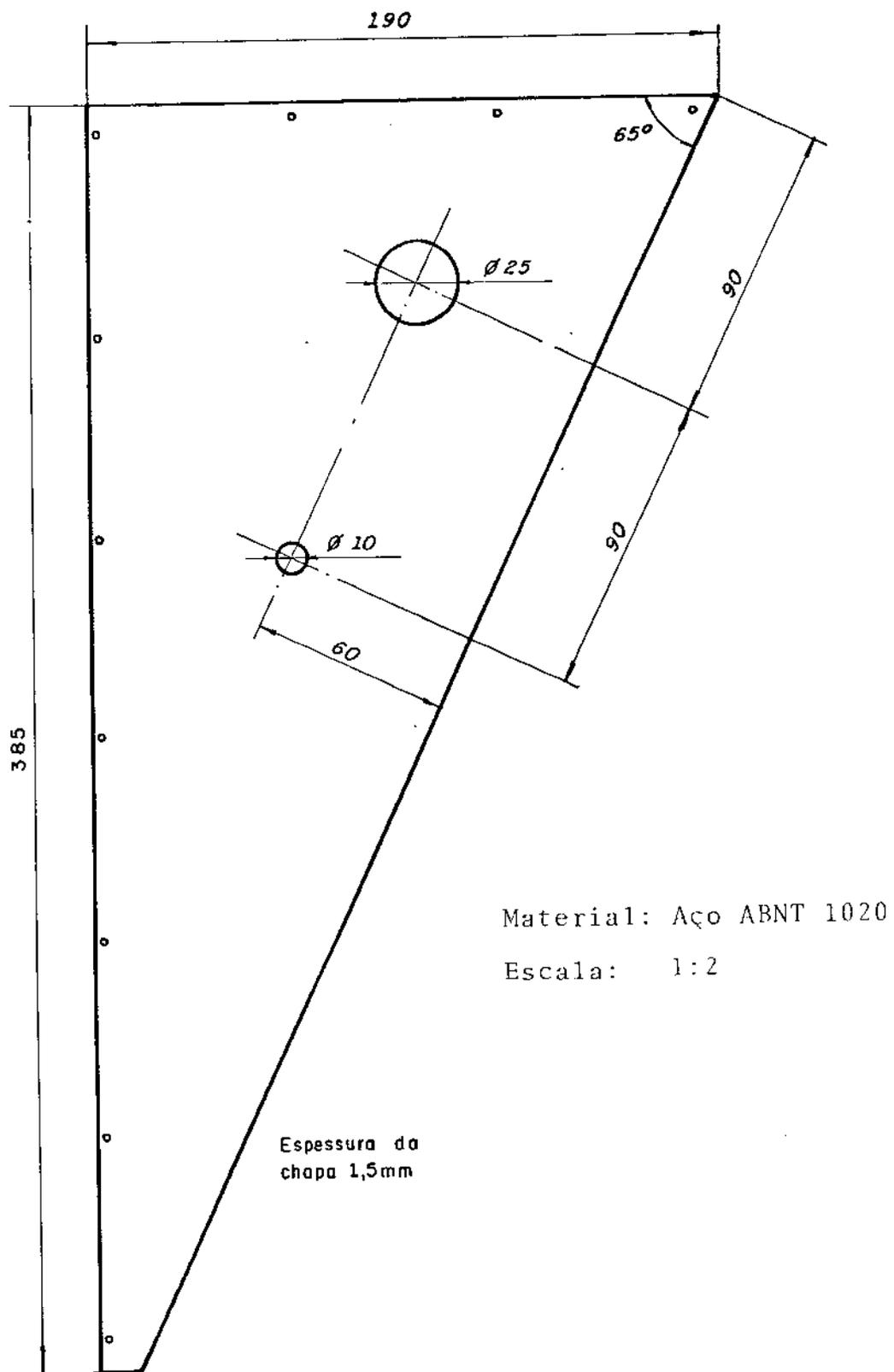


Figura III.17. - Chapa lateral direita do painel

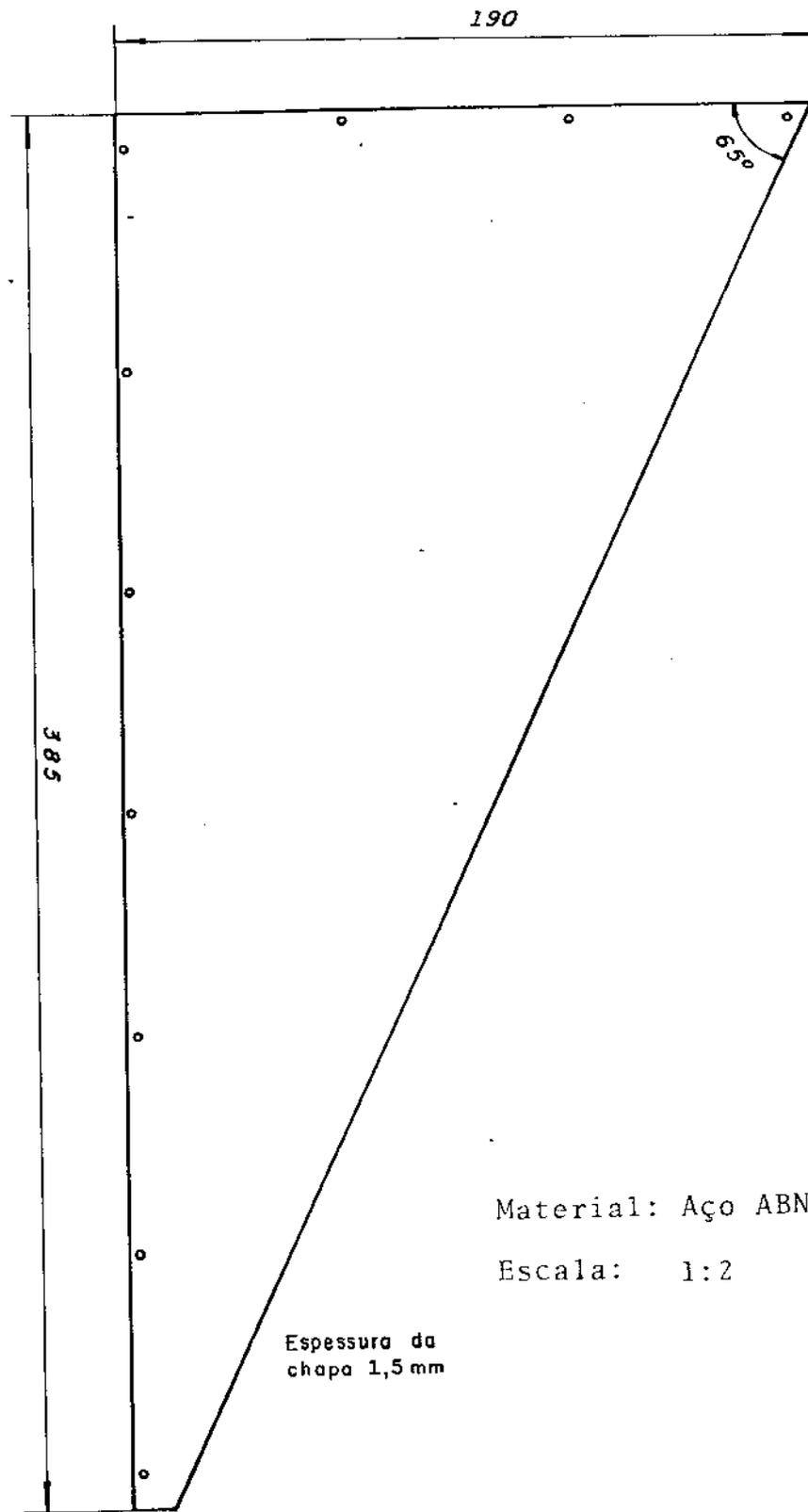
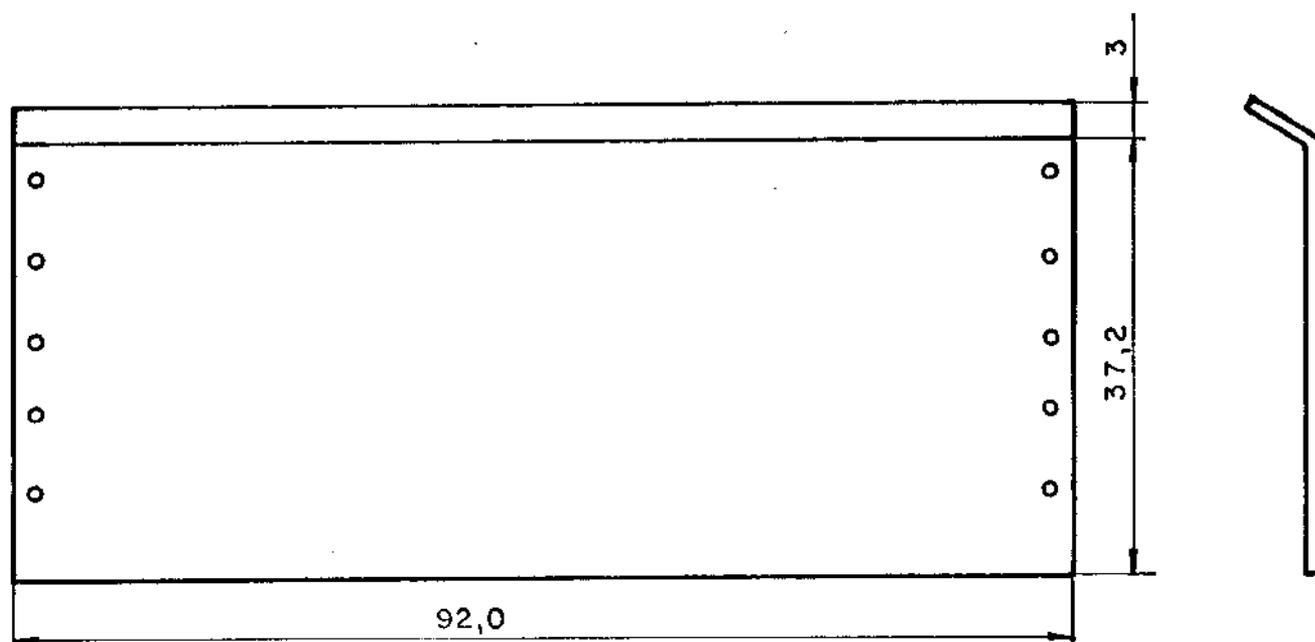


Figura III.18. - Chapa lateral esquerda do painel

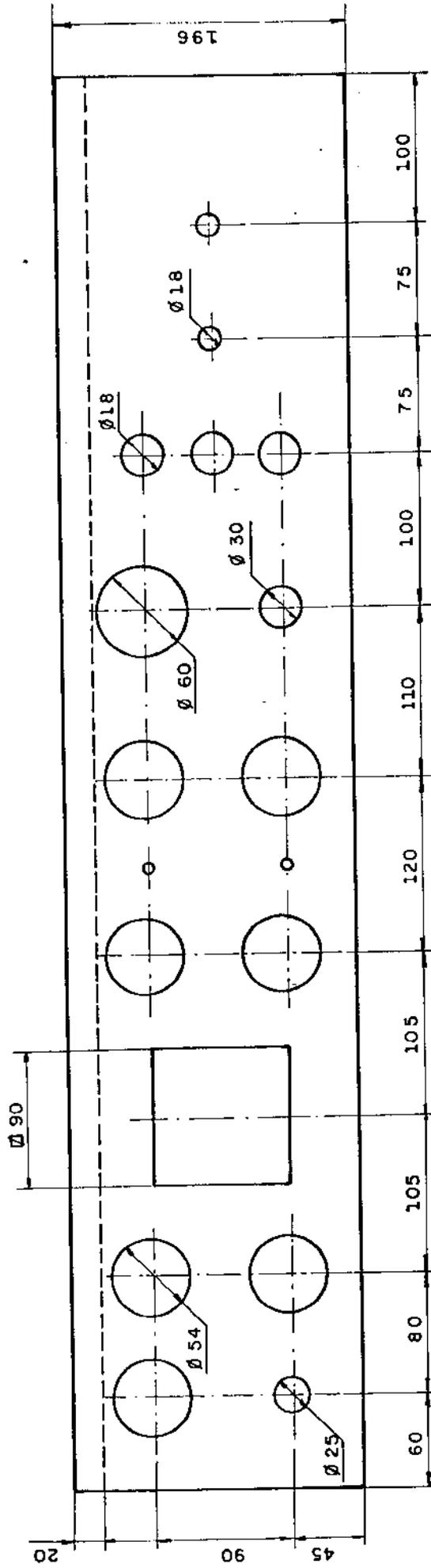


Espessura da  
chapa 1,5mm

Material: Aço ABNT 1020

Escala: 1:7

Figura III.19. - Chapa inferior do painel

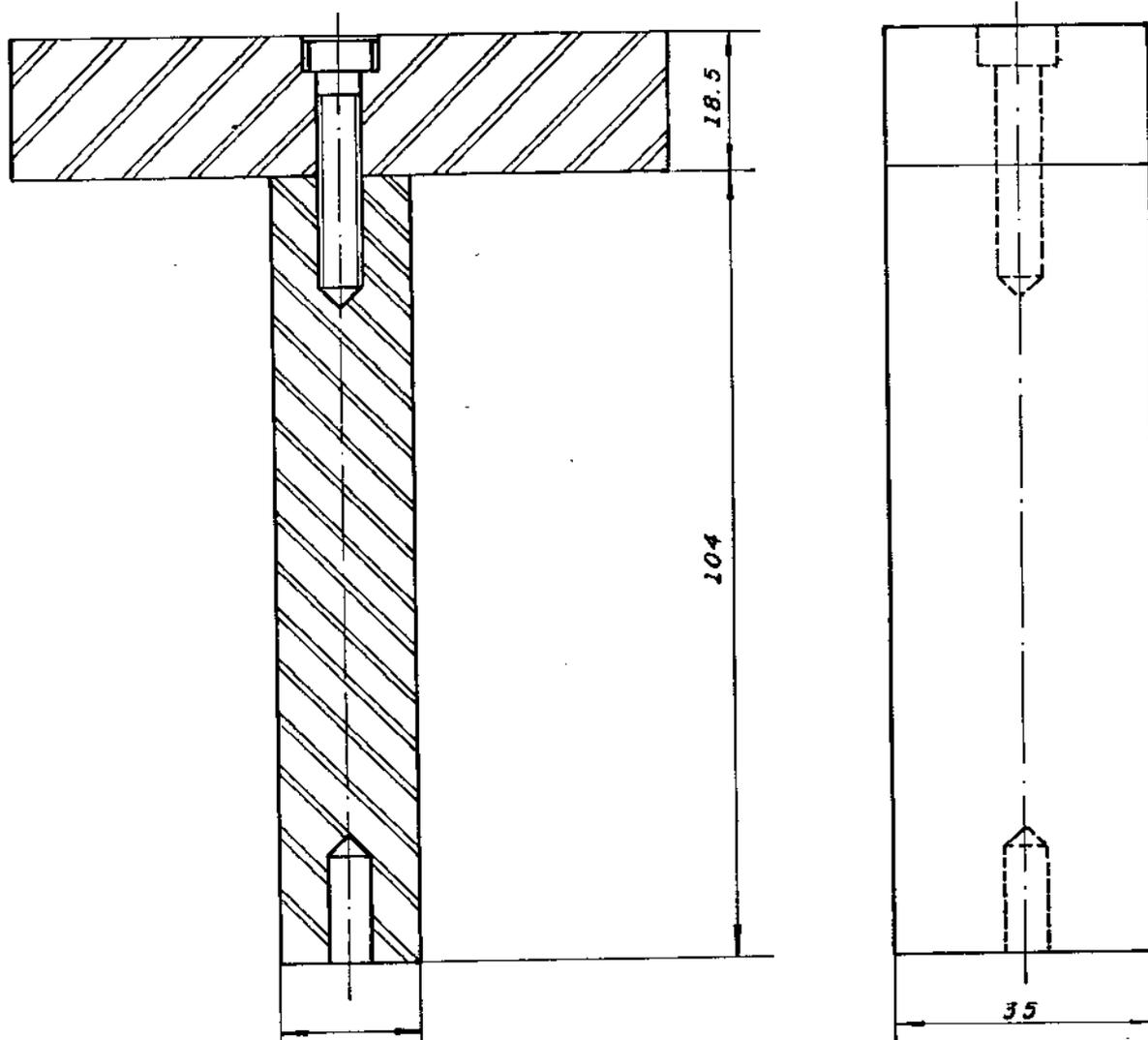


Material: Aço ABNT 1020

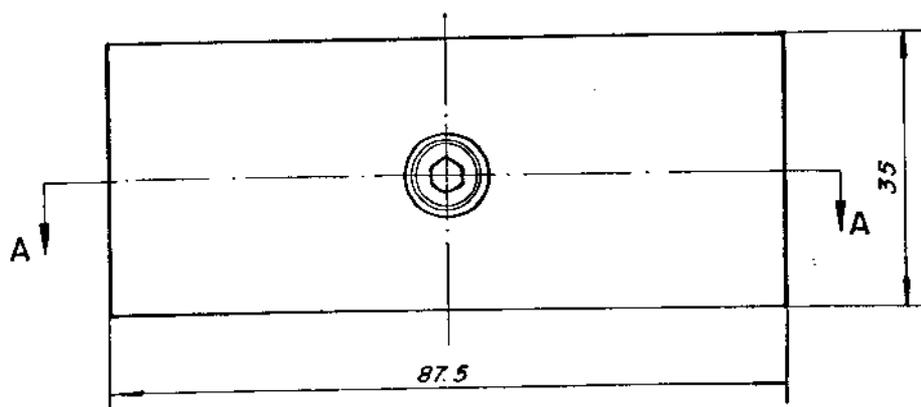
Escala:

Figura III.20. - Chapa do painel

Parafuso  
hallow 1/4" x 1"



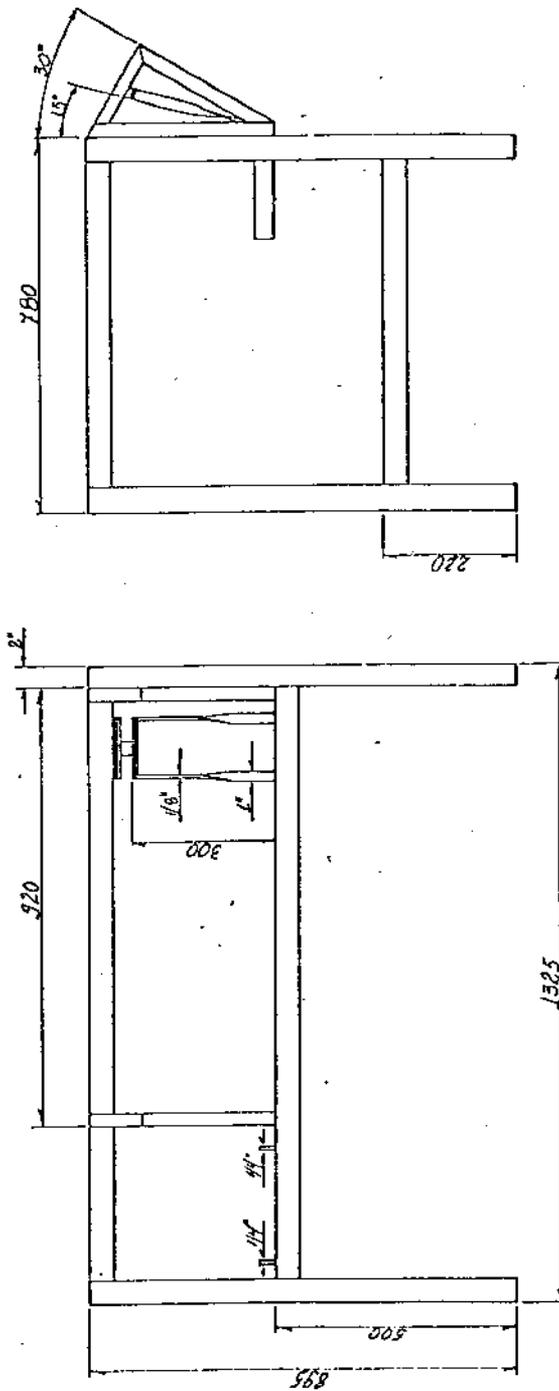
CORTE AA



Material: Aço ABNT 1020

Escala: 1:1

Figura III.21. - Suporte do cilindro hidráulico



Material: Aço ABNT 1020  
Escala: 1:10

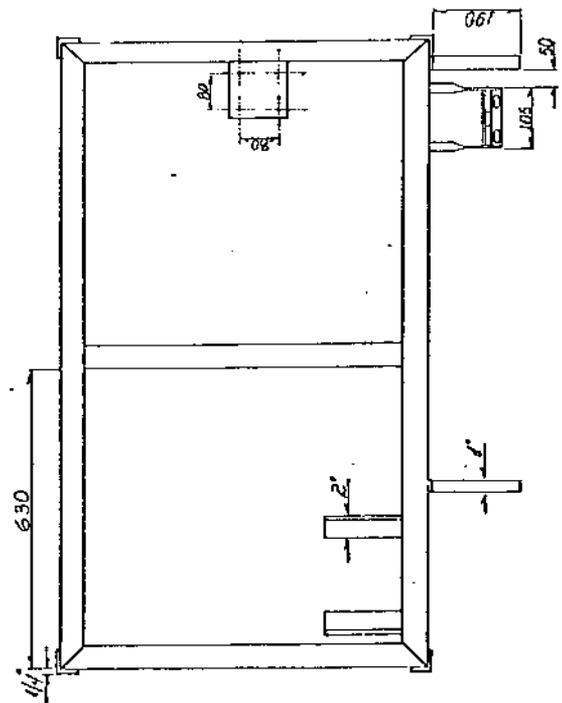


Figura III.22.-Estrutura da mesa

Com relação aos demais componentes estruturais, devido as baixas solicitações mecânicas a que estão submetidos, foram dimensionados levando-se em consideração as proporções das dimensões com relação as dimensões dos componentes anteriormente dimensionados.

(v) Especificação de Sistemas

SISTEMA DE AQUECIMENTO

O sistema de aquecimento tem por finalidade elevar e manter o recipiente de extrusão na temperatura de trabalho.

O sistema está esquematizado na figura III.23, e os componentes estão assim especificados<sup>(10-13)</sup>:

- Termo-elemento:	Marca	: RESILUX
	Modelo	: 110-RCC
	Dimensão:	Ø 70 x 100 mm
	Potência:	1 KW
	Tensão	: 230 V
- Controlador de Temperatura:	Marca	: ENGRO
	Modelo	: 6300
	Sensor	: TR
	Medidor	: M
	Tipo de Controle:	PI
	Escala	: 0/500
	Calibra- dor:	PT 100

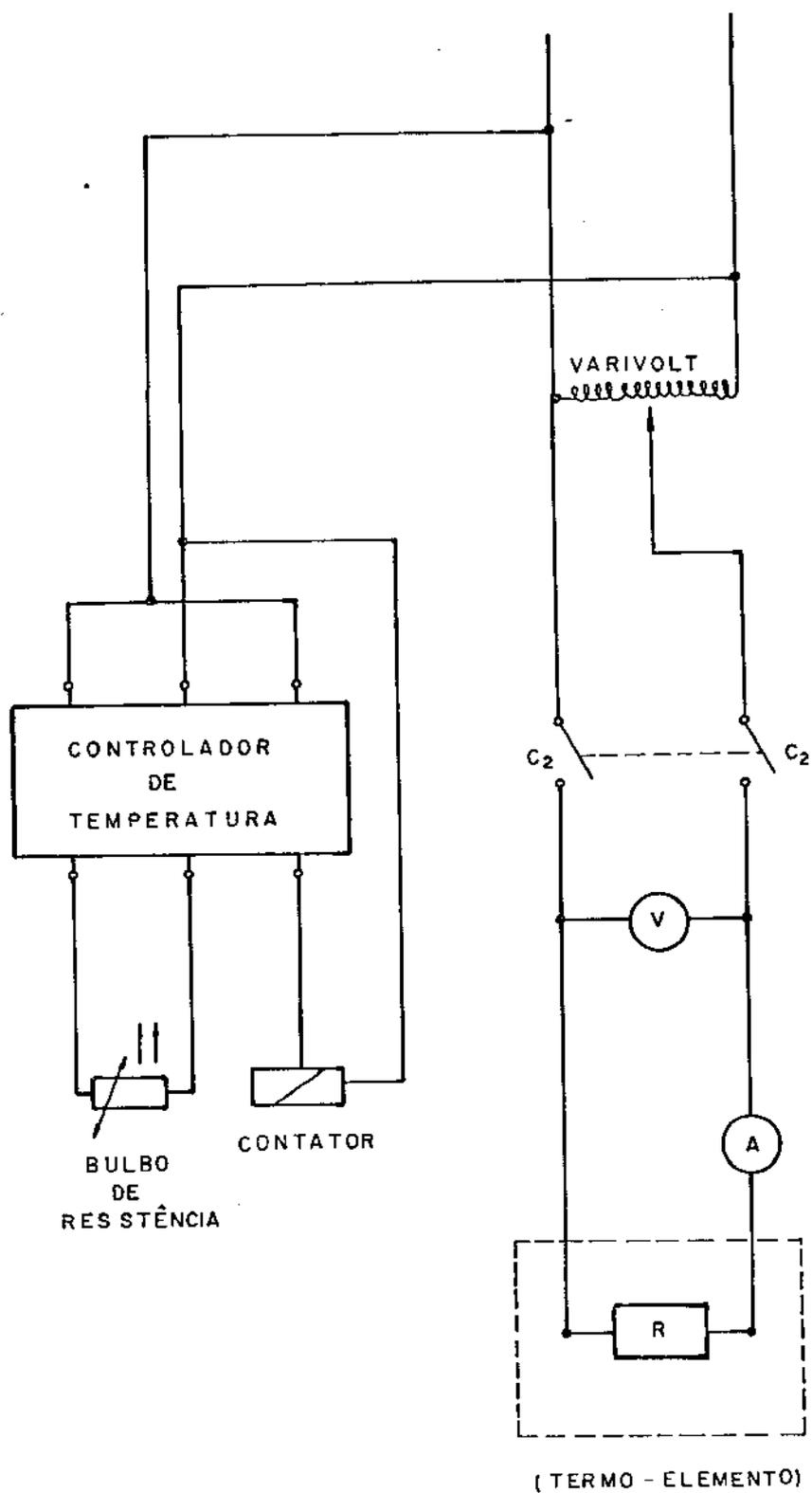


Figura III.23. - Sistema de aquecimento

Alimentação: 220 VCA-60Hz

- Variador de Tensão:

Marca: VARIVOLT  
Modelo: VM-230  
Potência máxima: 3 KVA  
Corrente máxima: 12,5 A  
Tensão de entrada: 220 V  
Tensão de saída: 0 - 240 V  
Dimensões: Ø 35 x 25 cm

- Contador:

Marca: TELEMECANIQUE  
Modelo: LC1 - D253

- Voltímetro:

Marca: LIER  
Modelo: Tipo 65  
Escala: 0 - 250 V

- Amperímetro:

Marca: LIER  
Modelo: Tipo 65  
Escala: 0 - 30 A

O aquecimento do recipiente de extrusão é do tipo

resistivo, através de um termo-elemento, ou seja, a resistência elétrica esta colocada dentro de um material cerâmico refratário que é envolvido por uma carcaça metálica.

O controle da temperatura de extrusão é efetuado por um controlador de temperatura analógico. Esse controlador é constituído basicamente de três blocos principais: circuito de entrada do sinal, circuito de realimentação e circuito de saída de controle. O tipo de controle utilizado é o proporcional integral (PI), ajustável externamente.

O controlador recebe um sinal de entrada, enviado através de um sensor (bulbo de resistência) que está em contato com o recipiente aquecido, e o compara com um sinal de temperatura pré-fixado pelo operador da máquina. Em função do resultado dessa comparação, o controlador envia um sinal de saída para o contator, ligando ou desligando o termo-elemento, mantendo assim a temperatura de extrusão próxima ao valor desejado, de cerca de  $\pm 5^{\circ}\text{C}$ . No entanto, se a alimentação elétrica do termo-elemento for de tensão mais alta, o aumento inicial da temperatura será mais rápido, enquanto que um controle preciso da temperatura de regime será mais difícil. Disso decorre a função do variador de tensão; esse equipamento permite a regulagem da tensão de alimentação do termo-elemento, podendo assim o operador decidir entre um aquecimento inicial mais rápido ou um controle mais apurado da temperatura de extrusão. Para melhor controle de tensão e corrente de saída do variador de tensão são utilizados, respectivamente, um voltímetro e um amperímetro.

### SISTEMA HIDRÁULICO

O sistema hidráulico foi especificado para desenvolver a pressão de no máximo 140 atm., o que corresponde a força de 4436 kgf, considerando-se a área do pistão do cilindro hidráulico.

Por ser destinado ao emprego em laboratório, é um sistema especial onde não são utilizados certos componentes como por exemplo, o radiador para refrigeração do fluido hidráulico.

O sistema está representado esquematicamente na figura III.24, e os componentes estão assim especificados, segundo o catálogo do fornecedor<sup>(14-16)</sup>:

<u>COMPONENTES</u>	<u>MODELO</u>
Motor elétrico:	5HP - 1200RPM - VI POLOS - B-5
Acoplamento:	UC - DG - 42 - PB
Bomba:	V214 - 3 - 1C - 12 - S214
Tanque:	T-10
Bocal com filtro de ar:	UC - AB - 1380 - 90
Visor com medidor de temperatura:	UC - FLT - 1314

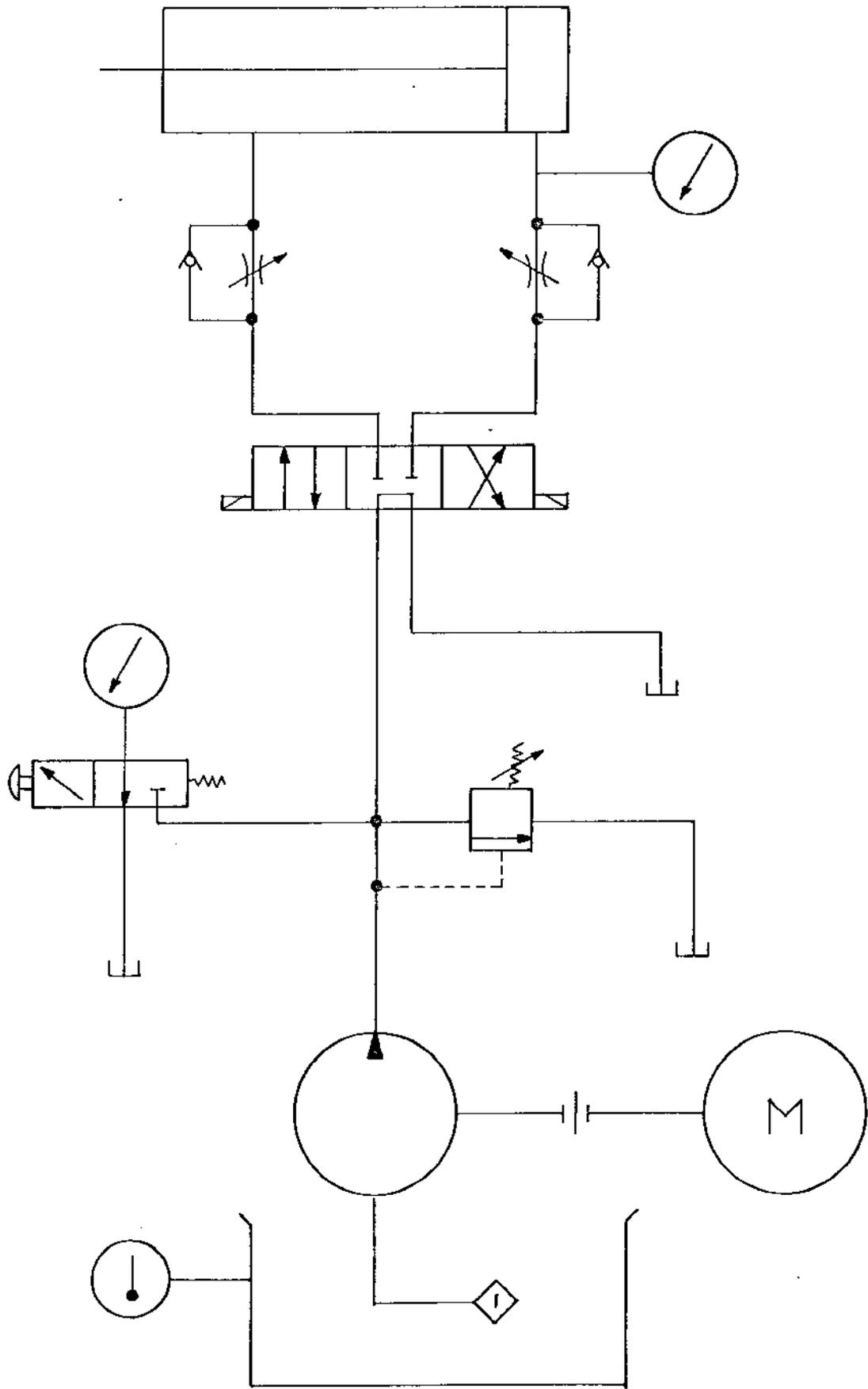


Figura III.24. - Sistema hidráulico

<u>COMPONENTES</u>	<u>MODELO</u>
Válvula de segurança:	CT - 06 - C - 40
Isolador:	UC - GI - 1486
Manômetro:	UC - PG - 1421 - 2000
Manômetro:	WRH - 100 - GL - 1 - 150 - 1/2 BSP
Válvula Direcional:	DG 4S4 - 018C - 50
Sub-Placa:	DGSM - 01X - 10
Válvulas de Fluxo:	FN - 03 - 20
Cilindro hidráulico:	W - 30 - TR - NC - ICV(1 e 5) 2 1/2" x 10"

As especificações das tubulações e conexões são<sup>(17)</sup>:

Tubos: TN 160 130  
TN 08.0 05.0

<u>CONEXÃO</u>	<u>QUANTIDADE</u>	<u>COMPONENTE</u>
UMA 16x3/4 NPT	01	Tanque
UMA 8x1/4 NPT	01	Tanque

<u>CONEXÃO</u>	<u>QUANTIDADE</u>	<u>COMPONENTE</u>
JMA 16x3/4 NPT	02	Válvula de segurança
JMA 8x1/4 NPT	01	Válvula de segurança
UMA 16x3/4 NPT	04	Válvula direcional
JMA 16x1/2 NPT	04	Válvula de fluxo
TVLA 16	01	Manômetro
AFA 16x1/2 BSP	01	Manômetro
UMA 8x1/4 NPT	01	Isolador
JMA 3x1/4 NPT	01	Isolador
JMA 16x3/4 NPT	02	Cilindro hidráulico

e a do fluido hidráulico é<sup>(18)</sup>: Castrol HYPIN AWS 46 (viscosidade 150 - 300 SSU à 100F).

O motor elétrico está conectado através de um acoplamento, a uma bomba simples de palhetas balanceada hidráulicamente, o que elimina as cargas dos mancais induzidas pela pressão proporcionando vida mais longa, menor manutenção e força total para toda vida de serviço da bomba. O fluido hidráulico é captado por essa bomba através de um filtro de suc

ção localizado no tanque com capacidade total para armazenar 38 litros. Nesse tanque estão também montados um bocal de preenchimento com filtro de ar e um visor de nível com medi dor de temperatura.

O fluido, após ser bombeado, passa através de uma válvula de segurança. É uma válvula normalmente fechada, situada entre a linha de pressão (saída da bomba) e o tanque, cuja função é a de limitar a pressão no sistema a um ajuste máximo predeterminado, pelo desvio de uma parte ou de toda a vazão da bomba no tanque quando o ajuste da válvula é alcançada. Essa válvula é do tipo composta, ou seja opera em dois estágios. O estágio piloto no corpo superior contém a válvula limitadora de pressão, e um pequeno pistão é mantido no assento por uma mola ajustável. Os pórticos se encontram no corpo inferior, e o desvio do fluxo total é conseguido devido ao deslocamento de um pistão balanceado, localizado nesse corpo.

Instalado em um dos pórticos da válvula de seguran ça, está um dos manômetros. Esse é do tipo Bourbon, conectado a uma válvula com amortecedor, para poder abrir ou fechar a passagem do fluido (isolador). Essa válvula prolonga a vida de serviço do manômetro isolando-o do sistema quando não há necessidade de leitura de pressão. O amortecedor impede a oscilação do manômetro e o protege contra os picos de alta pressão. Esse manômetro registra a pressão que é pre-estabeleci da pelo operador, na válvula de segurança.

Da válvula de segurança o fluxo vai em direção a válvula direcional que tem a finalidade de controlar a dire-

ção do fluxo; isto é, ela controla para onde o fluxo deverá ser encaminhado, fechando ou abrindo passagens em posições de finidas. É uma válvula do tipo carretel deslizante, construída para operar com solenoides. As conexões para os p<sup>o</sup>rticos são através de uma sub-placa, permitindo a fácil remoção do corpo para manutenção ou substituição. Os solenoides são unidades a parte, do tipo que empurra o carretel e são aparafusados nas extremidades do corpo da válvula que é construída para funcionar em três posições. O controle direcional da vazão do fluido é feito por ativamento alternativo de cada solenoide e para bloquear ou fazer circular a vazão do fluido quando ambos os solenoides não recebem corrente. No modelo utilizado isso é feito com o bloqueio do fluxo das conexões do cilindro hidráulico, permitindo a recirculação das conexões da bomba para o tanque.

Da válvula direcional o fluxo passa por uma válvula controladora de volume ou de fluxo, com a finalidade de regular a velocidade de avanço do pistão e por conseguinte a haste do cilindro hidráulico. A válvula é do tipo não compensadora e é projetada para circuitos que não necessitam compensação térmica ou de pressão. O pistão dessa válvula possui entalhes que proporcionam um controle acurado do fluxo em uma direção e passagem reversa livre.

O cilindro hidráulico é do tipo padrão de duplo efeito, ou seja, é operado pelo fluido em ambos os sentidos. Isso significa que pode realizar trabalhos em qualquer dos lados de movimento. Um cilindro desse tipo é também classificado como um cilindro diferencial, por possuir áreas desiguais expostas à pressão durante os movimentos de avanço e

retorno. Essa diferença de área é devida a área da haste, que é fixada ao pistão. Nesse cilindro o movimento de avanço é mais lento que o de retorno, porém exerce uma força maior.

Na entrada do cilindro está instalado o outro manômetro. Esse manômetro diferencia-se do anterior já que a leitura é efetuada continuamente a medida que o pistão hidráulico é solicitado. O amortecimento é feito através de um líquido bastante viscoso (glicerina), no qual as partes internas estão imersa. Através desse manômetro tem-se o registro da pressão de extrusão.

Após a saída do fluxo do cilindro hidráulico, ele é controlado através de uma outra válvula, que regula assim a velocidade de retorno do pistão hidráulico. A seguir o fluxo passa novamente pela válvula direcional e desta retorna ao tanque.

Como parte secundária do sistema hidráulico foram especificados os seguintes instrumentos:

Chave manual trefilar:	Marca:	LOMBARD
	Modelo:	Nº 5
	Potência:	5HP/220V
Chave rotativa:	Marca:	BLINDEX
	Modelo:	20/25
Chave 1 polo 2 posições:	Marca:	MAR-GIRIUS
	Modelo:	CS - 30 - 1D



### 3.2. Fabricação e Montagem

Basicamente a fabricação e a montagem da máquina foram executadas na oficina de apoio do projeto UNICAMP-TELEBRÁS/MGE, nas seguintes etapas:

- fabricação dos componentes estruturais;
- fabricação das ferramentas de extrusão;
- montagem dos componentes estruturais e das ferramentas de extrusão;
- instalação do sistema hidráulico;
- instalação do sistema de aquecimento;
- instalação dos instrumentos de controle e ligações elétricas.

Na fabricação dos componentes estruturais utilizou-se cantoneiras, chapas e barras de aço estruturais e os seguintes equipamentos: torno, plaina, furadeira, lixadeira elétrica e equipamento de soldagem oxi-acetilênica.

Visando-se a proteção contra a oxidação, os suportes, guias e o conjunto porta-punção foram cromados; a estrutura da mesa foi revestida com tinta anti-corrosiva (a base de zarcão); enquanto que os demais componentes, além do revestimento anti-corrosivo, foram pintados com tinta "martelada" para conferir melhor aparência.

As ferramentas de extrusão foram usinadas, a partir de barras de aço VPCW ( Fabricação de Aços Villares S.A.) que apresenta as seguintes características<sup>(19)</sup>: aço para trabalho a quente, com liga de tungstênio, com combinação conveniente de tenacidade e dureza ao rubro; tem alta resistência à formação de trincas causadas por choques térmicos; quando as ferra

mentas são resfriadas em água; e é recomendado para ferramentas que alcançam, em serviço, temperaturas de 250 a 500°C. Esse aço é de fácil usinagem e de tratamento térmico relativamente simples. A excelente tenacidade torna-o também particularmente útil em aplicações que envolvem cargas bruscas. A composição química média, em porcentagem, é a seguinte: C = 0,35, Si = 1,00, Cr = 5,00, Mo = 1,50, W = 1,35 e V = 0,25.

Para a retificação do furo do recipiente procedeu-se da seguinte maneira: após a usinagem preliminar, efetuada com uma broca, o acabamento superficial do furo foi consideravelmente melhorado utilizando-se um alargador, sob condições de baixa velocidade de corte e lubrificação adequada. O acabamento final foi obtido utilizando-se uma mistura de "molikote" e "carburundum" em pó. A mistura foi aplicada sobre a superfície interna do recipiente com o auxílio de uma barra metálica.

O furo da matriz, foi usinado com broca e retificado com a mistura.

Para obter-se as ferramentas de extrusão com as propriedades mecânicas desejadas, elas foram submetidas ao tratamento térmico de têmpera e revenido, da seguinte maneira<sup>(19)</sup>:

Têmpera - as ferramentas foram inicialmente pré-aquecidas lentamente a 840°C e transferidas à um forno mantido a 1000°C; homogeneizadas na temperatura, as ferramentas foram resfriadas em óleo, onde permaneceram até alcançarem cerca de 150°C, para em seguida serem revenidas. Durante o aquecimento procurou-se evitar a descarbonetação superficial usando um banho de sal.

Revenido - as ferramentas foram aquecidas uniformemente à temperatura de 600°C; após a homogeneização da temperatura em toda a secção transversal, as ferramentas foram mantidas durante 1 hora para cada 25 mm de secção. Após as ferramentas terem atingido novamente a temperatura ambiente um duplo revenido, foi, então, efetuado.

A figura III.25, apresenta as características mecânicas do aço VPCW em temperaturas elevadas.

Após a conclusão da fabricação e preparo dos componentes estruturais e das ferramentas de extrusão, efetuou-se a montagem parcial da máquina na seguinte sequência:

- fixação da chapa da mesa, sobre a estrutura da mesa;
- fixação da base sobre a chapa da mesa;
- fixação da placa porta-cilindro hidráulico sobre a base;
- fixação das guias na placa porta-cilindro hidráulico;
- introdução e montagem dos suportes nas guias;
- fixação da placa porta-matriz na outra extremidade da base e fixação das guias nessa placa;
- fixação do porta-matriz na placa correspondente;
- colocação do recipiente nos respectivos suportes.

A instalação do sistema hidráulico constituiu-se na fixação e ligação dos seguintes componentes:

- válvula direcional;
- válvulas controladoras de fluxo;

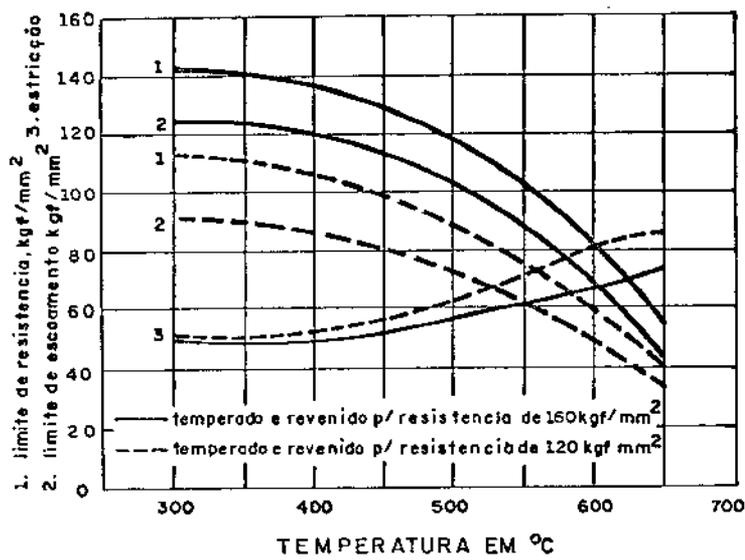


Figura III.25. - Características mecânicas do aço VPCW (20).

- manômetro ; e
- cilindro hidráulico.,

Os demais componentes foram fornecidos montados na forma modular.

Após o posicionamento do módulo (constituído de tanque, motor elétrico, bomba e válvula de segurança) o primeiro componente a ser instalado foi a válvula direcional; ao corpo dessa válvula foi inicialmente fixada a sub-placa onde estão localizadas os p<sup>o</sup>rticos para as conexões e posteriormente, fixada na estrutura. Em seguida procedeu-se a fixação das duas válvulas controladoras de fluxo no suporte especial o qual foi então fixado na estrutura da mesa (no painel). Após a instalação do isolador ao corpo do manômetro esse foi colocado no painel.

O último componente a ser instalado foi o cilindro hidráulico que foi fixado na respectiva placa.

Na segunda fase da instalação do sistema efetuou-se a interligação dos componentes, através de dutos hidráulicos. A geometria dos dutos foram dadas através de um dispositivo manual. Esses dutos foram instalados nos componentes através de conexões apropriadas.

Com relação ao sistema de aquecimento, efetuou-se a fixação no painel do controlador de temperatura e do variador de tensão. O termo-elemento foi fixado em volta do recipiente, enquanto que o contator foi colocado na estrutura da mesa, próximo aos dois primeiros componentes.

Estando montados os componentes estruturais, as ferramentas de extrusão e instalados os sistemas, efetuou-se en-

tão a instalação dos instrumentos no painel de controle, tais como amperímetros, voltímetros, etc, seguindo-se então, a realização das ligações elétricas necessárias, conforme mostra a figura III.26.

Finalmente procedeu-se a regulagem do controlador de temperatura, segundo introduções do fabricante<sup>(21)</sup>, assim como foi introduzido fluido no tanque do sistema hidráulico e testado os sistemas.

As figuras seguintes (III.27-III.33) ilustram diversos aspectos da máquina já montada.



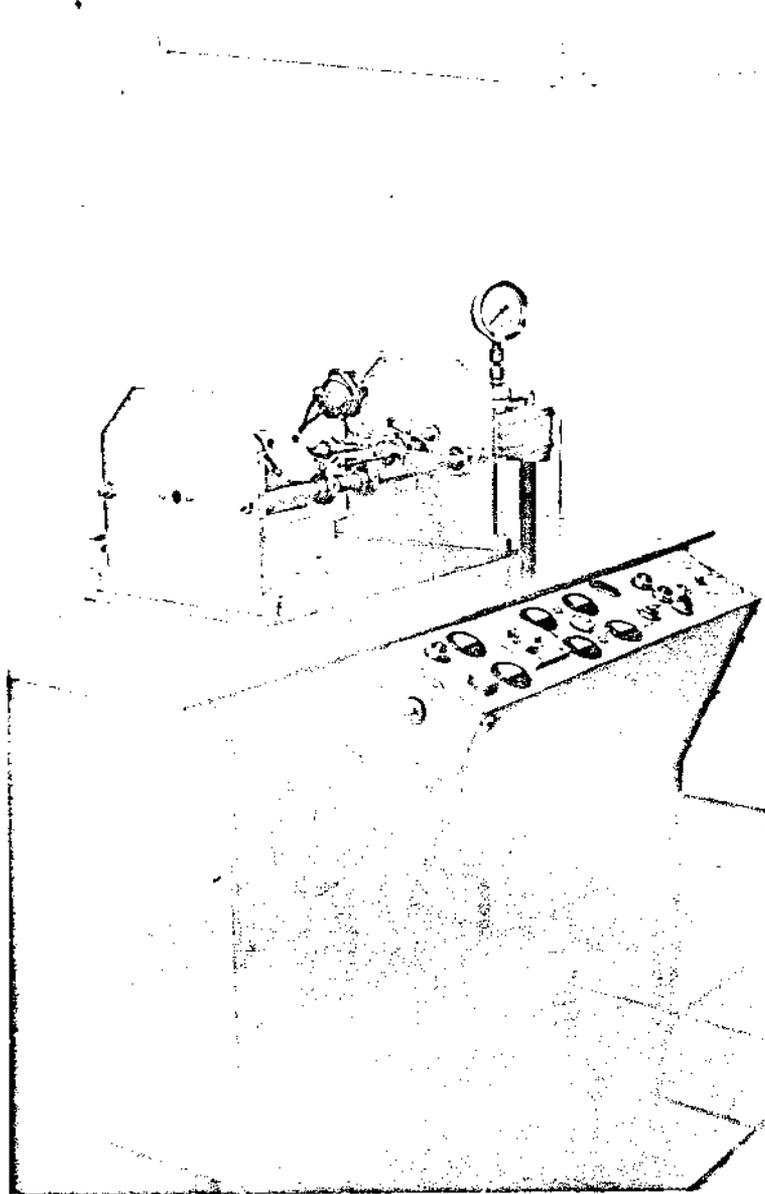


Figura III.27. - Vista geral da máquina extrusora

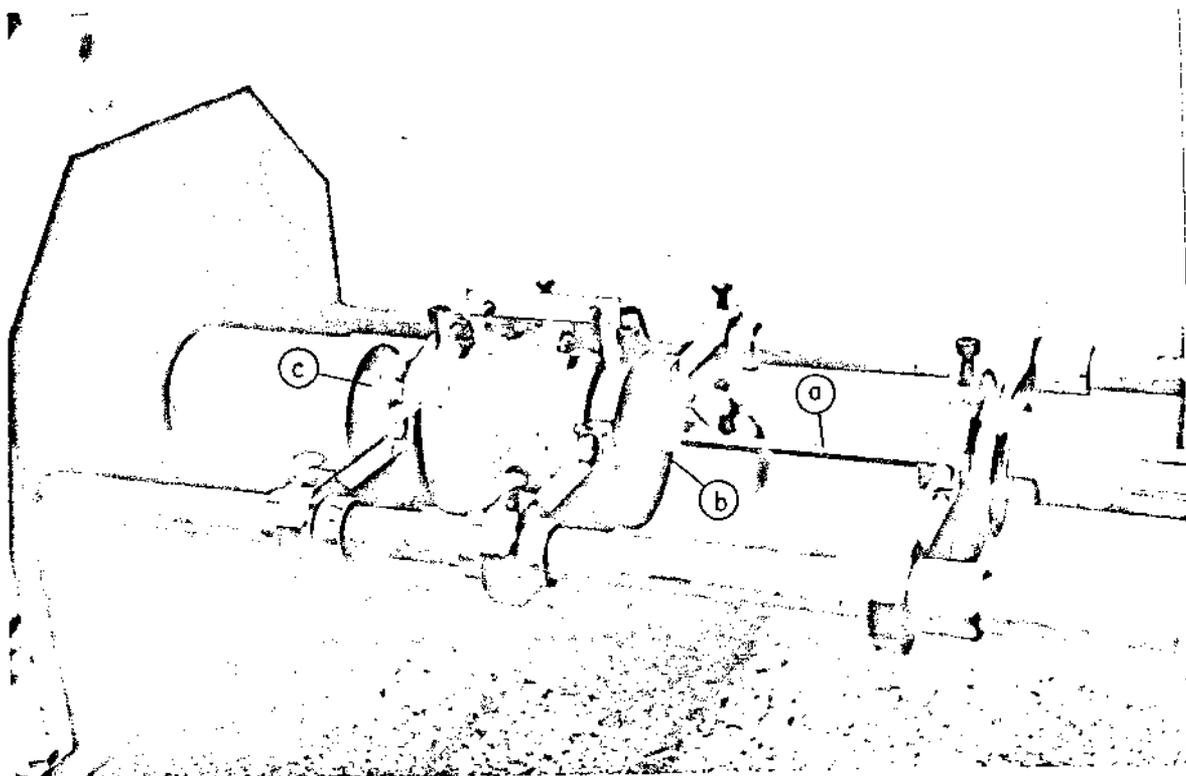


Figura III.28. - Ferramentas de extrusão

(a) punção

(b) recipiente

(c) conjunto matriz/porta-matriz

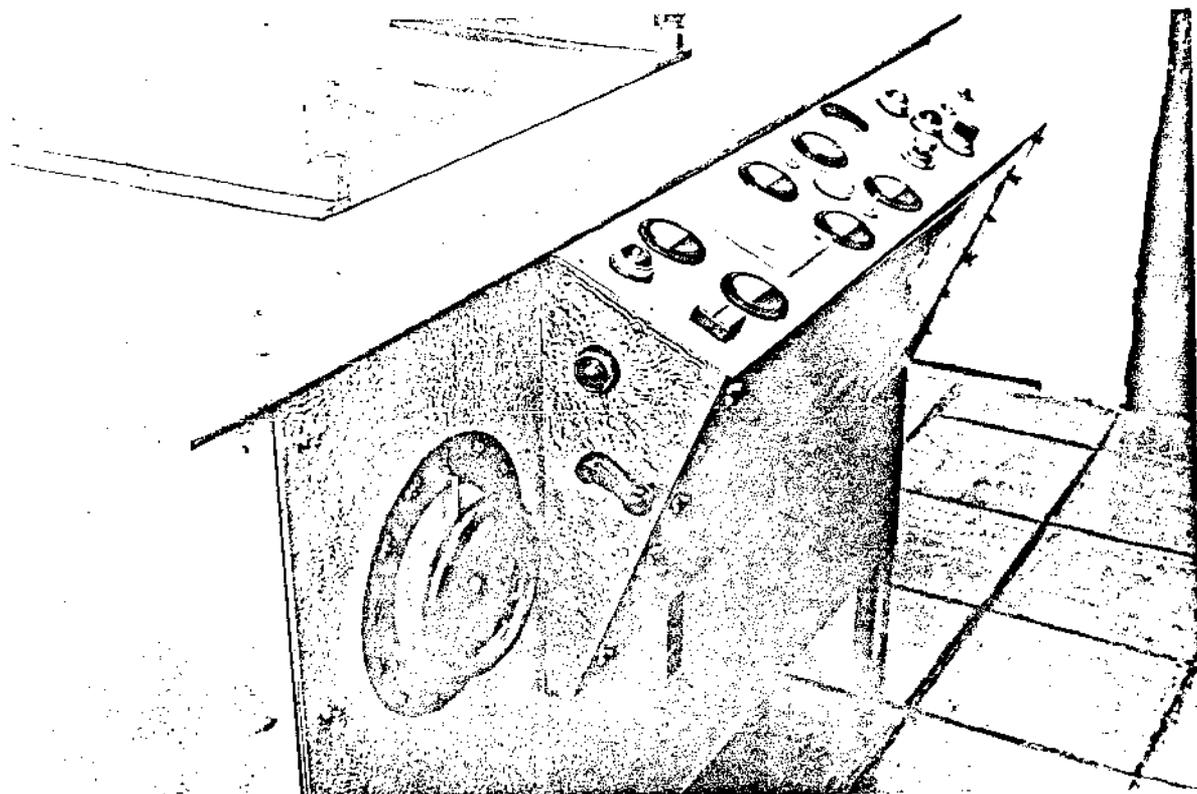


Figura III.29. - Painel de controle

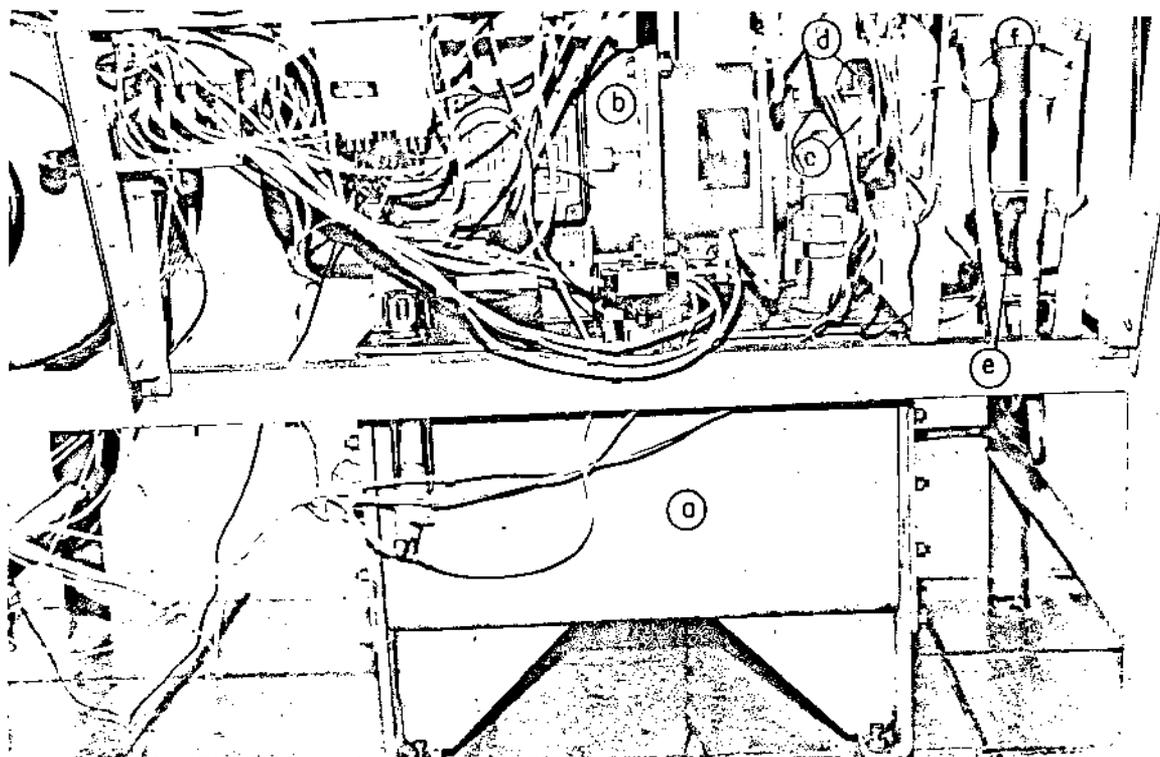


Figura III.30. - Sistema hidráulico (parte inferior)

- (a) tanque
- (b) motor
- (c) bomba
- (d) válvula de segurança
- (e) válvula direcional
- (f) válvulas de fluxo

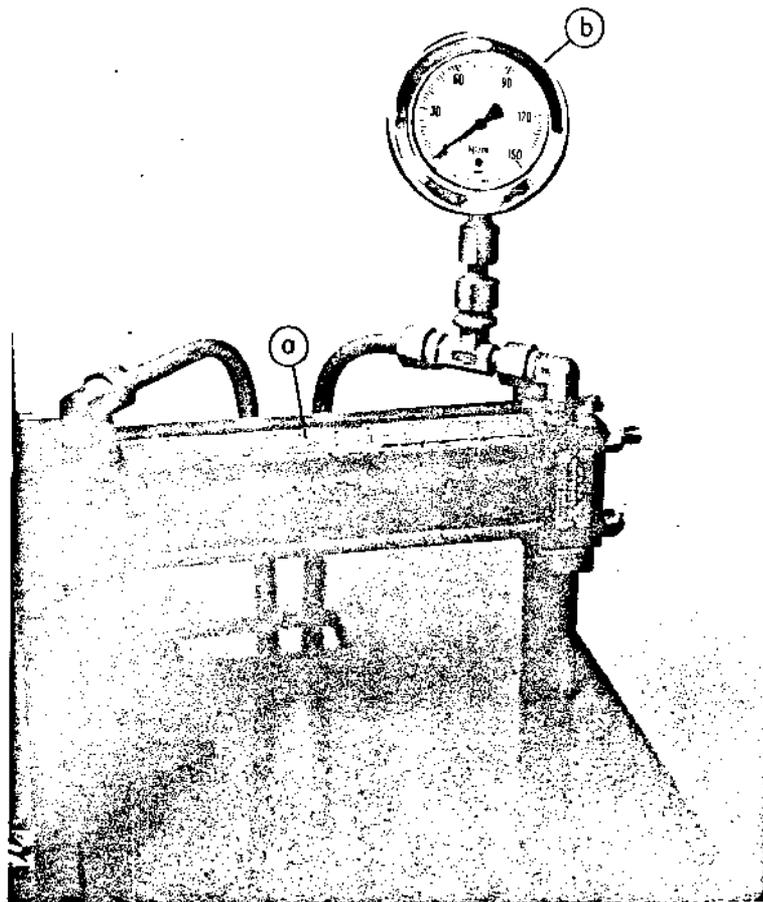


Figura III.31. - Sistema hidráulico (parte superior)

(a) cilindro hidráulico

(b) manômetro de "glicerina"

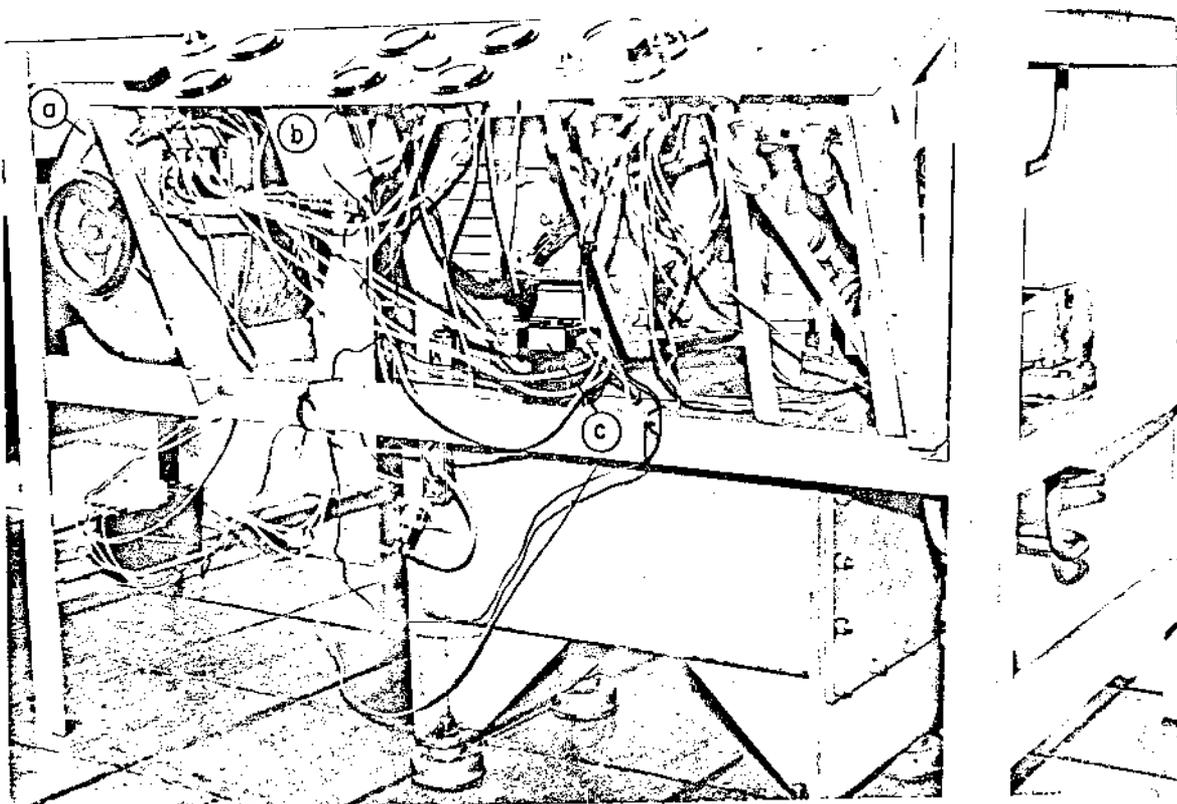


Figura III.32. - Sistema de aquecimento (parte inferior)

- (a) variador de tensão
- (b) controlador de temperatura
- (c) contator

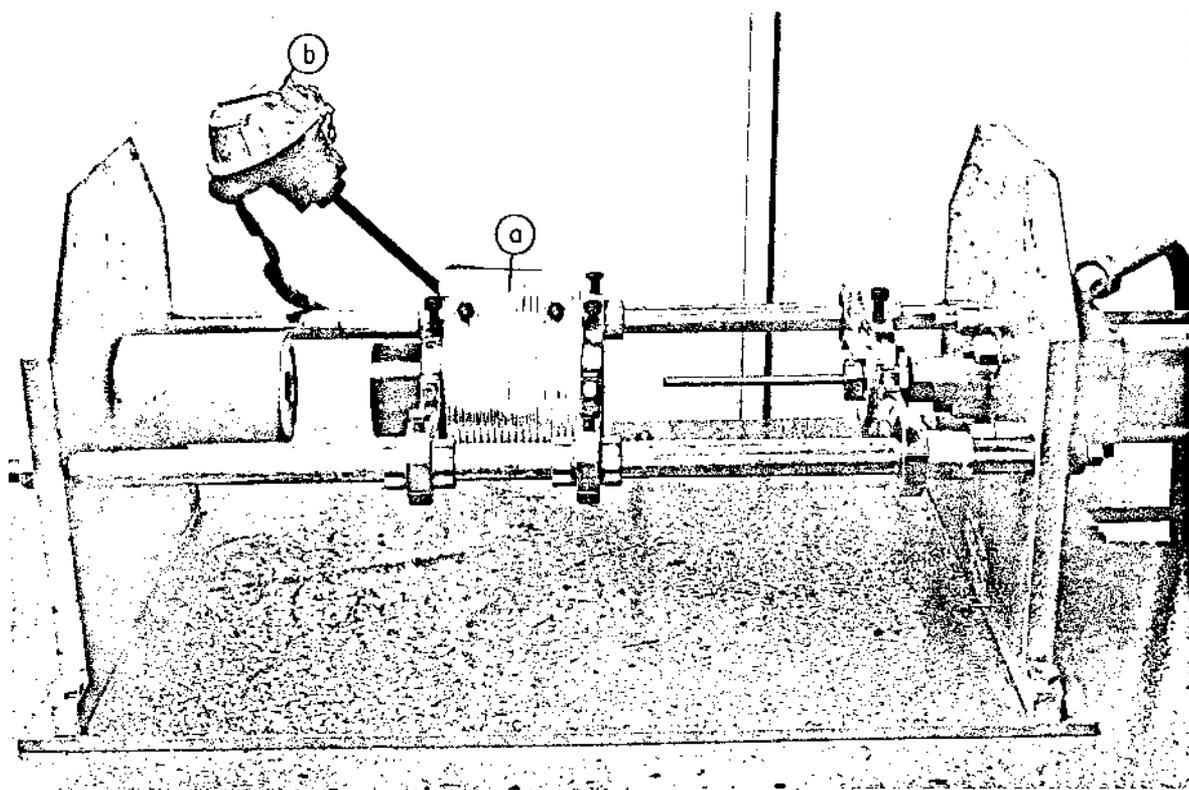


Figura III.33. - Sistema de aquecimento (parte superior)

(a) termo-elemento

(b) sensor de temperatura

### 3.3. Referências Bibliográficas

- (1) PEARSON, C.E. - The Extrusion of Metals, Chapman and Hall Ltd., London, 1953, pp. 57-97; 115-137.
- (2) BARRAND, P.; GADEAU, R. - Enciclopedia del Aluminio Fabrication de Semiproductos, vol.3, Ed. Urmo, Bilbao 1968, pp. 159-222.
- (3) AVITZUR, B. - Analysis of Metal Extrusion, Trans.ASME, Ser. B., Vol,87, 1965, p. 57.
- (4) NB-14 - Cálculo e Execução de Estruturas de Aço.
- (5) Idem ibidem Ref.(2) p. 169-170.
- (6) FEÓDOSIEV, V. - Resistência dos Materiais, Edições Lopes da Silva, Porto, 1977, pp. 299-300.
- (7) PROVENZA, F. - Prontuário do Projetista de Máquinas , PRO-TEC. São Paulo, 1976, p.3.16.
- (8) Idem ibidem Ref. (7), pp. 3.16 e 3.23.
- (9) Idem ibidem Ref. (7), p.4.10.
- (10) Instrumentos Elétricos Engro S.A., Boletim 120.
- (11) Catálogo da Sociedade Técnica Paulista S.A.

- (12) Catálogo da Siemes S.A - Dispositivos de Comando e Proteção de Baixa Tensão. Vol.1, 1ª Edição, 1975.
- (13) Catálogo da Instrumentos de Medição Elétricos "LIER" S.A.
- (14) Catálogo da Sperry Rand do Brasil S.A., Divisão Vickers, nº 5001 BR.
- (15) Manual de Hidráulica Industrial, Sperry Rand do Brasil, S.A. - Divisão Vickers, 2ª edição, 1976.
- (16) Catálogo da Dresser Ind. e Comércio Ltd. - Divisão Manômetros Willy, Abril, 1980.
- (17) Catálogo da Ermeto Equipamentos Industriais Ltda. , nº 104, 1979.
- (18) Catálogo da Castrol do Brasil S.A.
- (19) Catálogo da Aços Villares S.A. - Aços para Trabalho a Quente, p. 1201.5.
- (20) Idem ibidem Ref. (19), p.1201.6.
- (21) Instrumentos Elétricos Engro S.A., Manual de Instruções dos Minicontroladores Série 6000/6000D.

## CAPÍTULO 4

### ANÁLISE DO DESEMPENHO DE FUNCIONAMENTO DA MÁQUINA

#### 4.1. Desenvolvimento Experimental

Com o objetivo de analisar o desempenho de funcionamento da máquina, em todas as suas partes, ou seja, componentes estruturais, ferramentas de extrusão, sistema de aquecimento, sistema hidráulico e instrumentos de controle, efetuou-se ensaios preliminares com a extrusão do chumbo e do alumínio comercialmente puros (99,9%).

O procedimento para a obtenção dos tarugos a serem extrudados foi o seguinte:

- (a) inicialmente, utilizando-se uma serra mecânica, obteve-se pedaços de metais a partir de lingotes comerciais;
- (b) esses pedaços foram colocados em um cadinho refratário e em seguida levados a um forno de resistência elétrica onde foram refundidos;
- (c) o vazamento foi efetuado em um molde de aço de 10 mm de diâmetro e 30 mm de comprimento;
- (d) seccionados em várias partes os lingotes refundidos foram usinados, obtendo-se assim as dimensões finais dos tarugos, ou seja, 7,5 mm de

diâmetros e 57 mm de comprimento.

O chumbo foi o primeiro metal a ser processado, tendo-se em vista que esse material apresenta características mecânicas e de deformações favoráveis, permitindo assim uma avaliação preliminar do desempenho de funcionamento da máquina sem sobrecarregar o equipamento ( o que implica em segurança para o operador), enquanto que a extrusão do alumínio permitiu uma análise mais conclusiva,

O procedimento adotado para a extrusão foi o seguinte:

- (a) inicialmente os tarugos de chumbo e alumínio foram introduzidos em um forno auxiliar e pré-aquecidos, até a temperatura de trabalho de cerca de 200°C para o chumbo e 500°C para o alumínio, com tempo de aquecimento de 30 minutos;
- (b) enquanto isso, dava-se procedimento a preparação da máquina; a energização dos sistemas de aquecimento e hidráulico é feita através do acionamento da botoneira, localizada no painel, que liga o contator principal. O primeiro sistema a ser acionado é o sistema de aquecimento; para isso o sensor (bulbo de resistência) é colocado em contato direto com o recipiente e então procedeu-se a regulagem do controlador de temperatura em 200°C para o chumbo e 500°C para o alumínio, após o que se efetuou a regulagem do variador de tensão, inicialmente em 220V. O tempo gasto

para atingir essas temperaturas é 15 e 40 minutos respectivamente. Entretanto, devido a alta tensão adotada, a temperatura tornou-se visivelmente superior a pré-estabelecida, e então a medida que o controlador começa o acionamento do contator diminui-se a tensão de alimentação para 20V, tensão essa suficiente para dar condições a um controle mais apurado.

(c) enquanto o recipiente é aquecido procede-se a regulagem da válvula de fluxo que controla a velocidade de avanço do punção; a regulagem é feita com o auxílio de uma chave sextavada; girando-se a chave no sentido anti-horário, tem-se a diminuição da velocidade. A válvula que controla a velocidade de retorno do punção é mantida totalmente fechada, permitindo a operação com velocidade máxima. As velocidades máximas atingidas pelo punção são 10 cm/s e 14 cm/s respectivamente no avanço e no retorno.

(d) a próxima etapa é a colocação do lubrificante no recipiente. Como lubrificante utilizou-se a graxa MOLYKOTE-ASC, cuja a temperatura máxima de trabalho é  $1100^{\circ}\text{C}$ . A introdução do tarugo é então efetuada, seguindo-se o acoplamento do conjunto matriz/porta-matriz no recipiente. No transporte do tarugo para o recipiente, apesar de ser rapidamente efetuada, há perda de calor, contudo isso é minimizado pela permanência do tarugo uns 10 minutos dentro do recipiente antes

de ser iniciado o processamento. Além disso, há também dissipação de calor do recipiente para o conjunto matriz/porta-matriz;

(e) o acionamento do conjunto motor-bomba é então efetuado, através da chave manual trefilar, logo após e através da chave rotativa aciona-se a válvula direcional no sentido de avanço da haste do cilindro hidráulico e conseqüentemente o do punção, efetuando-se assim a extrusão do tarugo. Durante o processamento do tarugo é cronometrado o tempo para que se possa obter a velocidade de deformação, e é observada a variação da pressão registrada pelo manômetro localizado na entrada do cilindro hidráulico. Ao aproximar-se o fim do tarugo, como a pressão começa a aumentar rapidamente, então a válvula direcional é desligada e logo invertido o sentido do movimento do punção até o fim do curso, onde torna-se a desligar a válvula. A seguir desliga-se o conjunto motor-bomba.

(f) o fio é seccionado junto a saída do porta-matriz; o conjunto matriz/porta-matriz é desacoplado do recipiente, retirando-se os parafusos de fixação e finalmente procede-se a limpeza do recipiente com o auxílio de um disco raspador. O comprimento médio final dos fios de cumbo foi de 2,30 metros enquanto que para o alumínio foi de 1,9 metros.

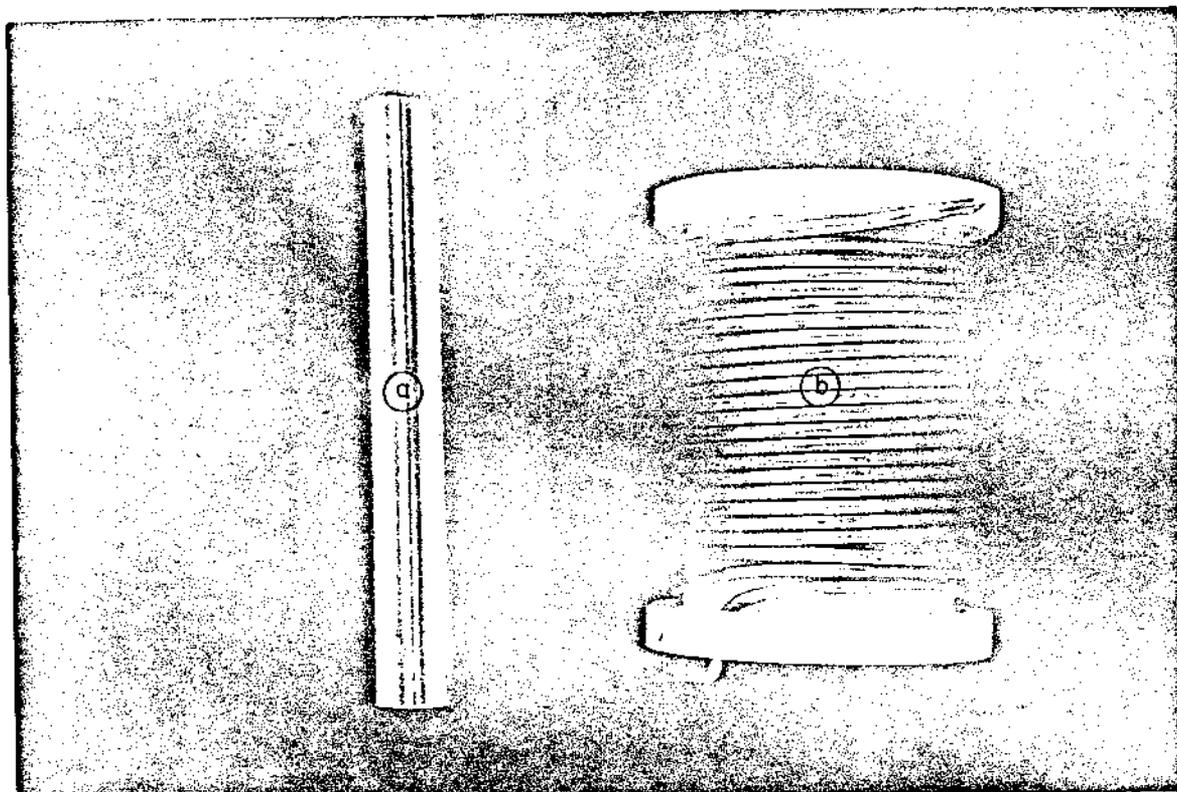


Figura IV.1(a). - Matéria-prima e produto de extrusão

(a) tarugo a extrudar de alumínio

(b) fio extrudado de alumínio

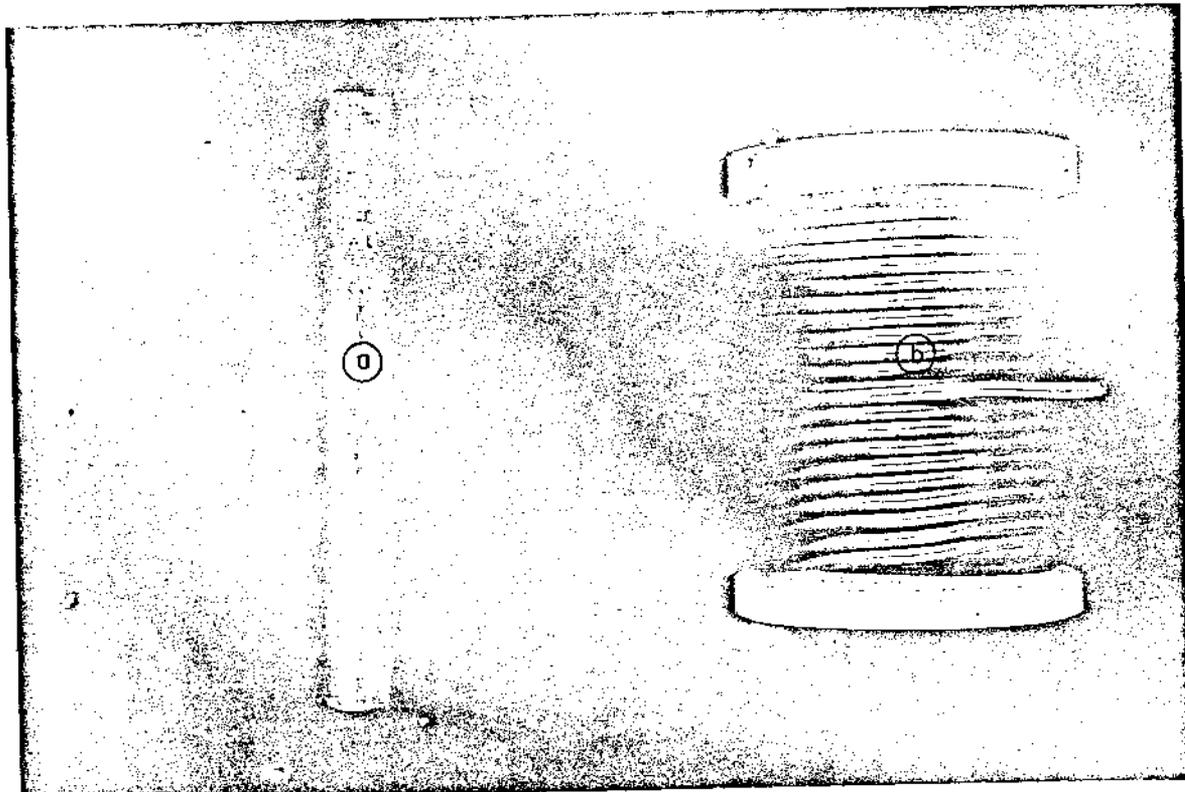


Figura IV.1(b). - Matéria-prima e produto de extrusão

(a) tarugo a extrudar de chumbo

(b) fio extrudado de chumbo

#### 4.2. Problemas Apresentados e Soluções Propostas

Como foi referido anteriormente, os ensaios preliminares efetuados com o chumbo e alumínio, tiveram como objetivo analisar o desempenho de funcionamento da máquina em todas as suas partes, permitindo assim a introdução das modificações necessárias para o perfeito funcionamento do equipamento, condição básica para o prosseguimento da pesquisa. Os problemas críticos observados e as soluções adotadas são as seguintes:

(a) PROBLEMA: o sistema de fixação e encaixe do recipiente de extrusão no conjunto matriz/porta-matriz com desempenho insatisfatório pois permitiu a saída lateral do metal durante o processamento do tarugo;

SOLUÇÃO: novo desempenho de encaixe do conjunto matriz/porta-matriz no recipiente e reforço do sistema de fixação;

(b) PROBLEMA: quando a válvula de fluxo que controla a velocidade de avanço do punção, é calibrada para comprimir maior velocidade ao punção estando a outra válvula totalmente aberta, para imprimir a velocidade máxima de retorno do punção, a leitura no manômetro referiu-se à pressão pré-estabelecida na válvula de segurança e não a pressão de extrusão;

SOLUÇÃO: inversão das ligações de entrada e saída do flu

xo através da válvula que controla a velocidade de avanço do punção, e colocação de um outro manômetro entre a válvula de fluxo e o cilindro hidráulico;

(c) PROBLEMA: vazamento de fluido hidráulico pelo retentor na saída da haste do cilindro hidráulico;

SOLUÇÃO: melhor alinhamento do suporte da haste, através da introdução de calço entre as partes do suporte e melhor tolerância no ajuste das buchas com as guias;

(d) PROBLEMA: a velocidade de avanço do punção sem controle, apesar do acionamento da válvula de fluxo que controla a vazão de acionamento do punção no sentido de avanço;

SOLUÇÃO: inversão das ligações de entrada e saída da válvula de fluxo, passando o duto que liga a válvula direcional para o lugar onde está conectado o tubo que liga a válvula ao cilindro hidráulico, e vice-versa;

Além desses problemas foram observados ainda os seguintes:

(e) PROBLEMA: folga excessiva entre o punção e o furo do recipiente, o que ocasionou a formação de casca muito espessa dificultando a saída do punção

do recipiente no retorno, assim como, contribuiu para a diminuição do comprimento do fio extrudado;

SOLUÇÃO: redução da folga, redução do comprimento do recipiente e do punção, melhoria do acabamento interno do recipiente e do ajuste, utilizando-se o processo de eletro-erosão para a obtenção do furo do recipiente, e uso de disco de pressão substituível com diâmetro maior que o do punção;

(f) PROBLEMA: os suportes do recipiente de extrusão com desempenho insatisfatório o que dificultou a movimentação do recipiente, principalmente após a extrusão;

SOLUÇÃO: manter o recipiente fixo e movimentar a matriz substituindo-se os suportes do recipiente por placas de apoio.

As soluções indicadas serão adotadas no prosseguimento da pesquisa.

#### 4.3. Análise da Força de Extrusão

Os ensaios preliminares efetuados com o chumbo e o alumínio permitiram também um estudo comparativo entre os valores das forças de extrusão medidos e os calculados pelo modelo físico-matemático desenvolvido no item 2.2.

As variáveis de influência no processo podem ser de natureza mecânica e metalúrgica. As variáveis de natureza mecânica são:

- velocidade de deformação;
- condições de lubrificação;
- temperatura de extrusão; e
- intensidade de redução.

e as variáveis de natureza metalúrgicas são: composição e microestrutura do material do tarugo.

No programa experimental preliminar escolheu-se para estudo as seguintes variáveis: velocidade de deformação e condições de lubrificação, procurando manter as demais como parâmetros.

Devido a impossibilidade de se efetuar o registro contínuo da variação da força durante o processamento do tarugo foi feita somente a leitura das pressões máximas ( e mínimas) no manômetro.

Na extrusão do chumbo, devido a sua elevada conformabilidade, pode-se estabelecer alguns níveis de velocidades enquanto que para o alumínio, praticamente o nível de velocidade não pode ser alterado, já que as suas características mecânicas e de conformação, aliadas a intensa redução de 87,5 %

em diâmetro restringem significativamente a velocidade de de-  
formação a um valor mínimo.

A tabela III.1 apresenta uma comparação entre as for-  
ças determinadas e as calculadas segundo o modelo de atrito da  
camada limite (vide expressão 2.19, Capítulo 2). No cálculo  
das forças de extrusão adotou-se limites de escoamento para  
o chumbo de  $0,54 \text{ kgf/mm}^2$  e para o alumínio de  $2 \text{ kgf/mm}^2$ , e  
ainda, a condição de matriz plana e coeficiente de atrito por  
cisalhamento igual a 1.

Tabela IV.1 - Comparação entre Forças Máximas de Extrusão			
Material	Força Calculada (kgf)	Força Determinada (kgf)	Variação de Força Calculada (%)
Chumbo	433	539 (Velocidade de deforma- ção = 2,2 cm/s)	22
Alumínio	2000	3100 (Velocidade de deforma- ção = 0,005cm/s)	55

Se fosse adotado no cálculo da força os valores  
reais do limite de escoamento na temperatura de trabalho (alu-  
mínio  $500^{\circ}\text{C}$ , e chumbo  $200^{\circ}\text{C}$ ), que certamente são valores meno

res, e também um coeficiente de atrito de cisalhamento menor do que 1, teria-se valores de forças calculados muito afastados daqueles obtidos experimentalmente; contudo, esse cálculo não foi realizado pela impossibilidade de se determinar, nas condições de temperatura existentes, ou de se encontrar, na literatura consultada, os valores reais de limite de escoamento e coeficiente de atrito por cisalhamento. De qualquer forma buscou-se, no cálculo da força de extrusão, um limite superior que é garantido pela utilização da expressão indicada no capítulo II (expressão 2.19) e pelos valores maiores de limites de escoamento e de coeficiente de atrito.

Analisando a força determinada para o chumbo, mesmo a velocidades relativamente elevadas que tendem a aumentar os níveis das forças de extrusão, observa-se que o resultado obtido no ensaio, não é muito superior a aquele obtido no cálculo. Porém, no caso da extrusão do alumínio a diferença é bem mais acentuada. Esse fato deve se originar, provavelmente, nas condições da fabricação e montagem de componentes da máquina; mais especificamente, devem ser responsáveis pelo exagerado nível da força de extrusão os seguintes fatores: a excessiva rugosidade do recipiente de extrusão, a elevada espessura da casca de extrusão, a dificuldade do lubrificante se manter uniformemente distribuído no recipiente, e ao percurso irregular do disco de pressão (que provoca um contato forçado em alguns pontos com a superfície interna do recipiente).

Além desses fatores responsáveis pela diferença entre as forças de extrusão calculadas e obtidas nos ensaios, deve-se considerar a possível não representatividade, das condições reais, do modelo físico-matemático proposto por

AVITZUR (conforme descrito no capítulo II) lembrando que no caso dos ensaios realizados adotou-se valores de redução bastante elevados.

## CAPÍTULO 5

### CONCLUSÕES

A máquina extrusora de laboratório projetada e construída apresentou, no conjunto, comportamento satisfatório porém necessitando de aperfeiçoamentos mecânicos. Os problemas de funcionamento apresentados se originaram principalmente na fabricação e na montagem dos componentes e poucos foram devidos a erros de concepção na fase de projeto.

Em decorrência da análise do desempenho de funcionamento os seguintes tópicos podem ser sugeridos para trabalhos experimentais futuros:

- (1) - aperfeiçoamento dos componentes que apresentaram problemas de funcionamento;
- (2) - modificação da geometria de matriz plana para a de matriz cônica, para maior uniformidade de escoamento;
- (3) - estudo das variáveis mecânicas de controle do processo (temperatura e velocidade de extrusão) nas variáveis metalúrgicas do fio extrudado;
- (4) - transformação de extrusão direta para inversa (a extrusão inversa irá necessitar menor força de extrusão, permitirá a obtenção de um fio extrudado com um comprimento maior e eliminará o uso de lubrificação);

- (5) - Transformação da extrusão convencional para extrusão hidrostática (na qual o tarugo é estrudado sob a ação de um fluido lubrificante que apresenta vantagens sobre o processo convencional, com a possibilidade de obter-se fios mais finos).

APENDICE

CUSTO ESTIMADO DA MÁQUINA

O custo estimado na construção da máquina extrusora de laboratório, com base no primeiro semestre de 1979, foi o seguinte:

Material utilizado para a Fabricação dos Componentes Estruturais e das Ferramentas de Extrusão .....	Cr\$ 22.197,00
Componente do Sistema de Aquecimento .....	Cr\$ 19.243,00
Componentes do Sistema Hidráulico .....	Cr\$ 48.600,00
Instrumentos de Controle .....	Cr\$ 7.000,00
Serviços de Terceiros .....	Cr\$ 8.000,00
Total:	Cr\$105.040,00

Obs.: Não foram computados a mão-de-obra interna e outros itens de pequena incidência no custo total.

BIBLIOGRAFIA

- AVITZUR, B. - Metal Forming: Process and Analysis, Tata McGraw Hill Co. Ltd., New Delhi, 1977.
- AVITZUR, B. - Analysis of Metal Extrusion, Trans. ASME, Ser. B, Vol.87, 1965, pp.57-70.
- AVITZUR, B. - Analysis of Wire Drawing and Extrusion Through Conical Dies of Small Cone Angle, Trans. ASME, Ser. B., Vol. 85, 1963, pp.89-96.
- AVITZUR, B. - Analysis of Wire Drawing and Extrusion Through Conical Dies of Large Cone Angle, Trans. ASME, Ser. B, vol.86, nº 4, pp.305-316.
- BAQUE, P. et alli - Mise en Forme de Métaux - Calculs par la Plasticité, Dunod, Paris, 1973.
- BARRAND, P.; GADEAU, R. - Enciclopedia del Aluminio , Fabrication de Semiproductos, vol.3, Ed. Urmo, Bilbao, 1968.
- BRESCIANI Fº, E. - Análise do Processo de Extrusão de Barras (Trabalho a ser publicado, FEC/UNICAMP).
- BRESCIANI Fº, E. - Conformação Plástica dos Metais, Apostila Pós-Graduação, UNICAMP/FEC, Campinas, 1977.

CAMPOS Fº, M. P. - Dados e Idéias, 3(6), Junho/Julho ,  
1978,

Catálogo da Tanaka Electronic Industry - Wire Drawing,  
Tokyo.

Catálogo da Sociedade Técnica Paulista S.A.

Catálogo da Siemens S.A. - Dispositivos de Comando e Pro-  
teção de Baixa Tensão, vol. 1, 1975.

Catálogo de Instrumentos de Medição Elétricos "LIER"  
S.A.

Catálogo da Sperry Rand do Brasil S.A., Divisão Vickers,  
1976.

Catálogo da Dresser Ind. e Comércio Ltd. - Divisão Ma-  
nômetros Willy, Abril, 1980.

Catálogo da Castrol do Brasil S.A.

Catálogo da Aços Villares S.A. - Aços para Trabalho a  
Quente.

DIETER, G. E. - Mechanical Metallurgy, McGraw Hill ,  
Kogakusha, Tokyo, 1976.

FÉODOSIEV, V. - Resistência dos Materiais, Edições Lopes da Silva, Porto, 1977.

Instrumentos Elétricos Engro S.A., Manual de Instruções dos Minicontroladores, Série 6000/6000D.

JOHNSON, W. ; MELLOR, P.B. - Engineering Plasticity, van Nostrand, London, 1973.

KACHANOV, L.M. - Fundamentals of the Theory of Plasticity, Mir Publishers, Moscow, 1974.

Manual de Hidráulica Industrial, Sperry Rand do Brasil S.A. - Divisão Vickers, 1976.

MEI, P.R. - Desenvolvimento do Processo de Purificação por Fusão Zonal Horizontal para Metais de Baixo Ponto de Fusão, e sua Aplicação do Estanho, Tese de Mestrado, UNICAMP/FEC/DEM, 1979.

NB-14 - Norma Técnica ABNT - Cálculo e Execução de Estrutura de Aço.

PAPARONI, F. - Trafilati di Rame, Revista Il Rame, Cisar, nº 23, Setembro 1968.

PEARSON, C. E. - The Extrusion of Metals, Chapman & Hall Ltd, London, 1953.

PRAGER, W.; HODGE Jr., P.G. - Theory of Perfectly Solids,  
Campman & Hall Ltd., London, 1951.

PROVENZA, F. - Prontuário do Projetista de Máquinas -  
PROTEC, São Paulo, 1976.

ZAVAGLIA, C.A.C. - Contribuição ao Estudo da Trefilação  
de Fios Capilares de Metais Não-Ferrosos, Tese de  
Mestrado, UNICAMP/FEC/DEM, 1979.

BIBLIOGRAFIA CONSULTADA MAS NÃO REFERIDA

AVENAS, P.; et alli - Mise en Forme des Métaux et Alliages, Editions du CNRS, Paris, 1976.

BACKOFEN, W.A. (Ed.) - Fundamentals of Deformation Process, New York, 1974.

BISHOP, J.F.W. - The Theory of Extrusion, Met. all. Rev. , Vol. 2, 1957.

CHADWICK, R. - The Hot Extrusion of Non-Ferrous Metals , Metall. Rev. vol. 4, 1959.

DELIJAICOV, S. - Análise da Extrusão de Barras Cilíndricas em Matriz Cônica pelo Método de Limite Superior, Seminário Pós-Graduação, EPUSP, 1978.

GRÜNING, K. - Técnica da Conformação, Editora Polígono , São Paulo, 1973.

HERENGUEL, J. - Metalurgia Especial, Tomo I, Ediciones - Urmo, Bilbao, 1969.

HOFFMAN, O.; SACHS, G. - Introduction to the Theory of Plasticity for Engineers, McGraw Hill Book Company , New York, 1953.

- IURMAN, L.; VIDAL, M.C.A.; LÓPEZ, A.S. - Introduction al  
Traĥajado Mecanico, vols. I, II e III, Sexto Curso  
Panamericano de Metalurgia, Buenos Aires, 1970.
- JOHNSON, W.; KUDO, H. - The Mechanics of Metal Extrusion,  
Manchester University Press, London, 1962.
- LYMAN, T. (Ed.) - The Selection of Material for Hot  
Extrusion Tools, : Metals Handbook, vol. 1, 8<sup>a</sup> Ed. ,  
ASM, Ohio, 1961.
- MASTEROV, V.; BERKOVSKY, V. - Theory of Plastic  
Deformation and Metal Working, Mir Publishers, Moscow,  
1975.
- FERLINI, P.B. (Organiz.) - Normas para Desenho Tĕcnico ,  
ABNT, Ed. Globo, Porto Alegre, 1977.
- ROWE, G.W. - Conformado de los Metales, Ediciones Urmo ,  
Bilbao, 1972.

SIMBOLOGIA

$a$	=	raio interno do recipiente
$A$	=	área
$b$	=	raio externo do recipiente
$c$	=	constante de integração
$ds$	=	elemento de superfície
$dr$	=	elemento de raio
$dv$	=	elemento de volume
$D_t$	=	diâmetro do tarugo
$D_p$	=	diâmetro do punção
$D_m$	=	diâmetro da matriz
$D_{g_{min}}$	=	diâmetro mínimo da guia
$D_g$	=	diâmetro da guia
$E$	=	módulo de elasticidade
$F_{ext}$	=	força de extrusão
$\bar{F}_{f\ell}$	=	força admissível de flambagem
$F$	=	força
$f_{max}$	=	flexa máxima
$h_p$	=	espessura da placa
$h_m$	=	espessura da matriz
$i$	=	raio de giração mínimo
$j$	=	momento de inércia
$\ell$	=	comprimento da zona de deformação
$\ell_p$	=	comprimento da placa
$L_t$	=	comprimento do tarugo
$L_p$	=	comprimento do punção
$L_{f\ell}$	=	comprimento de flambagem

- $m$  = fator de cisalhamento  
 $M_{max}$  = momento fletor máximo  
 $p_i$  = pressão interna  
 $p$  = pressão normal  
 $r$  = distância radial  
 $R_i$  = raio inicial  
 $R_f$  = raio final  
 $S_T$  = superfície de descontinuidade de velocidade  
 $T_i$  = tensão aplicada no tarugo  
 $\dot{U}_r; \dot{U}_\theta; \dot{U}_\phi$  = componentes do vetor velocidade no sistema de coordenadas esféricas  
 $V_i$  = velocidade inicial  
 $V_f$  = velocidade final  
 $\dot{W}_e$  = potência externa aplicada  
 $\dot{W}_i$  = potência interior  
 $\dot{W}_u$  = potência de deformação  
 $\dot{W}_s$  = potência dissipada pelas superfícies de descontinuidades de velocidades  
 $\alpha$  = semi-ângulo da zona morta  
 $\Delta V$  = descontinuidade de velocidade  
 $\dot{\epsilon}_{ij}$  = componente do tensor de velocidade  
 $\dot{\epsilon}_{rr}; \dot{\epsilon}_{\theta\theta}; \dot{\epsilon}_{\phi\phi}$  = componentes de velocidade de deformação normais segundo as coordenadas  $r; \theta$  e  $\phi$   
 $\lambda$  = índice de esbeltz  
 $\mu$  = coeficiente de atrito  
 $\sigma_0$  = limite de escoamento  
 $\sigma_{f\ell}$  = tensão de flambagem  
 $\bar{\sigma}_{f\ell}$  = tensão admissível de flambagem

$\sigma_T$  = tensão de tração  
 $\tau$  = tensão de cisalhamento

ÍNDICE DE FIGURAS E TABELAS

	<u>PÁGINA</u>
Figura I.1. - Fluxograma do processamento para a obtenção de fios capilares de metal MGE	3
Figura II.1. - Representação esquemática da extrusão direta .....	8
Figura II.2. - Representação esquemática da extrusão inversa .....	8
Figura II.3. - Representação esquemática do campo de velocidades cinematicamente admissível	13
Figura II.4. - Tensões atuantes no elemento diferencial .....	21
Figura II.5. - Efeito da redução e do fator de cisalhamento constante $\underline{m}$ sobre o semi-ângulo da zona morta, na extrusão direta..	26
Figura II.6. - Efeito da redução e do coeficiente de atrito $\underline{\mu}$ sobre o semi-ângulo da zona morta, na extrusão direta .....	26
Figura II.7. - Efeito da redução e do fator de cisalhamento constante $\underline{m}$ sobre o semi-ângulo da zona morta, na extrusão inversa	27
Figura II.8. - Efeito da redução e do coeficiente de atrito $\underline{\mu}$ sobre o semi-ângulo da zona morta, na extrusão inversa .....	27

PÁGINA

Figura III.17. - Chapa lateral direita do painel ....	63
Figura III.18. - Chapa lateral esquerda do painel ...	64
Figura III.19. - Chapa inferior do painel .....	65
Figura III.20. - Chapa do painel .....	66
Figura III.21. - Suporte do cilindro hidráulico .....	67
Figura III.22. - Estrutura da mesa .....	68
Figura III.23. - Sistema de aquecimento .....	70
Figura III.24. - Sistema hidráulico .....	74
Figura III.25. - Características mecânicas do aço VPCW .....	84
Figura III.26. - Circuito elétrico .....	87
Figura III.27. - Vista geral da máquina extrusora ...	88
Figura III.28. - Ferramentas de extrusão .....	89
Figura III.29. - Painel de controle .....	90
Figura III.30. - Sistema hidráulico (parte inferior)	91
Figura III.31. - Sistema hidráulico (parte superior )	92
Figura III.32. - Sistema de aquecimento ( parte inferior) .....	93
Figura III.33. - Sistema de aquecimento ( parte superior ) .....	94
Figura IV(a). - Matéria-prima e produto de extrusão	101
Figura IV(b). - Matéria-prima e produto de extrusão	102

PÁGINA

Figura II,9	- Variação da tensão de extrusão durante o processamento do tarugo .....	28
Figura III.1.	- Desenho de conjunto da máquina extrusora .....	35
Figura III.2.	- Diagramas de variação das tensões radiais e tangenciais ao longo da espessura do tubo de parede grossa submetido a uma pressão interna $p$ .....	43
Figura III.3.	- Punção .....	48
Figura III.4.	- Recipiente de expressão .....	49
Figura III.5.	- Conjunto matriz/porta-matriz .....	50
Figura III.6.	- Apêdio .....	51
Figura III.7.	- Placa porta - cilindro hidráulico ..	52
Figura III.8.	- Placa porta-matriz .....	53
Figura III.9.	- Guia .....	54
Figura III.10.	- Bucha .....	55
Figura III,11.	- Chapa da mesa .....	56
Figura III.12.	- Base .....	57
Figura III.13.	- Conjunto porta-punção .....	58
Figura III.14(a) 14(b)	- Suportes do recipiente e do porta-punção .....	59-60
Figura III,15.	- Chapa lateral .....	61
Figura III.16.	- Chapa frontal .....	62

PÁGINA

TABELAS

Tabela I.1. - Composição Química dos Fios Ouro .....	4
Tabela I.2. - Composição Química dos Fios de Ligas de Alumíni-Silício .....	4
Tabela IV. - Composição entre Forças Máximas de Extrusão .....	107