

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA

**"UMA CONTRIBUIÇÃO AO ESTUDO DA EXTRUSÃO A FRIO DO AÇO
ABNT 1010 FOSFATIZADO"**

por

Getúlio Góes Ferretti

Tese submetida como requisito parcial para a
obtenção do grau de

MESTRE EM CIÊNCIAS
DE
ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Arno Blass — Orientador

Florianópolis, setembro de 1970

À minha noiva

AGRADECIMENTOS

Registro aqui meus agradecimentos ao professor Arno Blass pela valiosa orientação, ao professor Caspar Erich Stemmer, pelo seu esforço na implantação do Programa de Pós-Graduação, ao professor José João de Espíndola pelas sugestões, à CAPES, BNDE e CNPq pelo auxílio financeiro, ao Aldo e ao Ditmar pela sua ajuda.

SUMÁRIO

Pretende este trabalho emprestar uma colaboração ao estudo da extrusão a frio do aço ABNT 1010, através da verificação da força necessária à extrusão de uma determinada peça, empregando diferentes soluções fosfatizantes

Após uma ligeira abordagem clássica do processo de extrusão a frio, é apresentada uma maneira teórica de calcular a força necessária à extrusão da peça escolhida.

O capítulo 3 refere-se a um modo prático de determinação da força de extrusão, ou mais especificamente, ao emprego de extensômetros elétricos de resistência variável.

A fosfatização como um auxílio à extrusão a frio preenche o capítulo 4, onde, além de outros detalhes, são dadas as composições dos banhos fosfatizantes empregados.

As dificuldades iniciais com o equipamento de medição de força e com a prensa onde se fez a extrusão são comentadas no capítulo 5.

Foram realizados dois tipos de teses, que, juntamente com os resultados obtidos e a discussão dos mesmos, podem ser encontrados nos capítulos 6 e 7.

Finalizando, encontram-se algumas conclusões e sugestões para trabalhos do mesmo gênero, baseadas na experiência adquirida durante a realização deste.

SUMMARY

This work is intended to be a small collaboration to the study of cold extrusion of ABNT 1010 steel, by examining the force needed to make a certain extruded element, with the use of different phosphating coats.

The traditional division of cold extrusion process is slightly examined. The theoretical force needed to extrude the chosen element is then calculated.

Chapter 3 deals with electric strain-gauges and their use in this work.

Chapter 4 gives the compositions of the phosphating baths used.

The initial difficulties with the force measuring equipment and with the mechanical press are reported in chapter 5.

Two experiments were performed and they are presented, together with their results in chapters 6 and 7.

Finally, some conclusions and suggestions are given to those who want to study the behavior of Brazilian steels under cold extrusion.

ÍNDICE

INTRODUÇÃO	
CAPÍTULO 2 — Generalidades sobre o processo de extrusão a frio	3
1.1 — Extrusão direta	3
1.2 — Extrusão inversa	4
1.3 — Fluxo do material na extrusão inversa	4
CAPÍTULO 2 — Preliminares	5
2.1 — Justificativa da escolha da peça	5
2.2 — Fundamentos teóricos	5
CAPÍTULO 3 — Medição da força	7
3.1 — Escolha do método	7
3.2 — Fundamentos do processo	8
3.2 — Escolha do extensômetro	9
3.4 — Montagem dos extensômetros	9
3.5 — Operação dos extensômetros	10
3.5.1 — Equipamentos utilizados	10
3.5.2 — Escolha e aferição das escalas	10
CAPÍTULO 4 — Fosfatização	13
4.1 — Razões de seu uso	13
4.2 — Roteiro utilizado	13
4.3 — A fosfatização como processo químico	14
4.4 — Composição, obtenção e observações sobre as soluções fosfatizantes empregadas	15
4.5 — Tempos e temperaturas de fosfatização	16
CAPÍTULO 5 — Experiências preliminares	17
5.1 — Familiarização com o equipamento de medição ..	17
5.2 — Extrusão de peças em chumbo e alumínio; Primeiras fotografias	17
5.3 — Primeiras tentativas com o aço	18
CAPÍTULO 6 — Experiências e resultados	21
6.1 — Força máxima necessária em função do tipo de fosfatização	21
6.2 — Força necessária em função da espessura do fundo da peça	21
6.3 — Resultados obtidos	21
6.4 — Convenção empregada nas figuras de 9 a 50	22
6.4.1 — Três algarismos sob a curva	22
6.4.2 — Dois algarismos sob a curva	22
6.4.3 — Indicação SF	22
CAPÍTULO 7 — Análise dos resultados	23
7.1 — Forma das curvas obtidas	23
7.2 — Análise da força de extrusão como função da fosfatização	24
7.3 — Análise da força de extrusão em função da espessura do fundo da peça	24
7.4 — Análise micrográfica da peça extrudada	24
CONCLUSÃO	
APÊNDICE 1 — Ferramenta utilizada	27

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 — Cálculo prévio de força exigida	28
Tabela 2 — Tensões (volts) injetadas no osciloscópio em função da carga atuante no punção	28
Tabela 3 — Forças de extrusão utilizando as soluções 1, 2 e 3	29
Tabela 4 — Forças de extrusão utilizando as soluções 4 e 5 e sem fosfatizar	29
Tabela 5 — Forças de extrusão em função da espessura do fundo da peça	30

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 — Peça escolhida	31
Figura 2 — Modelo para cálculo teórico das pressões	31
Figura 3 — Curva de encruamento do aço CK 10 da norma alemã	32
Figura 4 — Variação teórica da força e pressões em função da espessura do fundo da peça	33
Figura 5 — Tensões injetadas no osciloscópio versus carga no punção	34
Figura 6 — Peça utilizada nas primeiras experiências com o equipamento de medição de força	34
Figura 7 — Força disponível em uma prensa de excêntrico de 85 toneladas em função da altura h^{α}	35
Figura 8 — Esquema da prensa	36
Figuras 9 a 39 — Forças de extrusão em função do tipo de fosfatização	37 a 40
Figuras 40 a 50 — Forças de extrusão em função da espessura do fundo da peça obtida	41 a 42
Figura 51 — Variação experimental da força de extrusão em função da espessura do fundo da peça	43
Figura 52 — Variação de velocidade do eixo do excêntrico da prensa em função do tempo, por ocasião da extrusão	43
Figura 53 — Comparação entre as forças teórica e experimental em função da espessura do fundo	44
Figura 54 — Campos microfotografados	44
Figuras 55 e 56 — Estrutura do material em estado natural	45
Figuras 57 a 64 — Microfotografias dos diversos campos	46 a 47
Figura 65 (em encarte) — Vista global da ferramenta	
Figuras 66 a 80 — Detalhes da ferramenta	48 a 53

INTRODUÇÃO

O processo de extrusão a frio era, no princípio, somente utilizado para materiais moles. Mesmo para certas ligas de alumínio e zinco o processo exigia que o material fosse aquecido a uma temperatura de boa plasticidade. A primeira patente do processo dizia respeito, particularmente, à confecção de cartuchos de munição em latão.

No início da década de 30, começou na Alemanha uma intensa pesquisa no sentido de utilizar o processo na conformação de aços, visando, principalmente, a fabricação de cartuchos de munição, já antecipando o esforço da guerra. As dificuldades surgidas diziam respeito, principalmente, à intensa abrasão que se produzia entre a ferramenta (de aço) e a peça (também de aço), mesmo quando se utilizavam os melhores lubrificantes da época, o que tornava muito curta a vida da ferramenta. Além disso, o acabamento das peças deixava muito a desejar.

Descobriu-se, posteriormente, que uma camada conveniente de fosfato depositada na superfície da peça a conformar atuava como um excelente portador de lubrificante, assegurando assim: uma adequada película para a extrusão.

Após a Segunda Guerra o processo sofreu bastante desenvolvimento. São produzidas, hoje, notadamente nos Estados Unidos e Europa, peças de todos os tamanhos e tipos de aço. A única limitante do processo é a capacidade das prensas.

No Brasil o processo é pouco difundido e todo baseado no know-how estrangeiro. O estudante, principalmente, não consegue em indústrias que utilizam o processo, informações práticas precisas.

Inicia-se, com este trabalho, no Centro Tecnológico da Universidade Federal de Santa Catarina, uma pesquisa aplicada neste setor. Com certeza, existindo condições adequadas para o prosseguimento, as etapas serão vencidas rapidamente, como convém ao desenvolvimento nacional.

CAPÍTULO I

GENERALIDADES SOBRE O PROCESSO DE EXTRUSÃO A FRIO

A extrusão a frio ou por impacto é um processo no qual o metal é conformado sob a influência de altas tensões de compressão.

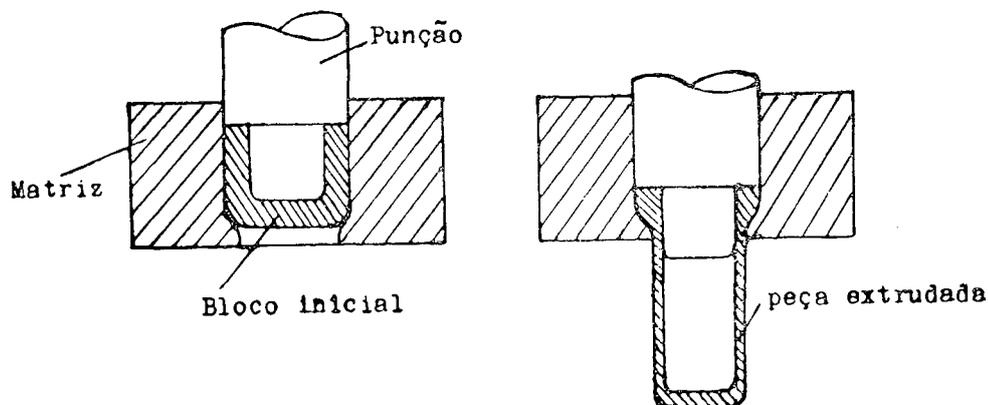
Inicialmente o processo era conhecido por "extrusão por impacto". O termo "extrusão a frio" foi introduzido para designar o mesmo processo aplicado ao aço. Esta distinção não é rigorosa, mesmo porque ainda não foi adotada universalmente.

Costuma-se dividir classicamente o processo em extrusão direta e extrusão inversa.

1.1 — Extrusão direta

Neste tipo de extrusão o bloco inicial é colocado na cavidade da matriz e comprimido por um punção, sendo extrudado entre o mesmo e a parte inferior da matriz.

Na obtenção de peças de tamanhos equivalentes, a extrusão direta exige pressões menores do que a inversa. Além disto, é mais fácil obter um alinhamento perfeito entre matriz e punção, conseguindo-se peças de tolerâncias mais estreitas do que na inversa. Em compensação, as formas das peças obteníveis por extrusão direta são mais limitadas do que por extrusão inversa. Em particular, a extrusão direta não atua sobre o fundo da peça, porque não há forjamento contra o fundo da matriz.

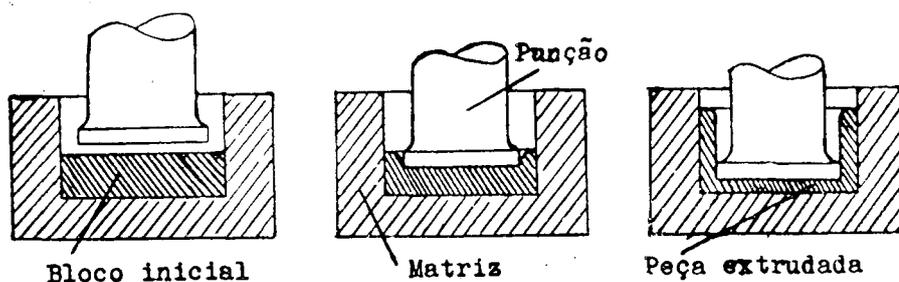


1.2 — Extrusão inversa

Da mesma forma, o bloco inicial é colocado na cavidade da matriz e comprimido por um punção. Desta vez, no entanto, o material é forçado a subir entre punção e matriz. A espessura de parede da peça é determinada, então, pela folga entre punção e matriz, e a espessura de fundo da peça pelo curso do punção.

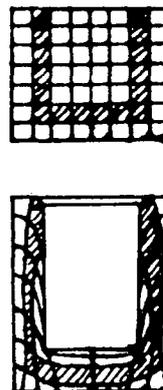
A extrusão inversa pode ser utilizada na produção de peças com as mais variadas seções transversais (circulares, ovais, retangulares, etc.), e com as mais diferentes seções de fundo da peça.

É o processo utilizado neste trabalho.



1.3 — Fluxo do material na extrusão inversa

Para visualizar o fluxo do material na extrusão inversa de um copo cilíndrico, considere-se o bloco inicial cortado diametralmente e a seção resultante quadriculada. Imagine-se ainda que, por exemplo, a seção achuriada do quadriculado represente a seção transversal de um copo cilíndrico inserto no bloco inicial. Ver-se-á que o mesmo copo cilíndrico, após a extrusão, apresentará uma seção transversal totalmente deformada. Pode-se perceber ainda que a maior distorsão ocorre na parte interna e no fundo da peça. No final deste trabalho, através de micrografias, chegar-se-á à mesma conclusão.



CAPITULO 2

Preliminares

2.1 — Justificativa da escolha da peça

O processo de extrusão é influenciado por uma gama variada de fatores (material a extrudar, estado de encruamento do mesmo, forma da peça, forma e dimensões do bloco inicial, entre outros). A abordagem de todos esses fatores no estudo teórico do processo de extrusão é extremamente difícil, de vez que, via de regra, não se conhece a maneira exata de como influem a maioria deles.

A fim de facilitar o tratamento matemático, impunha-se, pois, a adoção de uma peça de forma simples. Esta solução facilitaria também a execução da ferramenta, tornando possível sua construção no próprio Centro Tecnológico.

Face a estas considerações, optou-se pela conformação de um copo cilíndrico, por extrusão inversa, em aço ABNT 1010, de acordo com a figura 1.

Os blocos iniciais para a conformação desta peça foram cortados de barras comerciais de uma polegada de diâmetro, com altura $h_0 = 9,4$ mm, obtendo-se desta maneira o volume de material necessário.

2.2 — Fundamentos teóricos

Houve necessidade de se fazer uma estimativa prévia dos esforços que seriam desenvolvidos no decorrer da extrusão, a fim de verificar qual seria a prensa mais recomendável para o caso.

Para tanto utilizaram-se o modelo (figura 2) e a formulação descrita por Feldmann², para o cálculo da extrusão inversa de aço, na confecção de peças de forma idêntica à que se pretendia obter.

O processo consiste em considerar a pressão total necessária(p) como sendo a soma de uma pressão axial(p_A) uma pressão lateral(p_L), i. é,
 $p = p_A + p_L$.

As pressões axial e lateral são calculadas pelas expressões

$$p_A = k \left(1 + \frac{u d}{3h} \right) \text{ e } p_L = k \left[1 + \frac{h}{s} \left(0,25 + \frac{u}{2} \right) \right]$$

Nas fórmulas acima, k_{f_1} é a resistência à mudança de forma, cor-

respondente a uma deformação logarítmica principal $\partial_{g_1} = \ln \frac{h_0}{h}$, k_{f_2}

é a resistência à mudança de forma, correspondente à deformação logarít-

$$\text{mica total } \vartheta = \ln \frac{h_o}{h} \left(1 + \frac{d}{8s}\right) = \vartheta_1 \left(1 + \frac{d}{8s}\right), \text{ u é o coeficiente de atrito.}$$

Os parâmetros referidos nas fórmulas anteriores tem, no presente estudo, os seguintes valores:

$$h_o = 9,4 \text{ mm}$$

$$d = 20 \text{ mm}$$

$$s = 3,5 \text{ mm}$$

$$u = 0,1 \text{ (aço contra aço)}$$

Tem-se, então,

$$\vartheta = \ln \frac{9,4}{h} \text{ e } \vartheta = 1,714 \vartheta_1$$

As resistências à mudança de forma, k_1 e k_2 , foram tomadas a partir de uma curva dada por Feldmann³ para o aço alemão CK 10, e que aparece transcrita como sendo a figura 3. A parte tracejada significa extrapolação para utilização neste trabalho.

Considerando ainda, $P = \text{força total necessária} = p \frac{\pi d^2}{4}$, podem-se formar a tabela 1 e a figura 4, que foram obtidas num computador IBM 1130, através de um programa em FORTRAN.

Como se pode observar, a força máxima teórica é de aproximadamente 61,5 toneladas, e foi escolhida uma prensa de excêntrico de 85 toneladas, de que os laboratórios do Centro Tecnológico dispõe.

No apêndice 1 poderão ser encontrados detalhes da ferramenta utilizada.

CAPÍTULO 3

Medição da Força

3.1 — Escolha do método

A medição da força a partir do punção não oferece tanta complexidade quanto a medição na matriz, cujo projeto, eventualmente, deveria ser inclusive modificado para tal fim sem qualquer vantagem específica em contrapartida.

Quanto ao processo de medição, a escolha foi feita com base nas considerações que se seguem, para os diversos processos conhecidos de medição de força, quais sejam: ^{4, 5}

- por extensômetros mecânicos;
- por extensômetros óticos;
- por extensômetros acústicos;
- por extensômetros pneumáticos;
- por foto-elasticidade;
- por extensômetros elétricos.

Extensômetros mecânicos

São inadequados para o caso, principalmente por se tratar de força de impacto. Além disso, apesar de alguns modelos comerciais possuírem boa precisão e sensibilidade, apresentam dificuldades em sua operação, notadamente no que tange à união entre eles e a peça.

Extensômetros óticos

Possuem as mesmas desvantagens dos anteriores, com exceção de uma: podem ser utilizados na medição de forças dinâmicas, embora de baixas frequências. No entanto, não é o melhor processo para isso.

Extensômetros acústicos

Não se conhece nenhum equipamento comercial para tal fim. Acredita-se, no entanto, que mesmo um equipamento completo dificilmente traria tantas vantagens quantas as apresentadas pelo método que se vai utilizar.

Extensômetros pneumáticos

O sistema pneumático é, atualmente, usado em larga escala no controle de dimensões de peças usinadas, como é o sistema Solex mas praticamente não é mais empregado para medir deformações em peças.

Foto elasticidade

Este sistema pode ser utilizado para cargas dinâmicas periódicas, quando então a leitura ou gravação dos resultados são feitas com auxílio de uma lâmpada estroboscópica. No caso em apreço, a leitura só poderia ser feita após terem sido os resultados gravados em filme de alta velocidade, o que complicaria sobremaneira sua utilização, tornando-a, inclusive, anti-econômica.

Extensômetros elétricos

Os de capacitância variável e indutância variável têm a desvantagem de seu grande tamanho. Além do mais, o Centro Tecnológico não possui tal equipamento.

O uso de extensômetros elétricos de resistência variável foi o que apresentou maiores vantagens. Entre as principais podem ser citadas:

- sensibilidade e precisão acima das exigidas;
 - facilidade de montagem;
 - facilidade de registro dos resultados;
 - existência de equipamento apropriado.
- Foi, por tudo isto, o método escolhido.

3.2 — Fundamentos do processo

A equação que governa o comportamento de um extensômetro elétrico de resistência variável é: ^{6, 7, 8}

$$\frac{\Delta R}{R} = K\epsilon$$

onde ΔR é a variação de resistência do extensômetro, R sua resistência nominal, K a constante do extensômetro, obtida num ensaio simples de tração e fornecida pelo fabricante, e ϵ é a variação relativa de seu comprimento.

Desde que o extensômetro esteja solidário a uma peça, sofrendo com isto a mesma deformação relativa, pode-se, medindo ΔR e conhecendo R e K calcular ϵ por meio da equação já vista,

$$\epsilon = \frac{\Delta R}{RK}$$

Com o auxílio da lei de Hooke transforma-se ϵ na tensão equivalente,

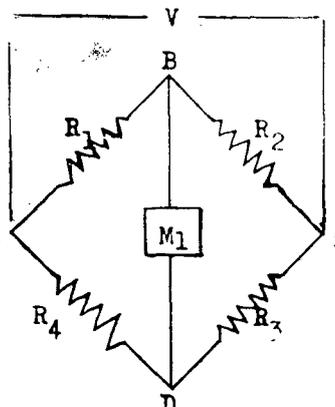
$$S = E\epsilon,$$

e desta pode-se passar à força que está atuando na peça.

Este procedimento é assim simples quando o estado de tensões for uniaxial, como no presente caso. Para estados duplos e triplos de tensões a análise é mais complexa, exigindo rosetas de extensômetros.

O valor de ΔR pode ser obtido numa ponte de Wheatstone, onde é medida a correspondente variação de tensão.

Seja, por exemplo, a ponte de Wheatstone esquematizada a seguir:



R_1, R_2, R_3 e R_4 são resistências que equilibram a ponte, M_1 é um voltmetro com alta impedância de entrada e V é uma fonte de tensão constante.

Se as resistências sofrerem variações $\Delta R_1, \Delta R_2, \Delta R_3$ e ΔR_4 , o voltmetro acusará uma tensão dada por:

$$\Delta V = \frac{R_1 R_2}{(R_1 + R_2)^2} \left(\frac{\Delta R_1}{R_1} + \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_2}{R_2} - \frac{\Delta R_4}{R_4} \right) V$$

Imagine-se agora que, R_2 e R_4 sejam duas resistências fixas, R_1 e R_3 sejam dois extensômetros de igual resistência, i. é, $\Delta R_2 = \Delta R_4 = 0$ e $R_1 = R_3$.

Nestas condições, a equação anterior se transforma em

$$\Delta V = \frac{R_1 R_2}{(R_1 + R_2)^2} \left(\frac{\Delta R_1}{R_1} + \frac{\Delta R_3}{R_1} \right) V$$

Se a disposição dos extensômetros e o carregamento forem tais que,

a) $\Delta R_1 = \Delta R_3$, então a equação acima fica sendo

$$\Delta V = \frac{2R_1 R_2}{(R_1 + R_2)^2} \frac{\Delta R_1}{R_1} V; \quad (1)$$

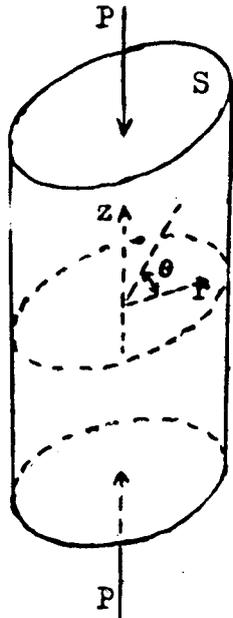
b) $\Delta R_1 = -\Delta R_3$, a mesma equação fica

$$\Delta V = 0 \quad (2)$$

3.3 — Escolha do extensômetro.

O punção tem uma parte especialmente projetada para permitir a colagem de extensômetros. É a porção de 30 mm de diâmetro por 54 mm de comprimento, onde se supõe vigorar um estado uniaxial de tensões, sendo a correspondente tensão de compressão dada por

$$S = \frac{P}{S}$$



Pela lei de Hooke as deformações relativas serão:

$$\epsilon = \frac{z}{E} \quad \epsilon_o = \epsilon_r = \frac{z}{E}$$

onde E é o módulo de elasticidade e ν é o módulo de Poisson.

Adotando a máxima força prevista tem se

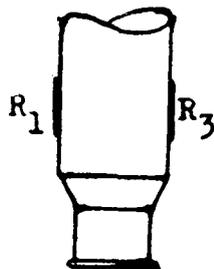
$$\epsilon_{z\text{máx}} = -0,0041, \quad \epsilon_{r\text{máx}} = \frac{\epsilon_{z\text{máx}}}{\nu} = 0,001353.$$

Com base na deformação relativa máxima principal ($\epsilon_{z\text{máx}}$) e com o auxílio de um catálogo da Philips,

foi selecionado o extensômetro PR 9810 C/11. Trata-se de um extensômetro compensador de temperatura, embora tal condição não fosse essencial, no caso. A colagem foi feita com cimento PR 9841 + PR 9244, também de fabricação Philips.

3.4 — Montagem dos extensômetros.

O punção está sujeito, por contingências de serviço, a somente força de compressão. Mesmo assim, nada impede que ele sofra flexões durante a extrusão, pois a resultante das forças de compressão pode ficar descentrada em relação ao seu eixo. Este fato seria decorrente da descentragem do bloco inicial em relação ao furo da matriz, bem como do não paralelismo das faces do mesmo bloco.

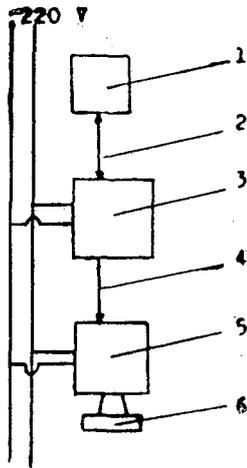


Para evitar, então, que uma possível flexão tornasse falsos os resultados, foram colados no punção dois extensômetros iguais e diametralmente opostos, que colocados na ponte de Wheatstone já discutida no lugar de R_1 e R_3 , aproveitam as vantagens citadas nos itens a) e b) daquele comentário. Em outras palavras, provocam dupla sensibilidade (equação (1)) no registro da força de compressão, e eliminam os efeitos de flexão (equação (2)).

3.5 — Operação dos extensômetros.

3.5.1 — Equipamentos utilizados.

Estão representados no esquema ao lado.



1 — Punção e ponte de Wheatstone formada pelos dois extensômetros (R_1 e R_3) já mencionados, e por duas resistências fixas, escolhidas adequadamente para permitir zeragem;

2 — Cabos elétricos blindados com comprimento aproximado de seis metros;

3 — Medidor de deformação marca TPW, tipo 4D3. Alimenta a ponte de Wheatstone com uma tensão conveniente, função da resistência nominal do extensômetro (8 volts para 600 oms), permitindo também que se faça a zeragem do sistema. Além disso recebe de volta o sinal da ponte, amplifica-o em 8 escalas diferentes, transformando-o em seguida em deformação relativa que pode ser lida diretamente. É possível, ainda, tirar dele, em forma de tensão ou corrente, o sinal correspondente

à deformação do extensômetro. No presente caso utilizou-se a saída de tensão para injetá-la no osciloscópio;

4 — Cabo blindado com 40 centímetros de comprimento;

5 — Osciloscópio, tipo PM3220, marca Philips. Possui inúmeros recursos. O eixo horizontal, x , pode ser varrido automaticamente, com velocidades desde 0,5 seg/cm até 0,5 seg/cm. Pode-se também, e assim se fez neste trabalho, condicionar o início de varredura horizontal ao aparecimento de um certo nível de tensão no osciloscópio. Após a partida o deslocamento é automático e com a velocidade previamente escolhida.

A escala vertical tem também ampla gama de variação contínua, desde 0,01 volts/cm até 20 volts/cm;

6 — Máquina fotográfica, marca Exakta, acoplada ao osciloscópio. As fotografias foram tiradas com um tempo médio de exposição de 5 segundos, utilizando-se filme Kodak (400 ASA — 27 DIN).

3.5.2 — Escolha e aferição das escalas

O visor do osciloscópio é um retângulo de 8 centímetros de altura por 10 de largura, quadriculado em centímetros. As escalas deveriam fornecer uma curva que aproveitasse bem o tamanho do visor.

A escala horizontal foi determinada por experiências, que indicaram a de 0,055 seg/cm como a mais apropriada.

Na escolha da escala vertical, o procedimento foi o seguinte: utilizando uma máquina de ensaio à tração e compressão de 40 toneladas, submeteu-se o punção a cargas de 5, 10, 15, . . . , 35, 40 toneladas, e foram lidas, ao mesmo tempo, as tensões na saída do medidor 3, estando este ajustado na escala 100 (ϵ %). Estas tensões correspondem às injetadas no osciloscópio, quando o punção está sujeito às respectivas cargas já mencionadas. Os valores de tensão obtidos em cinco testes, bem como a sua média, estão na tabela 2, que foi transformada na figura 5, utilizando-se as médias. Nota-se nessa figura, a linearidade satisfatória, embora não perfeita, da tensão na saída do medidor (entrada do osciloscópio) em relação à carga no punção. Supõe-se, ainda, que esta linearidade continua

até uma carga de aproximadamente 70 toneladas (parte tracejada), suposição esta baseada em dados fornecidos pelos fabricantes no catálogo dos extensômetros.

Supondo, então, uma carga máxima de 70 toneladas, chegou-se à conclusão de que a escala vertical mais apropriada era a de 0,22 volts/cm, como se pode ver na tabela 2 e figura 5. Além do mais, é uma escala que permite fácil leitura, pois fornece 10 ton/cm.

Existe no osciloscópio um ganho graduado de 0,20 volts/cm (ajuste grosseiro). O ajuste fino com o qual se completaria a escala para 0,22 volts/cm infelizmente não traz graduação. Para resolver o problema, ligou-se o osciloscópio ao sistema estando o mesmo calibrado em 0,20 volts/cm, carregando-se a seguir o punção com 40 toneladas, e fazendo, com o auxílio do ajuste fino, corresponder a essa carga um deslocamento vertical de 4 centímetros. Para maior certeza, as cargas foram variadas, obtendo-se sempre uma perfeita correspondência de 100 toneladas de força por centímetro de deslocamento do ponto luminoso do osciloscópio.

CAPITULO 4

Fosfatização

4.1 — Razões de seu uso

A bibliografia ^{9, 10, 11, 12} é pródiga em acentuar a necessidade, bem como as vantagens, da fosfatização como auxílio na lubrificação de peças extrudadas a frio. Entre essas vantagens vale ressaltar o fato de que uma superfície fosfatizada absorve uma quantidade maior de lubrificante (até 13 vezes mais) do que a superfície não tratada. Isto se deve à camada de fosfato que não é contínua, mas bastante porosa. Para que o processo seja economicamente viável, é necessário que o tempo de fosfatização seja pequeno de 1 a 5 minutos.

A prodigalidade citada termina aí. Detalhes quanto à composição dos banhos fosfatizantes não os há. É bastante dizer que, de todos os livros e revistas consultadas, em apenas um lugar foram encontradas indicações nesse sentido. ¹³

4.2 — Roteiro utilizado

A fosfatização requer, basicamente, dois tratamentos anteriores:

- desengraxamento
- decapagem.

Existem inúmeras soluções comerciais para o desengraxamento, bem como para a decapagem. Como não se possuía experiência no setor, nem equipamentos apropriados, optou-se por uma solução mais simples, embora mais trabalhosa.

A decapagem dos blocos iniciais, cilindros de aço com 25,4 mm de diâmetro e 9,4 mm de altura, foi feita em esmeril, cuidando-se de tirar somente o necessário, para não introduzir maiores modificações nas suas dimensões. Uma vez decapados, os cilindros de aço foram desengraxados numa solução de sabão comum, onde ficaram até o instante de serem lavados em água corrente e fosfatizados. Após a fosfatização foram novamente lavados em água corrente e secados numa estufa, durante aproximadamente 5 minutos à temperatura de $70^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$.

Em resumo, pode-se dizer que houve:

- decapagem em esmeril;
- desengraxamento em solução de sabão comum;
- lavagem em água corrente;
- fosfatização;
- lavagem em água corrente;
- secagem em estufa.

Sabia-se que, com os corpos de prova decapados em esmeril, a camada de fosfato seria de cristais finos.¹²

Em cada 500 ml de banho fosfatizante foram tratados sempre 4 corpos de prova, o que equivale, aproximadamente, a 70 cm^2 de superfície. A recomendação era de, no máximo, 50 cm^2 por 500 ml de solução,¹³ para evitar empobrecimento do banho.

Os dois últimos fatos, camada com cristais finos e superfície tratado por banho, não invalidam o objetivo deste trabalho, uma vez que todos os corpos de prova foram sujeitos às mesmas condições.

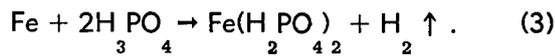
Dentre os equipamentos utilizados podem ser citados um aquecedor elétrico, um Becker de 600 ml, um pequeno balde feito de tela, um termômetro, pipetas, balança e uma estufa.

4.3 — A fosfatização como processo químico

Os processos de fosfatização são baseados em soluções diluídas de ácido fosfórico, H_3PO_4 , contendo, junto ou separadamente, fosfatos primários de ferro, manganês ou zinco, $M(H_2PO_4)_2$, ($M=Fe, Mn, Zn$).

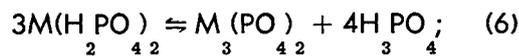
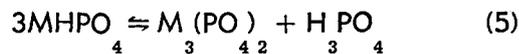
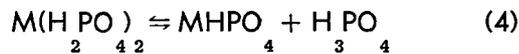
Durante a fosfatização podem ser admitidas as seguintes reações:

— o ácido fosfórico livre reage com a superfície do ferro sob tratamento da seguinte forma:

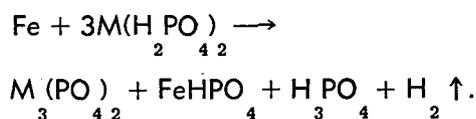


havendo então uma redução na concentração do H_3PO_4 na imediata vizinhança da superfície metálica, i. é, na interface metal-solução;

— os fosfatos primários de Zn, Fe, ou Mn se dissociam em soluções aquosas: ($M=Fe, Zn$ ou Mn)

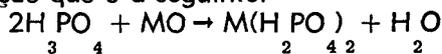


— a redução de concentração do H_3PO_4 pela equação (3), desloca o equilíbrio das equações (4), (5) e (6) para a direita, ocasionando a deposição de fosfato secundário, $MHPO_4$ pouco solúvel, e de fosfato terciário, $M_3(PO_4)_2$ insolúvel, na superfície metálica. A equação a seguir dá uma indicação da reação completa:

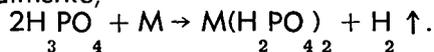


É importante manter uma certa relação entre o ácido fosfórico livre e o teor de fosfato. Um excesso de ácido livre pode retardar a dissociação dos fosfatos primários e secundários e impedir a deposição do fosfato terciário, podendo também ocasionar perda excessiva do metal, com o revestimento tornando-se pouco aderente e pulverulento. Quando o teor de ácido livre é baixo, a dissociação dos fosfatos ocorre tanto na solução quanto na interface metal-solução, ocasionando a precipitação de fosfatos insolúveis, sob a forma de lama.

Quando é utilizado um óxido de metal em lugar do metal, ocorre uma outra reação que é a seguinte:



e principalmente,



Obtido este fosfato primário, as reações continuam normalmente a partir da reação (4).

Para acelerar o processo são empregados nitratos, nitritos, cloratos ou peróxido de hidrogênio. O acelerador utilizado neste trabalho foi o ácido nítrico, que reagindo com o metal, formava, acredita-se, os nitratos acima mencionados.

4.4 — **Composição, obtenção e observações sobre as soluções fosfatizantes empregadas**

Foram utilizadas 5 soluções, variando-se a composição propriamente dita, e/ou a obtenção das mesmas.

Soluções nº 1

Composição:

- 2 gramas de pó de zinco
- 4 ml de ácido fosfórico xaroposo
- 1,5 ml de ácido nítrico
- 500 ml de água

Obtenção:

O pó de zinco e o ácido fosfórico foram deixados a reagir durante 5 minutos. O resultado foi posto na água, e em seguida acrescentado o ácido nítrico.

Observação:

Depositou um pouco de pó de zinco.

Solução nº 2

Composição:

- idêntica à solução nº 1.

Obtenção:

O pó de zinco e o ácido fosfórico reagiram também durante 5 minutos, e ao resultado desta reação foi adicionado o ácido nítrico, já dissolvido em 10 ml de água. Decorridos 5 minutos a solução foi completada com 490 ml de água.

Observações:

houve deposição de fosfatos insolúveis sob forma de lama branca, no fundo do recipiente.

A adição do ácido nítrico, mesmo dissolvido em 10 ml de água, provocou uma reação relativamente violenta e fortemente exotérmica. Exotérmica, embora não tanto, é também a reação do pó de zinco com ácido fosfórico.

Solução nº 3

Composição:

- 2 gramas de pó de zinco
- 6 ml de ácido fosfórico xaroposo
- 1,5 ml de ácido nítrico
- 500 ml de água

Obtenção:

Foram misturados ao mesmo tempo os dois ácidos com o pó de zinco. A reação foi violenta e exotérmica, com despreendimento de gases. Após 5 minutos foi adicionada a água.

Observação:

O teor de ácido fosfórico foi aumentado para 6 ml uma vez que com 4 ml havia muita deposição de fosfatos insolúveis, o que não mais ocorreu com 6 ml de ácido fosfórico.

Solução nº 4

Composição:

- 3 gramas de óxido de zinco
- 4 ml de ácido fosfórico xaroposo
- 1,5 ml de ácido nítrico
- 500 ml de água

Obtenção:

Idêntica à usada na solução nº 1, substituindo-se o pó de zinco pelo óxido do mesmo metal.

Observação:

Depositou um pouco de óxido de zinco

Solução nº 5

Composição:

- idêntica à da solução nº 4
- Mesmo procedimento utilizado na obtenção da solução nº 2, com a devida substituição do pó de zinco pelo óxido de zinco.

Observações:

Depositou um pouco de óxido de zinco.
Aparentemente não houve nenhuma reação entre o óxido de zinco e o ácido fosfórico.

4.5 — Tempos e temperaturas de fosfatização

Tanto o tempo de fosfatização quanto a temperatura do banho influem bastante sobre as características da camada de fosfato, principalmente no que diz respeito à quantidade de fosfato depositado. ¹²

Procurando verificar os efeitos desses fatores sobre a força necessária à extrusão, foram tomados os tempos de 1, 2, 4 e 6 minutos e as temperaturas de 50°C + 1°C, 75°C + 1°C e 90°C + 2°C.

Em todos os testes, antes da extrusão, os corpos de prova ficaram uma média de 5 minutos num banho de óleo mineral.

Capítulo 5

PRIMEIRAS EXPERIÊNCIAS

5.1 — Familiarização com o equipamento de medição

Com o objetivo de adquirir maleabilidade no uso de extensômetros e demais equipamentos descritos no capítulo 2, foi utilizada a peça da figura 6.

Na parte central da mesma foram coados dois extensômetros, como se fez posteriormente no punção. Seguindo-se as instruções do catálogo do aparelho medidor de deformações, fizeram-se todas as ligações, desde a ponte de Wheatstone até o osciloscópio. As duas resistências fixas da ponte foram ligadas aos extensômetros por fios elétricos de aproximadamente 80 centímetros de comprimento.

Estando, assim, todo o sistema montado, a peça da figura 6 foi submetida a forças de compressão numa máquina de ensaio a tração e compressão, fazendo-se a medida de tensão através dos extensômetros.

Numa primeira experiência, notou-se que os resultados não mereciam confiança, porque podiam ser facilmente alterados, bastando para isso movimentar os fios que ligavam as resistências fixas aos extensômetros, ou simplesmente aproximar a mão, mesmo sem tocá-los. O efeito capacitivo provocado nesses fios nas situações citadas, alterava o equilíbrio da ponte, falseando os resultados.

Com o intuito de evitar a influência desses fatores, as resistências foram colocadas junto aos extensômetros.

Depois disso, a tensão medida através dos extensômetros mostrou-se mostrou-se coerente com a calculada.

O passo seguinte foi a colagem dos extensômetros no punção e a montagem de todo o sistema para esta nova situação. A prática adquirida facilitou bastante estas operações. Após isto que se fez a escolha da escala vertical, conforme consta no capítulo 3. Acrescente-se ainda, que além da escala para o aço, foram determinadas, não com tanto cuidado, mais uma escala para a extrusão de chumbo (1 ton/cm), e outra para o alumínio (5 ton/cm).

5.2 — Extrusão de peças de chumbo e alumínio; Primeiras fotografias

Foram extrudadas peças em chumbo e alumínio visando a verificação dos problemas que eventualmente poderiam ocorrer na prensa mecânica, e a determinação das melhores condições para o registro fotográfico dos resultados.

A prensa, neste estágio, com o curso regulado em 45 mm, não apresentou problemas.

Na obtenção das melhores condições para fotografias o trabalho foi maior. Em primeiro lugar houve necessidade de substituir a placa dianteira do osciloscópio, porque o equipamento fotográfico existente no Centro Tecnológico não se adaptava ao mesmo. Com a substituição da placa por outra, conseguiu-se montar no osciloscópio o equipamento fotográ-

fico disponível. Gravaram-se, então, aproximadamente 30 resultados de testes com chumbo e alumínio, combinando diferentes tempos de exposição, iluminações do painel, intensidade da curva, aberturas do diafragma da máquina e diferentes filtros. Os melhores resultados foram obtidos com um tempo de exposição de 5 segundos, iluminação média do painel, intensidade média da curva, diafragma com abertura 4 e sem filtro.

Forças máximas registradas: 5 toneladas para o chumbo e 32 para o alumínio.

5.3 — Primeiras tentativas com o aço

Neste início de trabalho com o aço, os corpos de prova tinham um comprimento (h) em torno de 5 mm. Nos primeiros testes já ficaram patentes dois problemas:

1º) a energia fornecida pela prensa com um curso de 45 mm seria pouca nos testes definitivos;

2º) a deformação elástica da prensa era grande.

No que se refere ao primeiro problema, aumentou-se o curso da prensa, utilizando o maior possível que é de 800 mm. Este procedimento tem justificativa na figura 7, que dá a força disponível em uma prensa de ex-cêntrico de 85 toneladas em função da altura h^{α} . Aumentou-se também a energia disponível.

$$\begin{array}{l} H = 80 \text{ mm} \\ e \quad h^{\alpha} = 7,4 \text{ mm} \\ \text{tem-se } h^{\alpha} = 0,092 H \end{array}$$

Na figura 7 vê-se que nestas condições, a força disponível é de 78 toneladas, o que é suficiente.

Quanto à segunda dificuldade, foi feito, como segue, um cálculo aproximado das tensões e deformações máximas que poderiam ocorrer, para ver se as mesmas ficavam dentro de valores aceitáveis.

A figura 8 representa um esquema da prensa utilizada. As dimensões correspondentes são:

$$\begin{array}{l} a = 270 \text{ mm} \\ b = 700 \text{ mm} \\ c = 530 \text{ mm} \\ e = 350 \text{ mm} \\ h = 430 \text{ mm} \\ l = 1130 \text{ mm} \\ s = 50 \text{ mm (presumível face aos indícios externos, já que não há acesso para a tomada desta medida).} \end{array}$$

A superfície S da seção 1-2 é de 113000 mm². A tensão, na mesma seção, provocada por uma força normal de 85 toneladas será então:

$$S = 0,752 \text{ kg/mm}^2$$

Podem ainda ser calculados:

— momento fletor,

$$M = 52,7 \times 10^6 \text{ kg.mm}$$

— momento de inércia da seção 1-2 em relação à linha neutra A-A,

$$I = 741 \times 10^7 \text{ mm}^4;$$

— momento resistente da mesma seção,

$$W = 21,17 \times 10^6 \text{ mm}^3$$

Com estes valores obtêm-se as tensões máximas devidas ao momento M:

— na face 1,
 $S_1 = -2,494 \text{ kg/mm}^2$

— na face 2,
 $S_2 = 2,494 \text{ kg/mm}^2$

Somando a tensão devida à força normal e a aprovação pela flexão, conclui-se que a máxima ocorre na face 2, e vale

$$S_{2t} = 3,246 \text{ kg/mm}^2,$$

valor que dificilmente provoca ruptura em ferro fundido, mesmo por fadiga ¹⁵.

Sob a ação do momento M , a linha A-A adquire uma curvatura de raio ¹⁶.

$$r = \frac{EI}{M} f,$$

onde f é um fator que leva em conta a forma do montante, e fica usualmente entre 1 e 1,2.

Para a pior situação vem:

$$r = \frac{EI}{M} = 10 \times 10^5 \text{ mm}$$

No estado descarregado, as linhas B-B e C-C são paralelas. Com o momento M agindo, no entanto, o ângulo entre elas será

$$g = \frac{l}{r} \quad (7)$$

Praticamente pode-se considerar ainda que

$$g = \frac{l+f_1+f_2}{r+a+e} \quad (8)$$

e obter, através das equações (7) e (8),

$$f_1 + f_2 = \frac{l}{r} (a + e),$$

ou seja,

$$f_1 + f_2 = 0,7 \text{ mm.}$$

Experimentalmente, verifica-se ainda que o sistema de acionamento influi bastante na reformação total,

$$f_t = C (f_1 + f_2),$$

onde $C = 2,5 \dots 3$, conforme a prensa.

Tomando $C = 3$, tem-se

$$f_t = 2,1 \text{ mm.}$$

Conclusão:

Podem-se esperar, realmente, grandes deformações da prensa, sem que, no entanto, as tensões ultrapassem limites recomendáveis.

Alguns comentários adicionais sobre este problema serão feitos mais adiante, ao se abordar no capítulo 7 a forma da curva resultante.

CAPÍTULO 6

Experiências e Resultados

Procurando verificar a influência da fosfatização sobre a força de extrusão, e determinar a variação da força em função da espessura do fundo da peça, foram realizadas as seguintes séries de experiências:

6.1 — Força máxima necessária em função do tipo de fosfatização

Utilizaram-se cinco tipos de soluções fosfatizantes nas condições de tempos e temperaturas mencionadas no final do capítulo 4.

Para cada situação, proveniente da combinação dos fatores citados, foram feitos dois testes. Testou-se também a obtenção de uma peça extrudada sem ter sido previamente fosfatizada.

O projeto inicial previa uma peça com 2 mm de espessura de fundo. No entanto tornou-se difícil a obtenção de tal precisão de medida, por causa das grandes deformações da prensa.

Por ocasião do corte do bloco inicial, admitiram-se variações de $\pm 0,1$ mm em torno de seu comprimento nominal, 9,4 mm.

Por tudo isto, só foram levados em contas os testes que produziram peças com espessuras de fundo no intervalo entre 2,1 e 2,3 mm.

6.2 — Força necessária em função da espessura do fundo da peça obtida.

Estes testes permitiram, como se verá mais adiante, o levantamento experimental de uma curva correspondente à curva teórica da figura 4.

Empregaram-se corpos de prova não fosfatizados, e fez-se variar a espessura do fundo da peça, gravando em cada caso o resultado da força necessária.

6.3 — Resultados obtidos

Os resultados dos testes citados no item 6.1 estão nas figuras de 9 a 39 e os conseguidos nos testes do item 6.2 nas figuras de 40 a 50.

As curvas que se veem são de força de extrusão versus tempo. Na escala vertical, cada divisão correspondente a 10 toneladas, e na horizontal a 0,055 segundos.

Nos casos que serão mencionados nos itens 6.4.1 e 6.4.2 deste capítulo, somente o resultado de um dos testes foi incluído neste trabalho, embora se tenha feito dois.

As tabelas 3 e 4 resumem os resultados das figuras 9 a 39 e a tabela 5 das figuras de 40 a 50.

A figura 51 mostra a variação da força de extrusão em função da espessura do fundo da peça obtida.

6.4 — **Convenção empregada nas figuras de 9 a 50**

Para fácil identificação do teste correspondente à fotografia, empregou-se a seguinte convenção:

6.4.1 — **Três algarismos sob a curva**

As curvas identificadas por números compostos de três algarismos correspondem a ensaios nos quais a espessura do fundo da peça obtida esteve entre 2,1 e 2,3 mm (incluídos os extremos). Outrossim:

— o algarismo da centena indica a solução fosfatizante empregada, conforme numeração dada às mesmas no capítulo 3;

— o algarismo da dezena indica a temperatura do banho em que o corpo de prova foi fosfatizado. O nº 5 corresponde a $50^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$, o nº 7 a $75^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ e o nº 9 a $90^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$;

— o algarismo da unidade informa o tempo, em minutos, utilizado para a fosfatização do respectivo corpo de prova.

6.4.2 — **Dois algarismos sob a curva**

As curvas identificadas por dois algarismos separados por vírgula correspondem aos corpos de prova não fosfatizados. O código representa a própria espessura de fundo de peça obtida, expressa em milímetros.

6.4.3 — **Indicação SF**

A inscrição SF abaixo de uma curva dá a entender que a mesma foi obtida da extrusão de um corpo de prova não fosfatizado, e que a espessura do fundo da peça foi de 2,3 mm.

CAPÍTULO 7

Análise dos Resultados

Antes de qualquer análise são necessárias duas ressalvas. Uma se prende ao fato de que as peças obtidas apresentavam uma certa variação de medidas, principalmente na espessura do fundo, que esteve entre 2,1 e 2,3 mm. A outra se refere ao fato de que o aparelho de leitura apresenta pouca sensibilidade para a detecção de pequenas diferenças de força, como as que ocorreram. É suficiente recordar que uma tonelada de força significa somente um milímetro da escala vertical.

Torna-se conveniente, também, fazer uma análise da

7.1 — Forma das curvas obtidas

A forma das curvas representadas nas figuras de 9 a 40 não é a que se esperava. Esperavam-se, isto sim, curvas como a da figura 44, que é bem característica do fenômeno.

Como um auxílio na procura de explicação para a forma da curva, procurou-se localizar, no eixo horizontal, o final do curso ativo do estampo. Uma vez que a velocidade do eixo que comanda o excêntrico não se mantinha constante durante a extrusão, foi necessário detectar essa variação em função do tempo, o que se fez com o emprego de um pick-up indutivo e um registrador. O resultado obtido está na figura 52. Numa primeira aproximação, no entanto, supôs-se que a velocidade permanecesse constante e igual a 60 rpm. Assim, pôde-se calcular o tempo decorrido entre o contato do punção com o bloco e o final de seu curso, da maneira que segue:

O ângulo α (figura 7), correspondente ao primeiro contato punção e bloco, pode ser determinado com o auxílio da equação:

$$h^\alpha = \frac{H}{2} (1 - \cos \alpha),$$

onde $h^\alpha = 7,4$ mm
e $H = 80$ mm
ou seja $\alpha = 0,62$ rds.

O eixo do excêntrico que tem velocidade angular igual a 6,28 rds/seg percorre o ângulo α em 0,1 segundo. Na figura 52 nota-se perfeitamente que a variação de velocidade do eixo, neste curto espaço de tempo, pode ser desprezada sem maiores erros, i. é, o cálculo de tempo feito acima pode ser considerado correto.

Conclui-se, então, que o trabalho de extrusão propriamente dito termina antes do segundo pico da curva.

Com isto, tentou-se elaborar uma explicação para a forma das curvas, e que seria a seguinte:

O primeiro estágio, força crescente com o tempo, seria decorrente da força do punção extrudando o material, e ao mesmo tempo acelerando a massa da prensa. A tendência da força, como mostra a figura 51, seria a de manter-se aproximadamente constante até o fim do curso do estampo. Mas, no estágio seguinte, enquanto o punção sofreria diminuição de velocidade

(característica do acionamento por excêntrico), a massa da prensa estaria ainda com sua velocidade crescendo, devido à aceleração provocada pelo impacto, o que ocasionaria um alívio no punção, provocando, conseqüentemente, um decréscimo na força. No terceiro estágio, o punção começaria a subir com velocidade baixa ainda, enquanto a velocidade, agora em sentido contrário, da massa da prensa seria maior, resultando daí um aumento da carga no punção, e conseqüente aparecimento do segundo pico da curva.

Uma confirmação ou não desta teoria, poderia ser obtida, em trabalhos posteriores, estudando o comportamento da estrutura da prensa sob a ação de impulsos semelhantes ao provocado pela extrusão da peça em questão. É lógico que esse estudo deveria ser feito num sistema vibracional equivalente, depois de ter sido o mesmo convenientemente determinado.

É conveniente lembrar que dificilmente as ondulações da curva poderiam ser produzidas pelo sistema elétrico em si. Para dirimir possíveis dúvidas, colocou-se uma resistência de 1 K Ω em paralelo com cada extensômetro. Ligando-se repentinamente essas resistências ao circuito, estava-se simulando um impacto sobre o punção. A resposta no osciloscópio não apresentava nenhuma ondulação, mas um salto puro.

7.2 — Análise da força de extrusão como função da fosfatização

Pensava-se obter maior diferença entre as forças necessárias à extrusão, utilizando-se diferentes tipos de fosfatização.

Desprezando-se as ressalvas feitas no início deste capítulo, poder-se-ia dizer, segundo as tabelas 3 e 4 que há uma ligeira vantagem da solução número 1, principalmente com a temperatura de 50°C.

Admitindo, por outro lado, que as soluções fosfatizantes empregadas não diferiram essencialmente entre si, esperava-se, ao menos, uma grande diferença entre a força necessária para extrudar peças fosfatizadas e não fosfatizadas, o que não aconteceu. Somente o acabamento da peça na sua parte interna é que apresentou diferenças, sendo melhor nas peças fosfatizadas do que nas não fosfatizadas.

7.3 — Análise da força de extrusão em função da espessura do fundo da peça

Ao se compor os resultados obtidos nestes testes, e que estão retratados na figura 51, com os teóricos da figura 4, notam-se diferenças básicas. Estas diferenças estão bem retratadas na figura 53. Para as espessuras maiores, as forças obtidas experimentalmente são menores do que as teóricas. Há um aumento brusco da força em torno da espessura de 8 mm, o que não ocorre na curva teórica, e um patamar a partir da espessura de 5 mm até 2,3 mm, o que também não existe na teórica.

As duas primeiras diferenças podem ser explicadas pelo fato de que nos cálculos teóricos estava-se supondo que houvesse pressão lateral para qualquer espessura de fundo, ou em outras palavras, que o bloco inicial tivesse um diâmetro igual ao furo da matriz, o que não é verdade. O aumento brusco da força, supõe-se ocorrer exatamente quando a pressão lateral começa a existir. É difícil encontrar bases teóricas para esta suposição, uma vez que não se pode precisar qual é o deslocamento inicial do material.

O patamar, encontrado na curva experimental e inexistente na teórica, provavelmente é função do diferente comportamento plástico do aço ABNT 1010 em relação ao CK 10 da norma alemã.

7.4 — Análise micrográfica da peça extrudada

Com o objetivo de verificar a deformação sofrida pela estrutura do material durante a extrusão foram feitas as micrografias que aparecem nas figuras de 57 a 65, e que correspondem aos campos assinalados na figura 54.

Como foi comentado no começo do trabalho, a maior deformação se verificou no fundo e na parte interna da peça.

CONCLUSÃO

Os resultados mostram, claramente, que não há dificuldade alguma na extrusão do aço ABNT 1010 para a confecção de peças semelhantes deste trabalho, mesmo sem usar fosfatização.

Por outro lado, é aconselhável utilizar, em trabalhos semelhantes, uma prensa de maior capacidade e mais rígida.

Querendo tirar conclusões precisas quanto à influência da fosfatização, é indispensável um controle bem rigoroso das dimensões do bloco inicial, para eliminar os efeitos de suas variações, bem como a utilização de um osciloscópio que permita maior sensibilidade de leitura dos resultados.

O método empregado na determinação prévia da força mostrou-se bastante satisfatório. Quanto à força de extrusão calculada pelo mesmo método a partir da pressão lateral, não se pode dizer o mesmo. No presente trabalho, eram realmente necessários 1.500 kg de força estática para a extração da peça, enquanto que o valor calculado era de 12.500 kg.

APÊNDICE 1

FERRAMENTA UTILIZADA

A figura 65 (em encarte) mostra a vista global da ferramenta empregada, as figuras 66 a 80 mostram-na em peças detalhadas.

Punção (figura 66)

Teve sua forma determinada pelo diâmetro interno e altura da peça, pela necessidade de pouca superfície de atrito e pelo fato de se querer medir a força de extrusão com auxílio de extensômetros de resistência variável. Cuidou-se ainda de evitar concentrações de tensões facilitando com isso o tratamento térmico. O diâmetro da parte superior do punção foi estabelecido pelo encaixe na prensa.

Esta peça, executada em aço VND de fabricação Villares, foi temperada em óleo SAE 40, revenida a 150° durante 30 minutos, ficando com dureza final de 60 RC.

Matriz inferior

Com o intuito de evitar que a tensão tangencial no diâmetro interno da peça da figura 67, por ocasião da extrusão, fosse muito elevada, colocaram-se sobre ela dois anéis de pressão (figuras 68 e 69).

Lange 17 da indicações sobre os valores de interferências a utilizar nesses casos. Para diâmetros de 58 mm e 100 mm as interferências aconselhadas são, respectivamente, $0,002 \times 58 \text{ mm} = 0,116$ e $0,001 \times 100 = 0,1 \text{ mm}$.

Os anéis em questão foram obtidos por torneamento fino, uma vez que não se dispunha de retificadora interna. Conseguiram-se, mesmo assim, interferências satisfatórias quais sejam, 0,085 mm e 0,13 mm, respectivamente, para os diâmetros de 58 mm e 100 mm. A montagem foi a quente.

Cabe ainda outra observação no que se refere a extração da peça extrudada. O projeto inicial supunha as peças das figuras 70 e 71 como uma única. No tratamento térmico esta peça trincava devido a alta concentração de tensão, provocada pela mudança brusca de diâmetro. Optou-se, por isso, pelo desdobraimento da citada peça em duas, i.é, corpo (figura 70) e haste (figura 71) isolados.

É evidente que num processo automatizado a extração seria feita com auxílio de mola. Durante este trabalho, no entanto, a extração foi conseguida manualmente, por impactos.

Tendo a mesma função da peça da figura 79, o primeiro projeto previa duas chapas com 9 mm de espessura, 50 mm de largura e 105 mm de comprimento, colocadas diametralmente opostas. No entanto, elas se mostram insuficientes e foram substituídas pela peça que vê na figura 79.

Convém assinalar ainda que as peças das figuras 67, 70, 71 e 72 foram feitas de aço VND de fabricação Villares, temperadas e revenidas (dureza final entre 58 e 60 RC). As restantes de aço ABNT 1020.

ALTT. MM	FI1	FI	KF1 KG/MM2	KF2 KG/MM	PAXL KG/MM2	PLAT KG/MM2	FORÇA TONS.
9.40	0.000	0.000	26.00	26.00	27.84	46.94	23.49
9.00	0.043	0.074	32.52	36.93	34.93	65.43	31.52
8.50	0.100	0.172	40.55	46.30	43.73	80.03	38.88
8.00	0.161	0.276	45.40	51.94	49.18	87.55	42.95
7.50	0.225	0.387	49.66	56.04	54.07	92.07	45.91
7.00	0.294	0.505	52.76	58.58	57.79	93.72	47.60
6.50	0.368	0.632	55.41	60.48	61.09	94.18	48.78
6.00	0.448	0.769	57.47	62.54	63.86	94.71	49.81
5.50	0.535	0.918	59.03	64.78	66.19	95.32	50.74
5.00	0.631	1.082	60.46	67.02	68.53	95.75	51.61
4.50	0.736	1.262	62.04	69.44	71.24	96.22	52.61
4.00	0.854	1.464	63.81	72.14	74.45	96.88	53.82
3.50	0.987	1.693	65.81	74.43	78.35	96.76	55.01
3.00	1.142	1.957	67.77	77.07	82.83	96.89	56.46
2.50	1.324	2.270	70.36	80.20	89.13	97.39	58.59
2.00	1.547	2.652	72.97	84.02	97.30	98.43	61.49

TABELA 1
CÁLCULO PRÉVIO DA FORÇA EXIGIDA

Carga (tons.)	Teste 1	Teste 2	Teste 3	Teste 4	Teste 5	Média
5	0,108	0,110	0,108	0,110	0,110	0,109
10	0,217	0,219	0,220	0,220	0,220	0,219
15	0,324	0,328	0,340	0,330	0,330	0,330
20	0,428	0,432	0,435	0,435	0,437	0,433
25	0,555	0,540	0,540	0,550	0,550	0,547
30	0,672	0,655	0,672	0,655	0,645	0,660
35	0,750	0,755	0,750	0,755	0,755	0,753
40	0,870	0,880	0,890	0,885	0,880	0,879

TABELA 2

Tensões (volts) injetadas no osciloscópio em função da carga atuante no punção

N° da solução fosfatizante	Temperatura do banho (°C)	Tempo (minutos)	Valores obtidos		
			Teste 1 *	Teste 2	Média
1	50	2	61,0	60,5	60,75
1	50	4	61,0	61,0	61,0
1	50	6	61,0	61,0	61,0
1	75	4	61,5	62,0	61,75
1	90	2	63,0	63,0	63,0
2	50	2	62,5	62,0	62,25
2	50	4	62,5	62,5	62,5
2	50	6	62,5	62,0	62,25
2	75	1	62,0	62,0	62,0
2	90	1	62,0	62,0	62,0
3	50	2	62,5	62,5	62,5
3	50	4	62,5	62,0	62,25
3	50	6	62,5	62,5	62,5
3	75	1	62,0	63,0	62,5
3	90	1	62,0	62,0	62,0

TABELA 3

Forças de extrusão utilizando as soluções 1, 2 e 3.
+ Corresponde à fotografia incluída neste trabalho.

N° da solução fosfatizante	Temperatura do banho (°C)	Tempo (minutos)	Valores obtidos		
			Teste 1 *	Teste 2	Média
4	50	2	62,0	63,0	62,5
4	50	4	62,5	63,0	62,75
4	50	6	63,5	62,5	63,0
4	75	2	63,0	62,5	62,75
4	90	2	62,0	62,0	62,0
4	90	4	62,0	62,0	62,0
4	90	6	62,0	62,0	62,0
5	50	2	61,0	61,0	61,0
5	50	4	62,0	62,0	62,0
5	50	6	62,0	62,0	62,0
5	75	2	63,0	63,0	63,0
5	75	4	63,0	62,5	62,75
5	75	6	62,5	61,5	62,0
5	90	2	63,0	62,0	62,5
5	90	4	63,0	62,0	62,5
SF	—	—	61,0	62,0	61,5

TABELA 4

Força de extrusão utilizando as soluções fosfatizantes 4 e 5, e sem fosfatizar.
+ Corresponde à fotografia incluída neste trabalho.

Espessura do fundo (mm)	Força (tons.)
9,3	13,5
8,8	18,0
8,5	22,5
8,1	29,5
7,8	51,5
7,4	58,0
6,4	59,0
5,4	60,5
4,5	61,0
3,4	61,0
2,9	61,5
2,3	61,5

TABELA 5

Forças de extrusão em função da espessura do fundo da peça

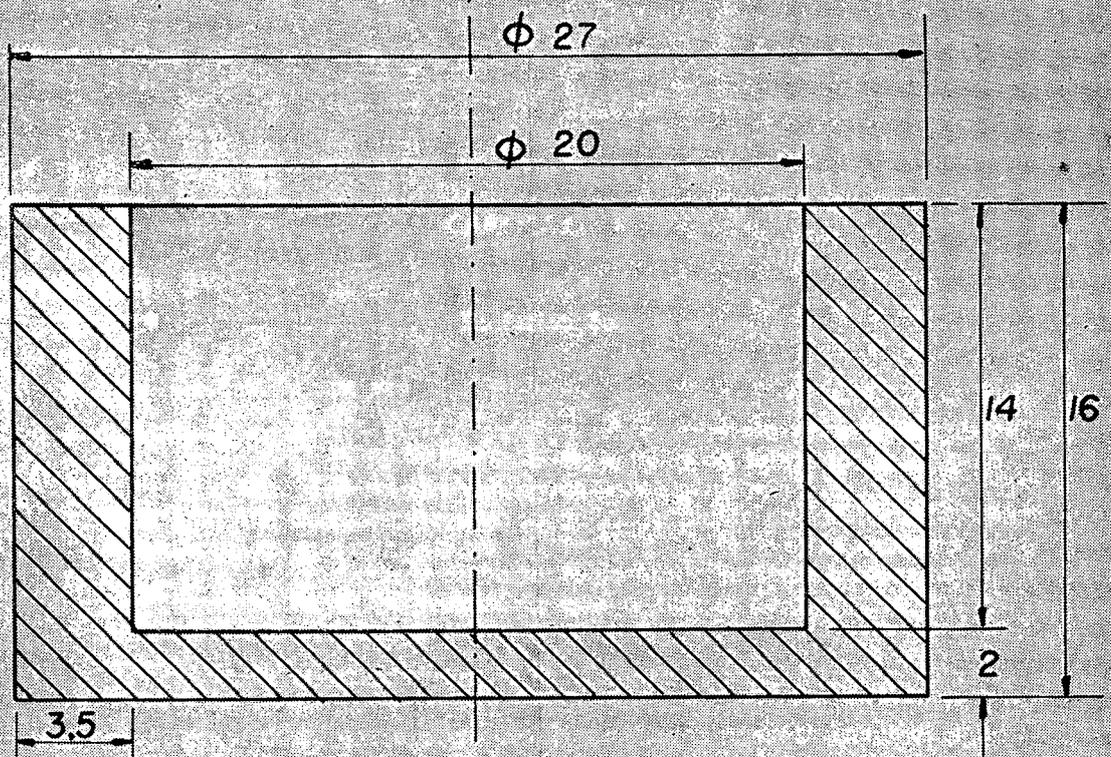


Figura 1 - Peça escolhida

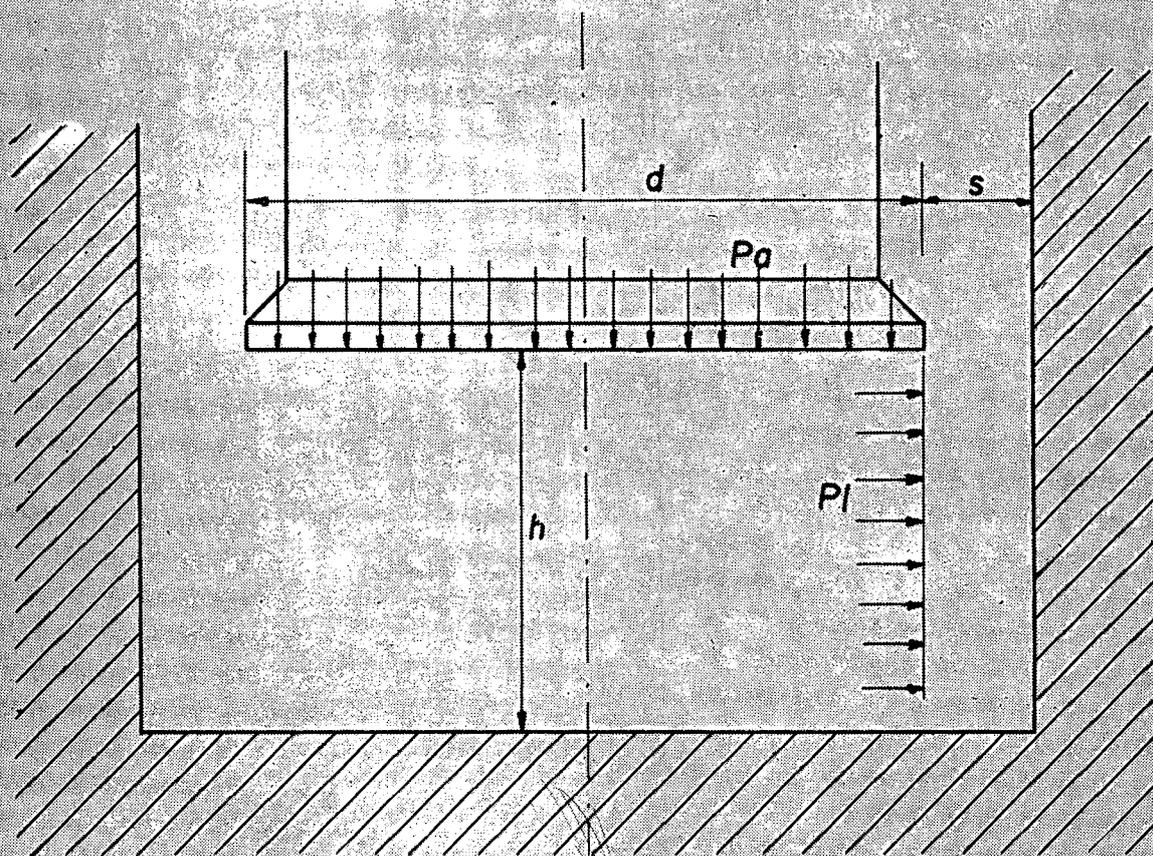


Figura 2 - Modelo para cálculo teórico das pressões

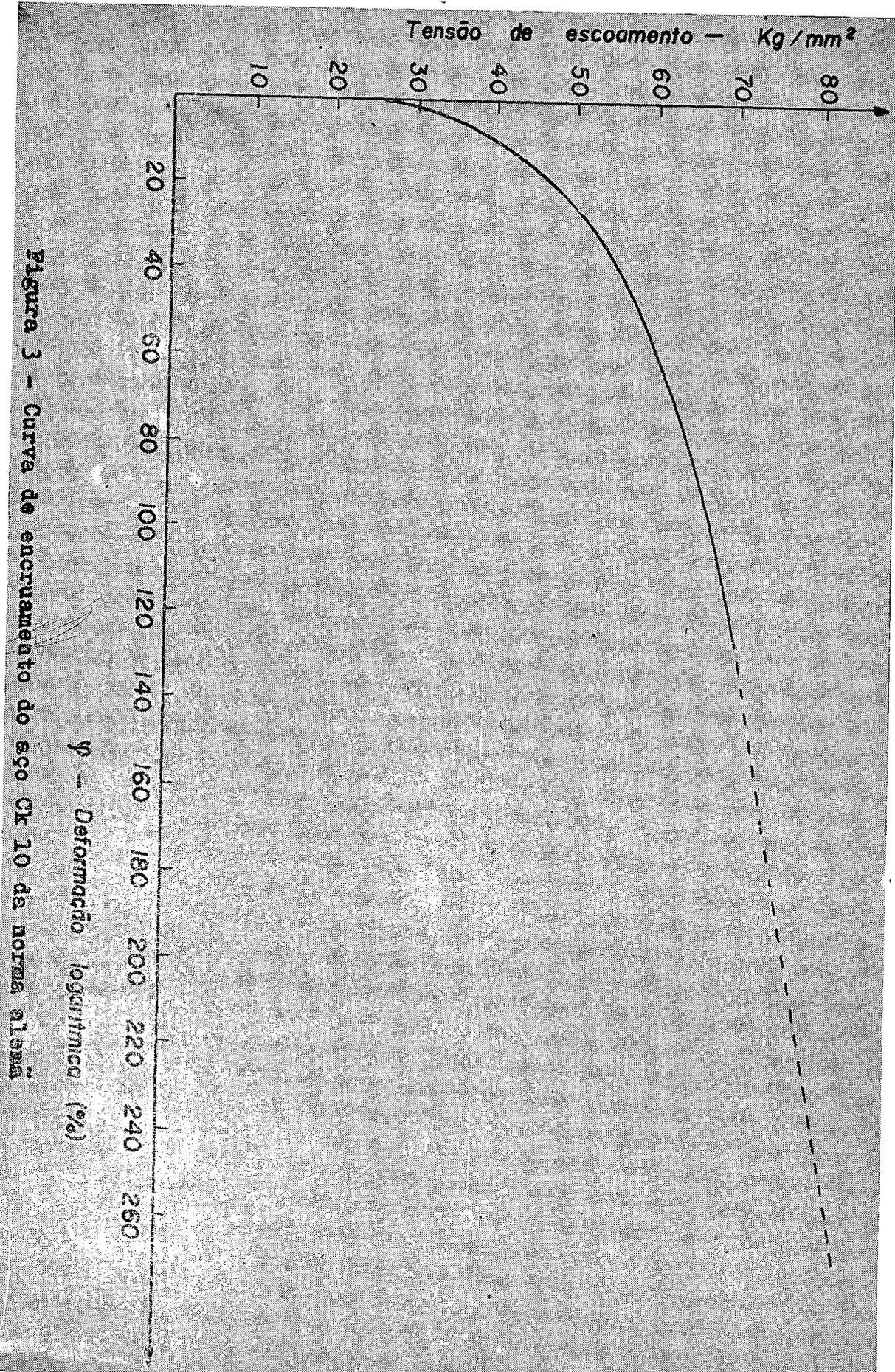


Figura 3 - Curva de encruamento do aço CR 10 da norma ABNT

ψ - Deformação logarítmica (%)

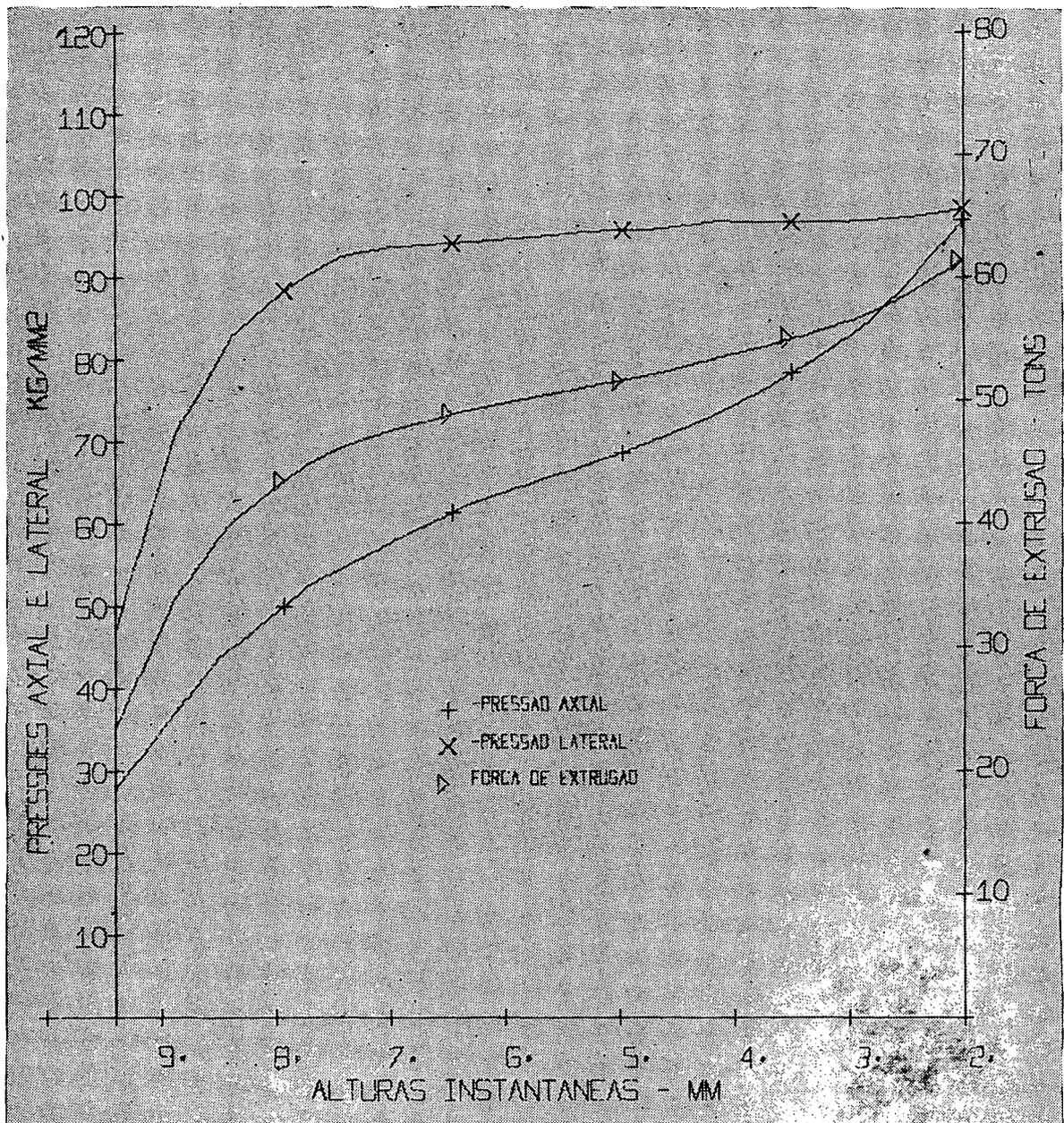


FIGURA 4
VARIACAO TEORICA DA FORÇA E PRESSOES EM FUNCAO DA ESPESSURA DO FUNDO DA PEÇA

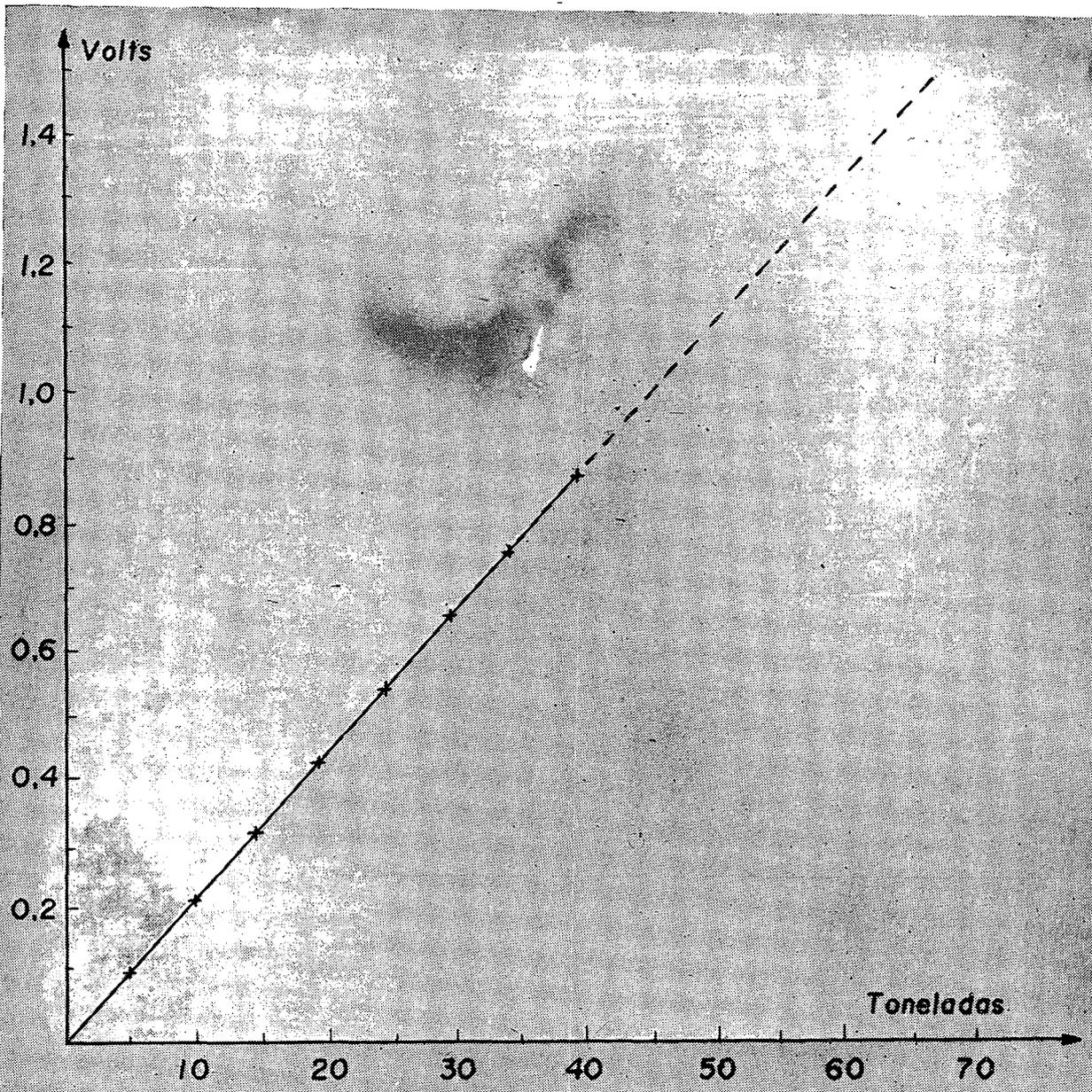


Figura 5

Tensões injetadas no osciloscópio versus carga no punção

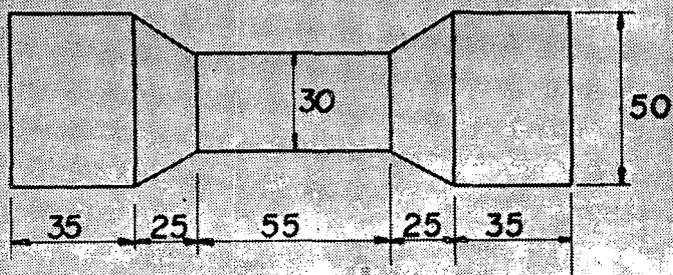


Figura 6

Peça utilizada nas primeiras experiências com o equipamento de medição de força

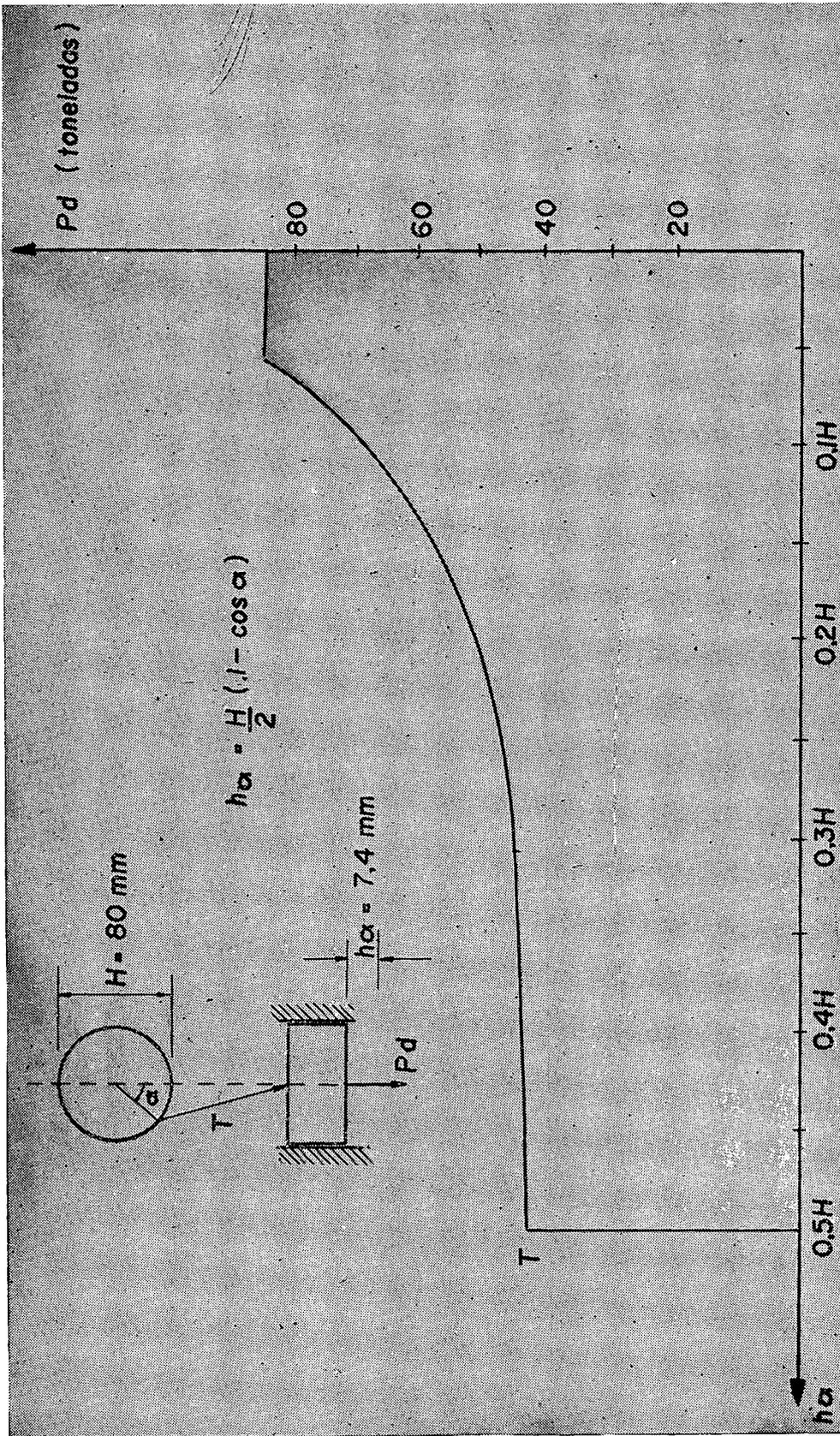
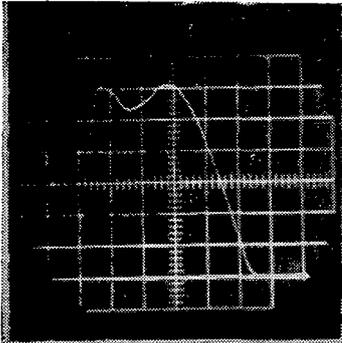
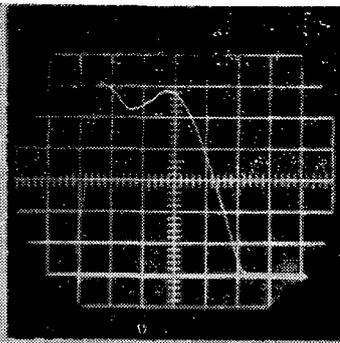


Figura 7

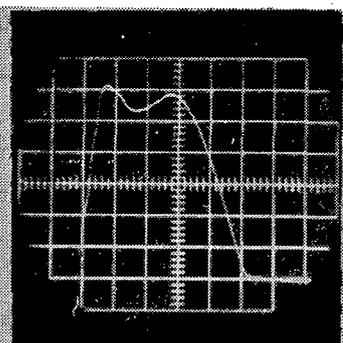
Fôrça disponível em uma prensa de excêntrico de 85 toneladas em função da altura $h\alpha$



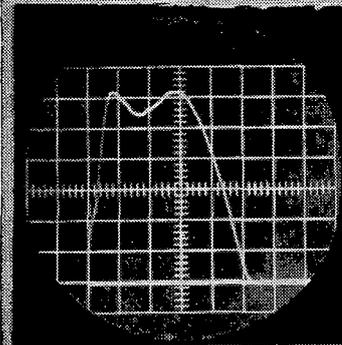
152
Figura 9



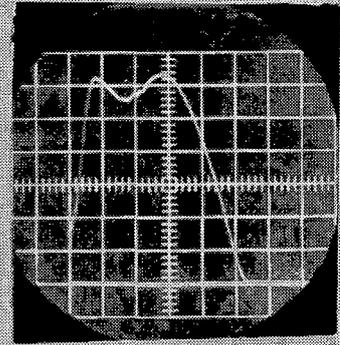
154
Figura 10



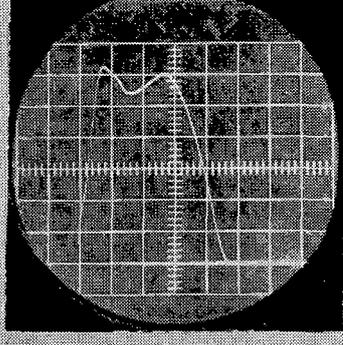
156
Figura 11



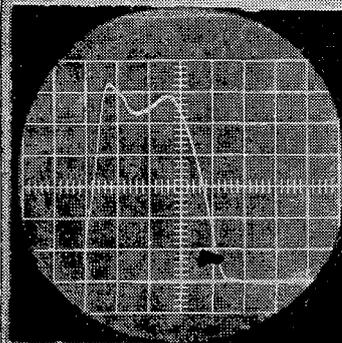
174
Figura 12



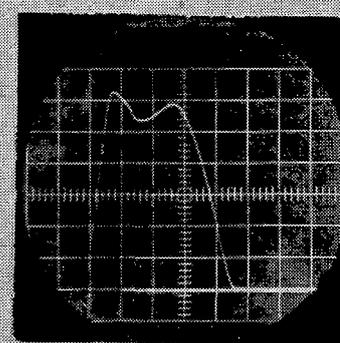
192
Figura 13



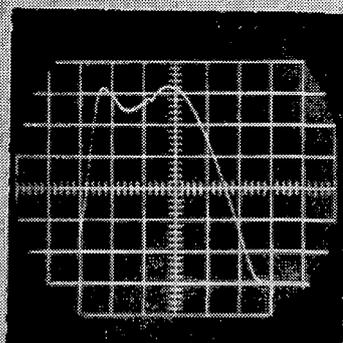
252
Figura 14



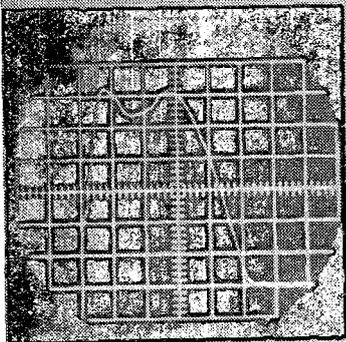
254
Figura 15



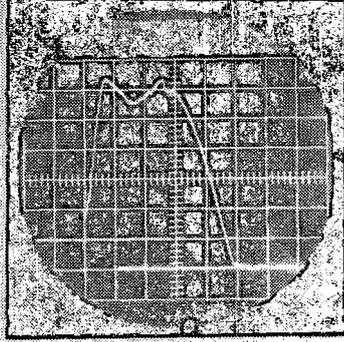
256
Figura 16



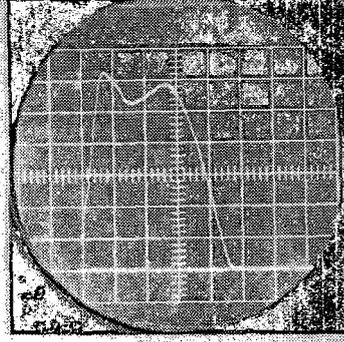
271
Figura 17



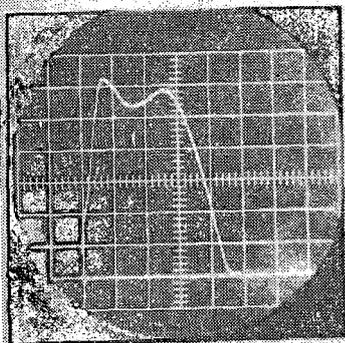
291
Figura 18



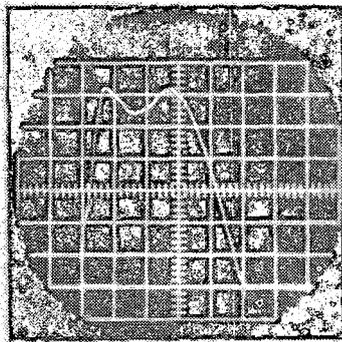
352
Figura 19



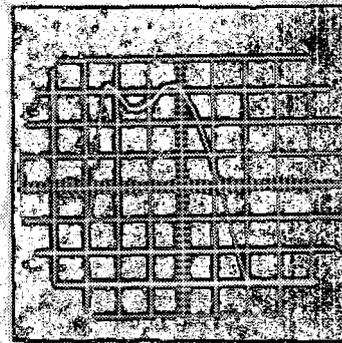
354
Figura 20



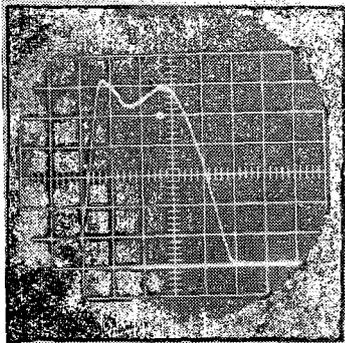
356
Figura 21



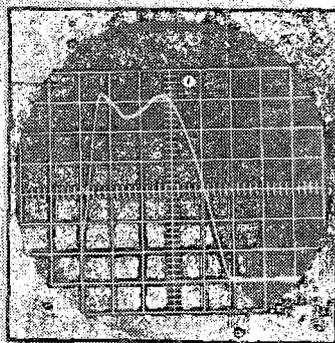
371
Figura 22



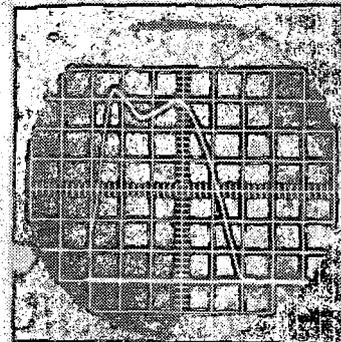
391
Figura 23



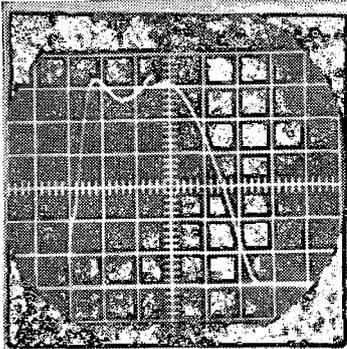
452
Figura 24



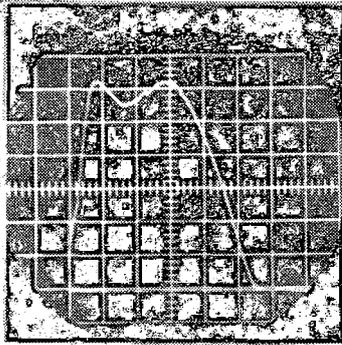
454
Figura 25



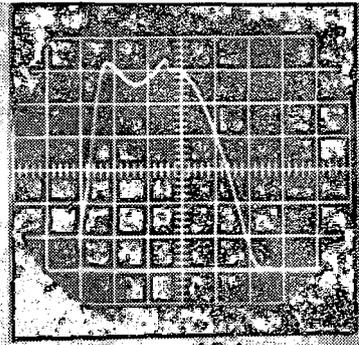
456
Figura 26



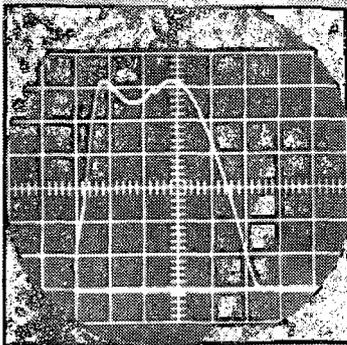
472
Figura 27



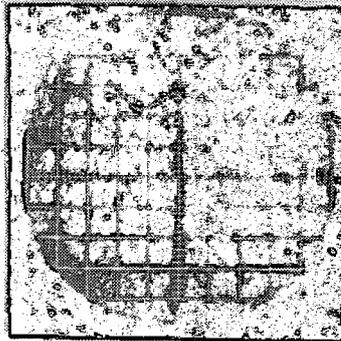
492
Figura 28



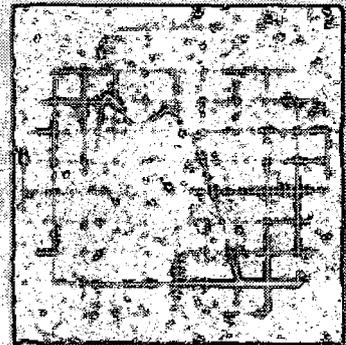
494
Figura 29



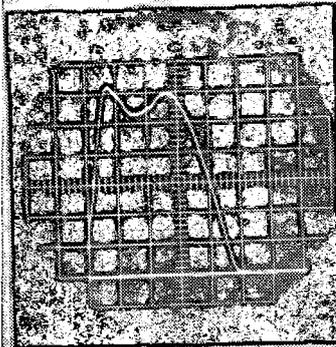
496
Figura 30



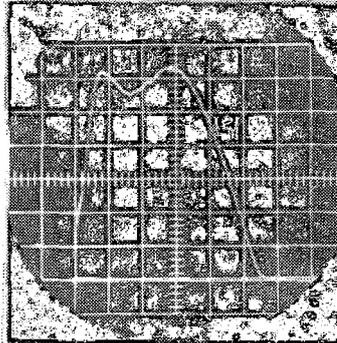
552
Figura 31



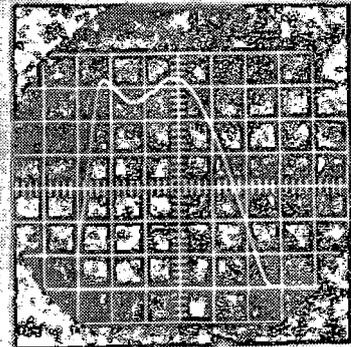
554
Figura 32



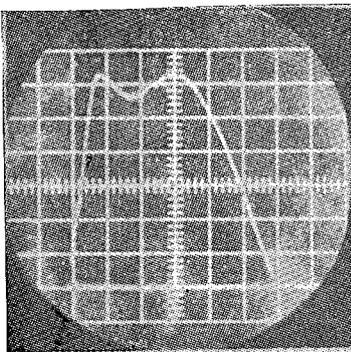
556
Figura 33



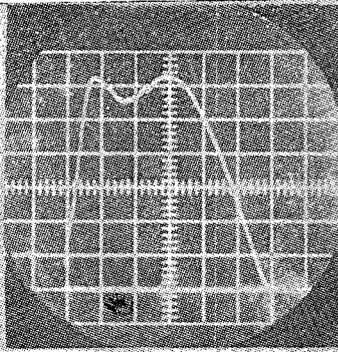
572
Figura 34



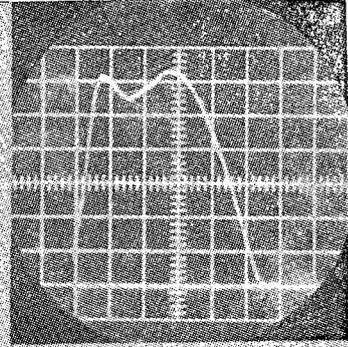
574
Figura 35



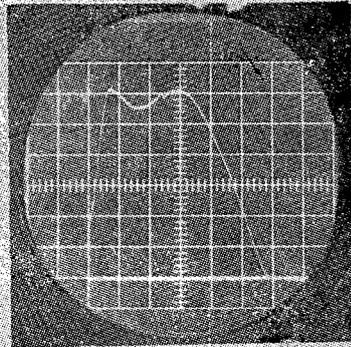
576
 Figura 36



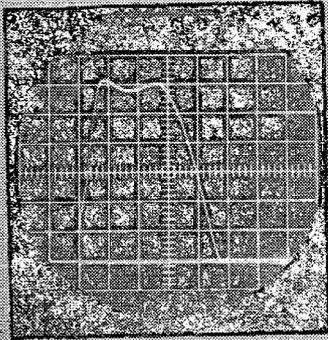
592
 Figura 37



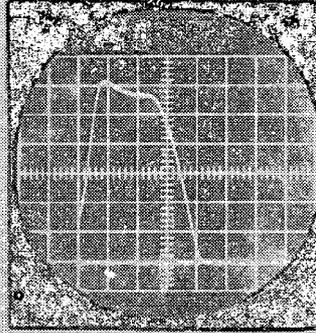
594
 Figura 38



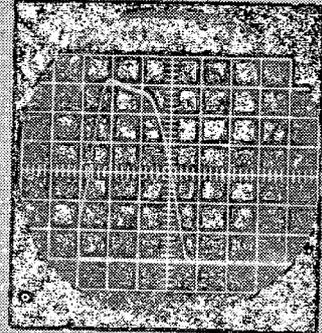
S F
 Figura 39



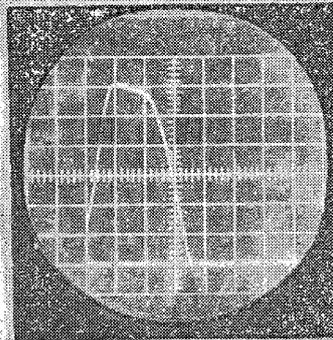
2,9
Figura 40



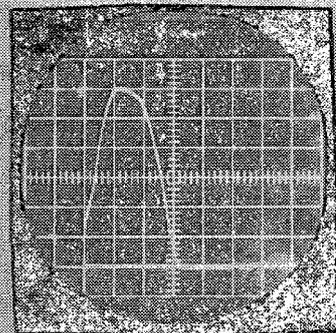
3,4
Figura 41



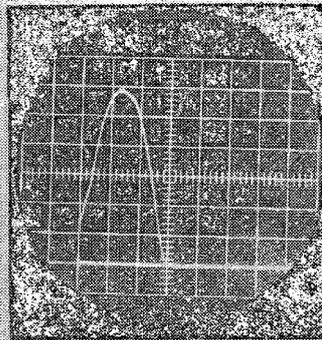
4,5
Figura 42



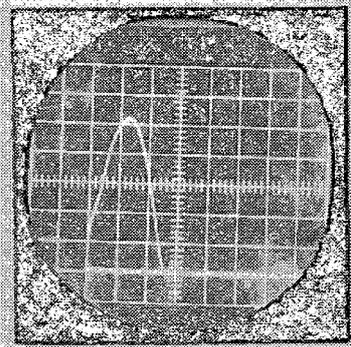
5,4
Figura 43



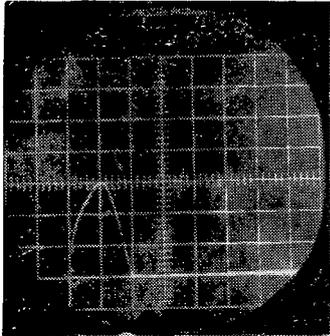
6,4
Figura 44



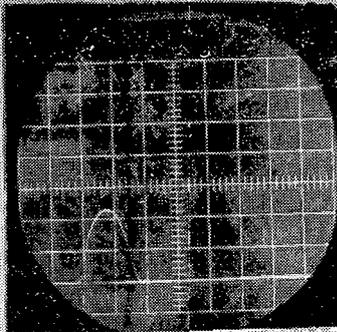
7,4
Figura 45



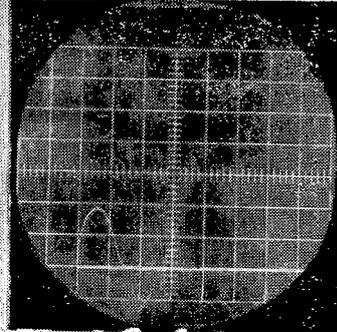
7,8
Figura 46



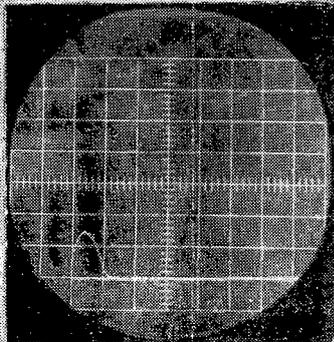
8,1
Figura 47



8,5
Figura 48



8,8
Figura 49



9,3
Figura 50

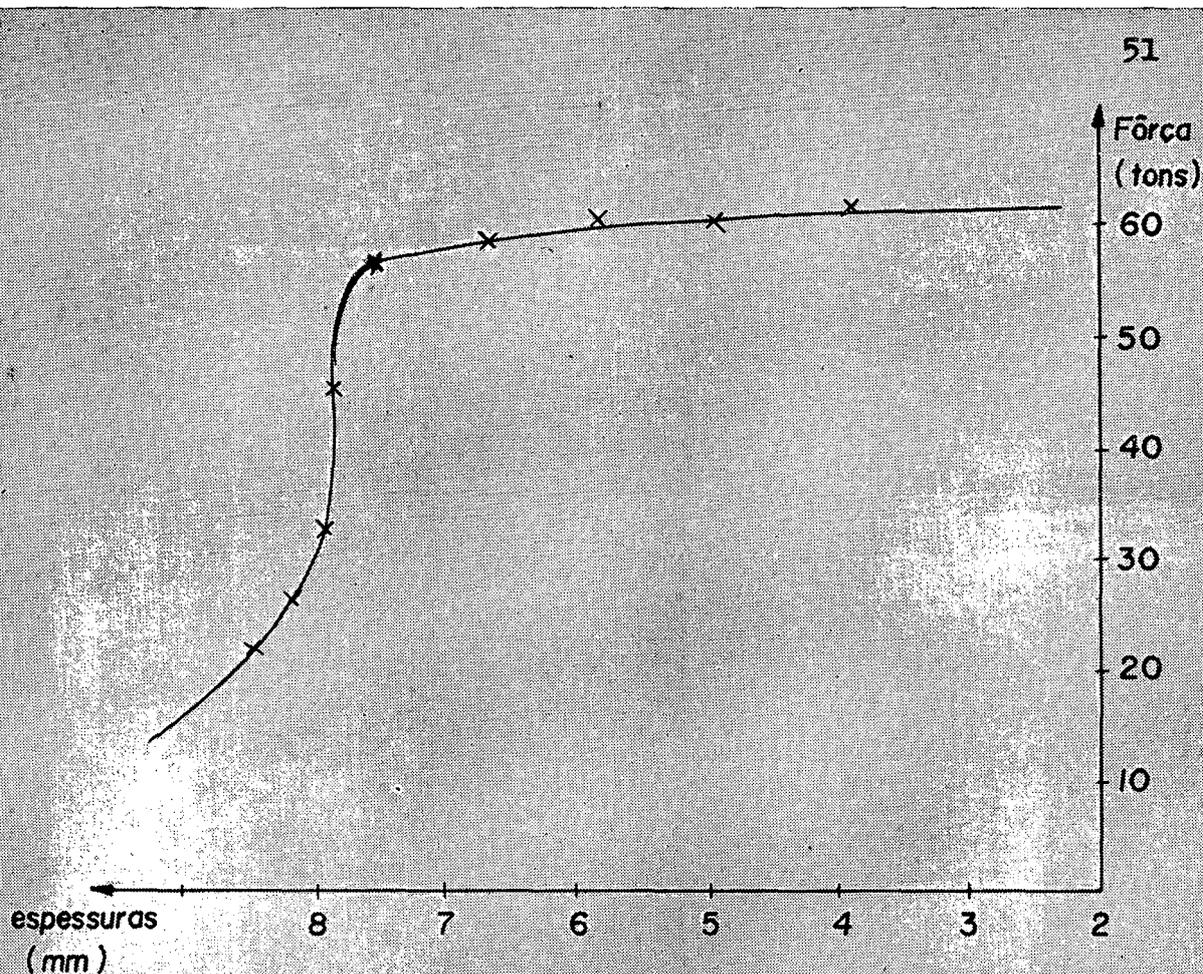


Figura 51 - Variação experimental da fôrça de extrusão em função da espessura do fundo da peça.

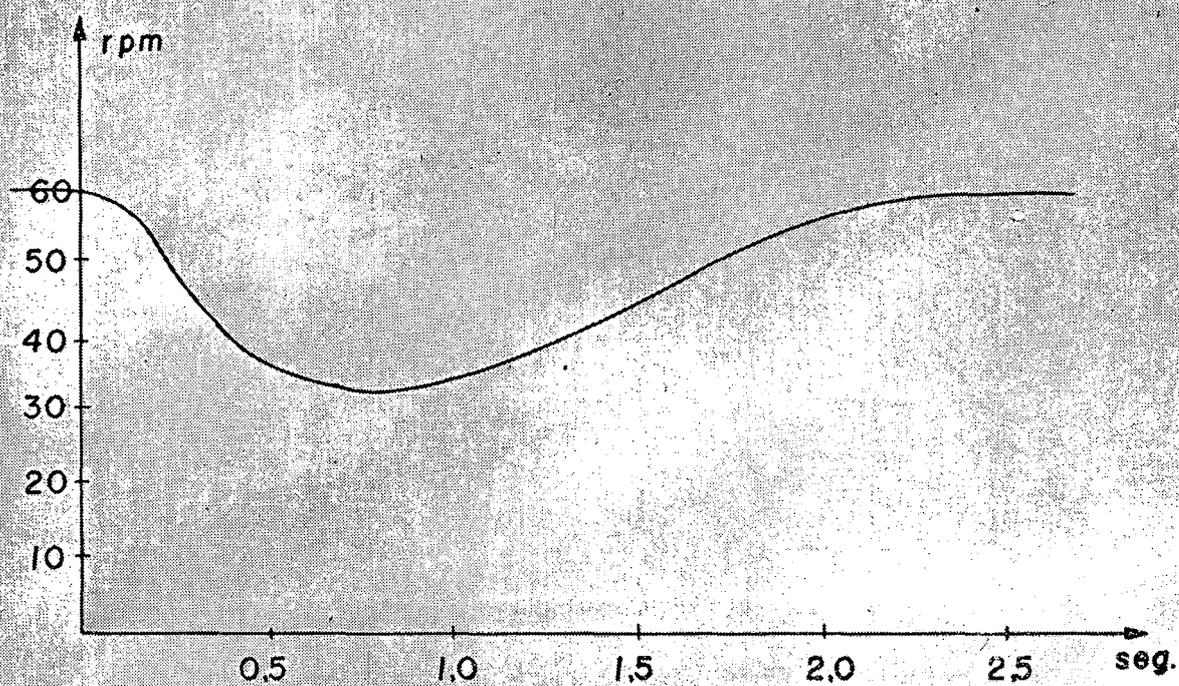


Figura 52 - Variação da velocidade do eixo do excêntrico da prensa em função do tempo, por ocasião da extrusão

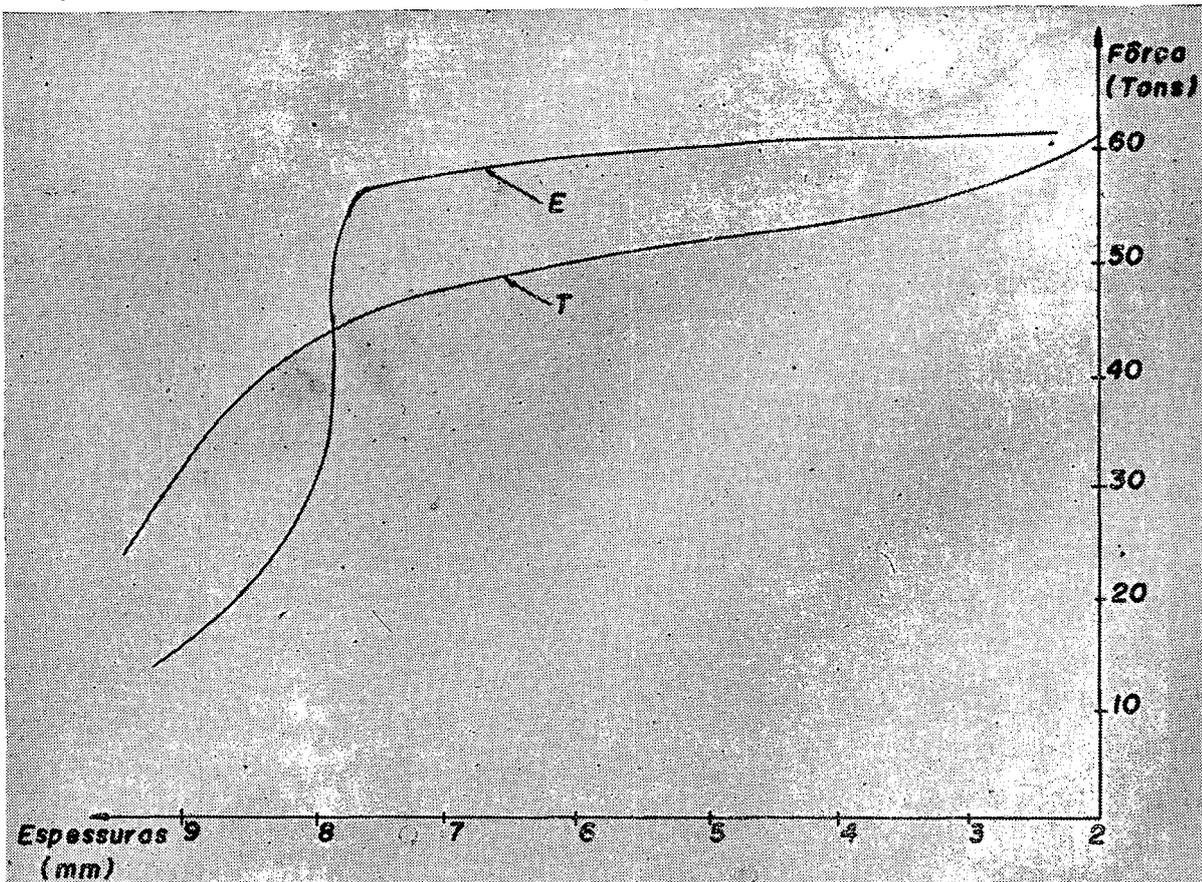
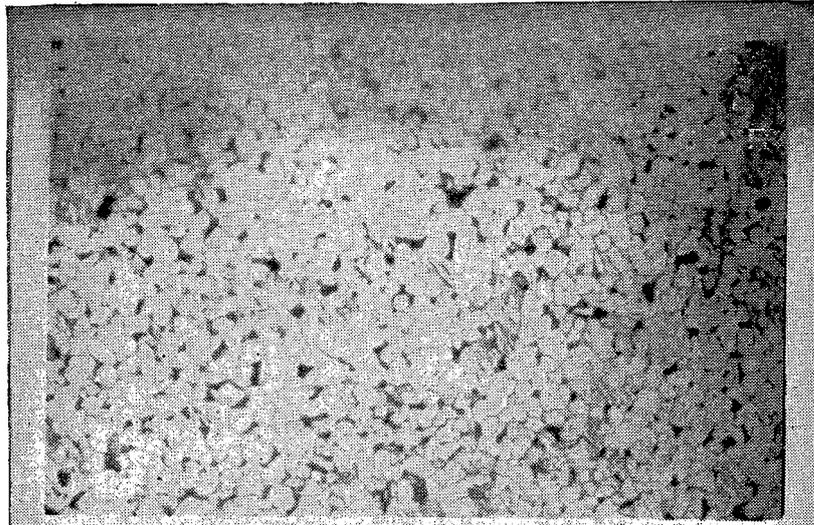


Figura 53 - Comparação entre as forças teórica e experimental em função da espessura do fundo

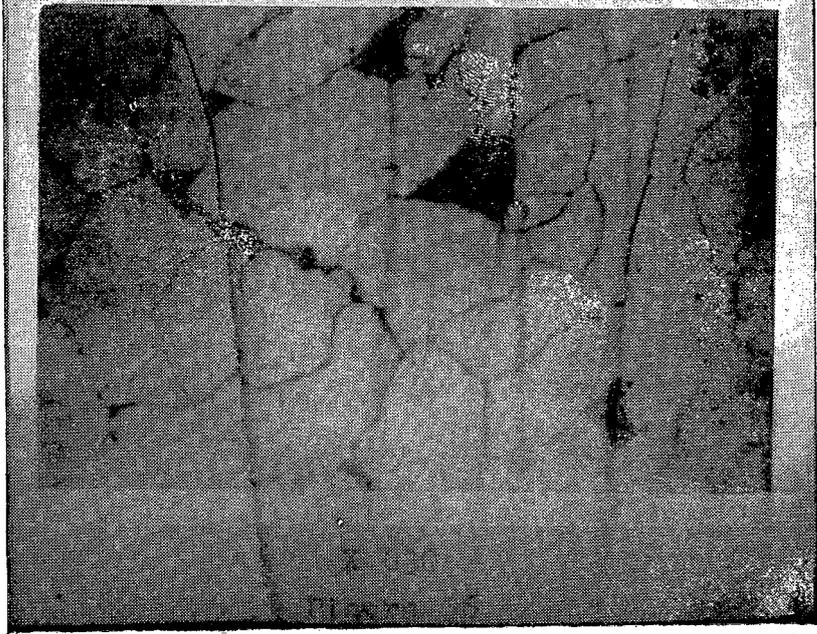


Figura 54 - Campos microfotografados



X 100

Figura 55



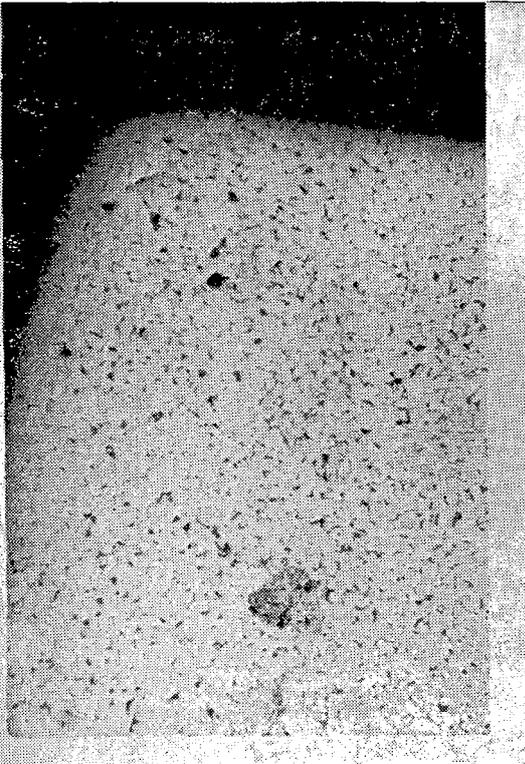


Figura 57
Campo 1 (X40)

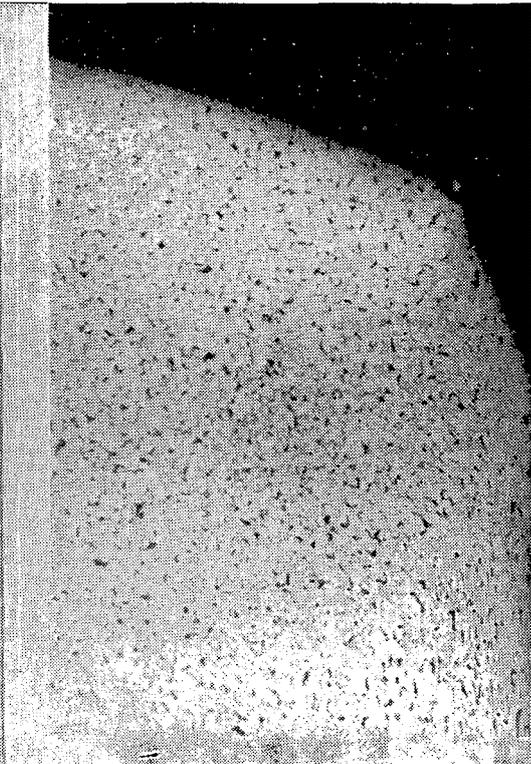


Figura 58
Campo 2 (X40)

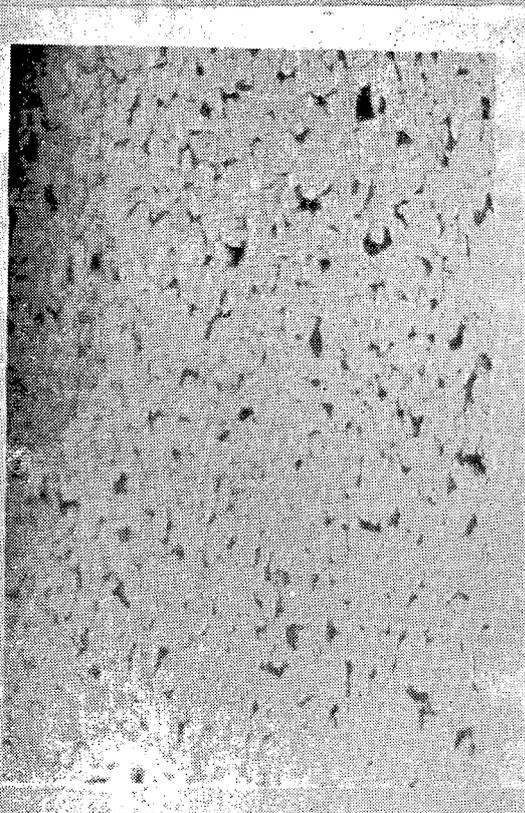


Figura 59
Campo 3 (X100)

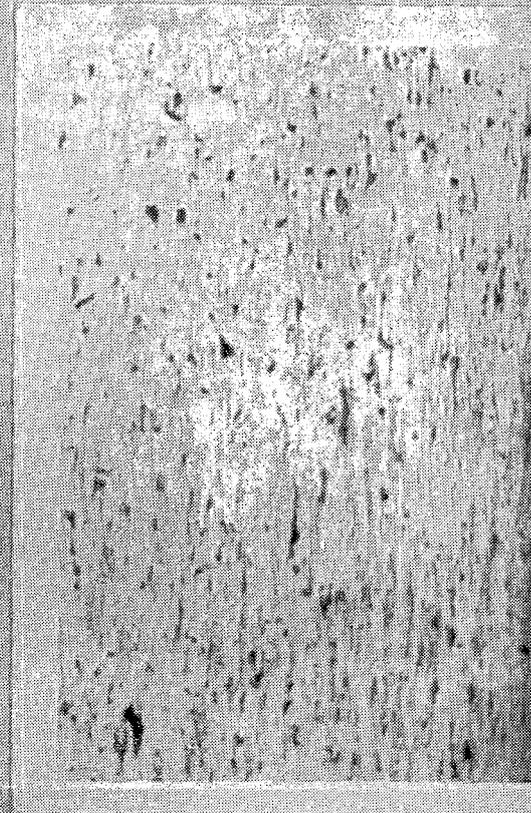


Figura 60
Campo 4 (X100)

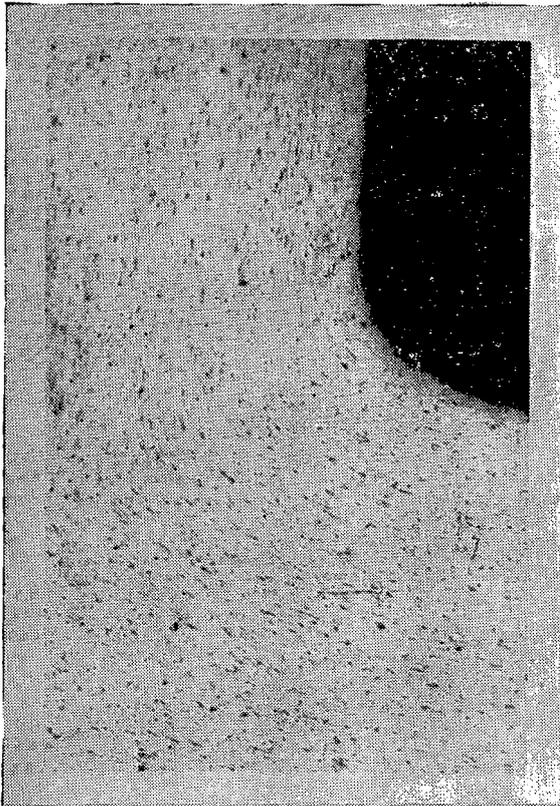


Figura 61
Campo 5 (X40)

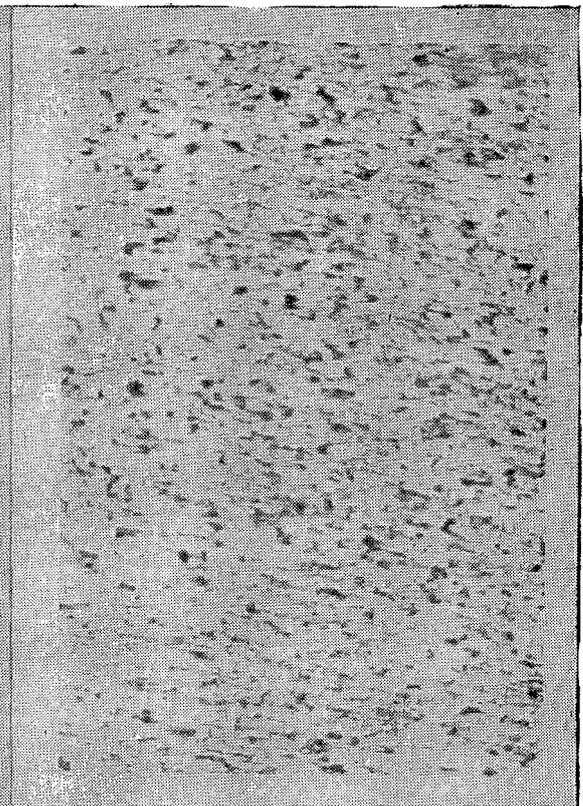


Figura 62
Campo 6 (X100)

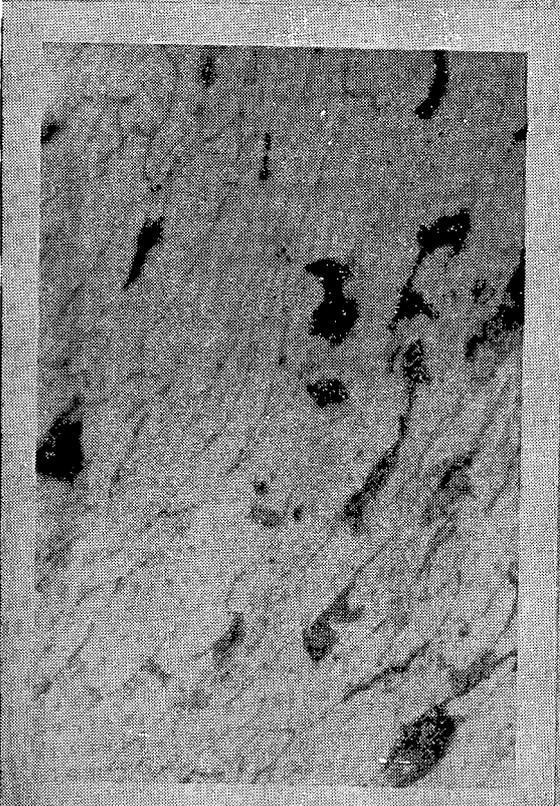


Figura 63
Campo 7 (X630)



Figura 64
Campo 7 (X100)

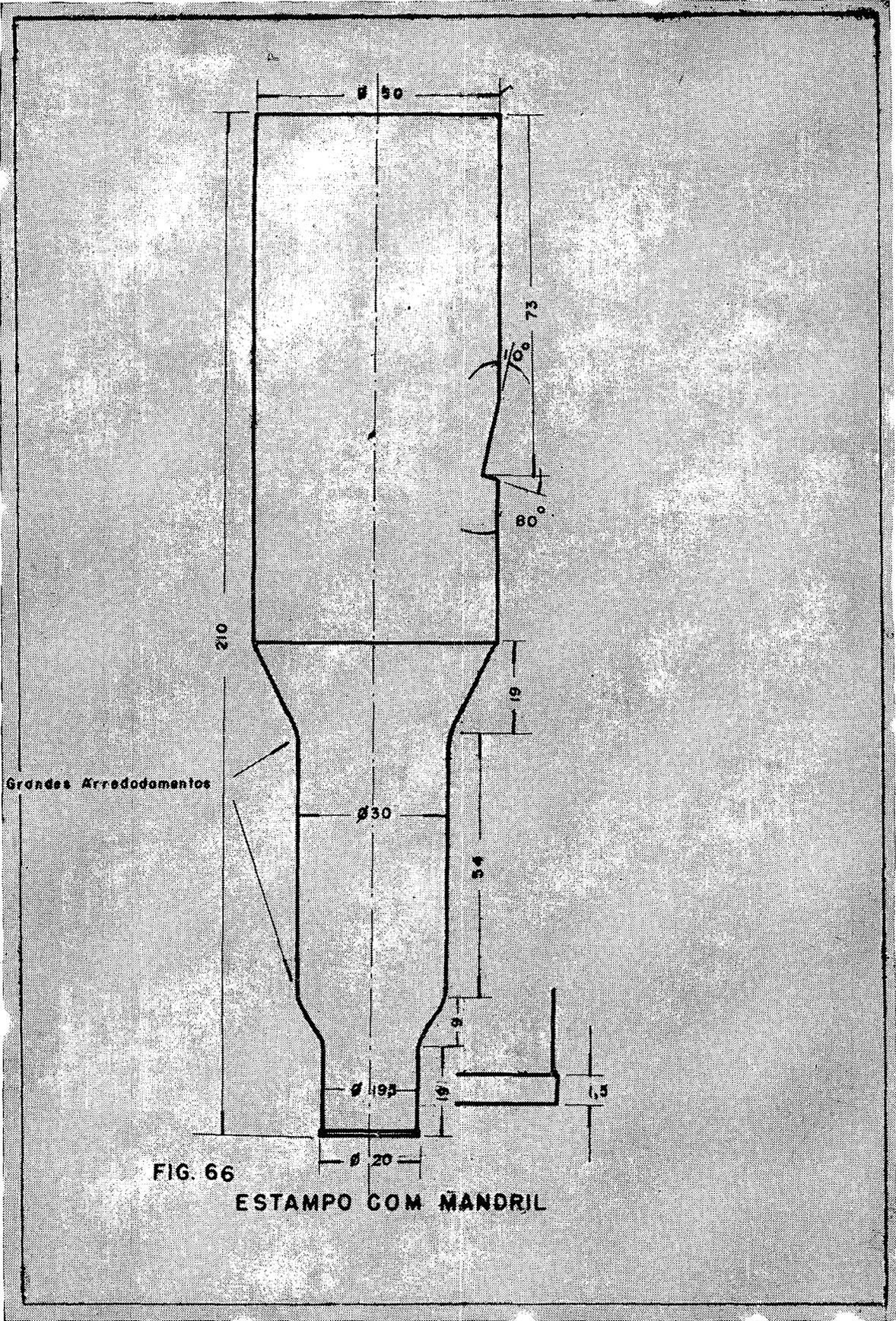


FIG. 66
 ESTAMPO COM MANDRIL

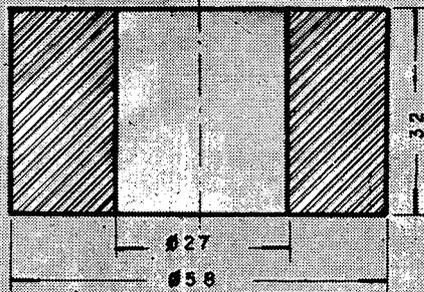


FIG. 67 MATRIZ

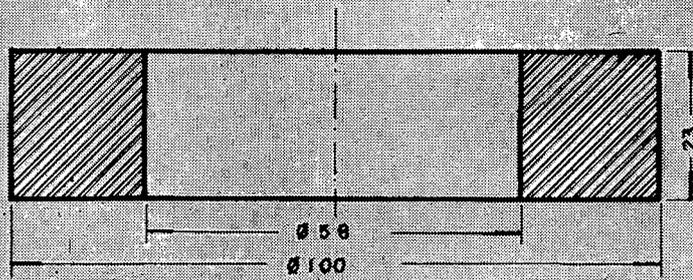


FIG. 68 PRIMEIRO ANEL DE PRESSÃO

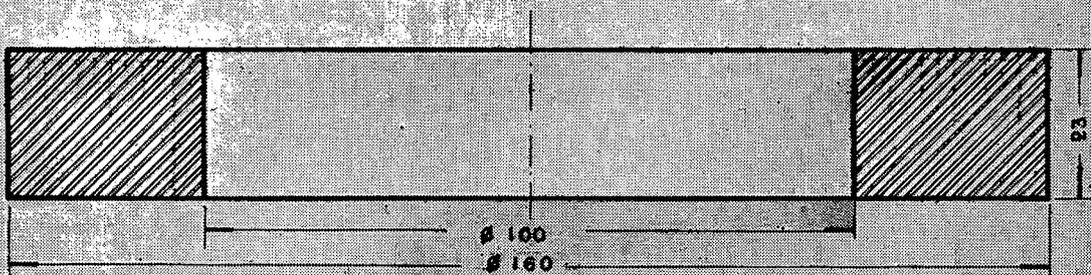


FIG. 69 SEGUNDO ANEL DE PRESSÃO

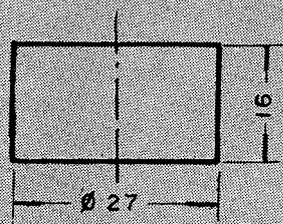


FIG. 70 CABEÇA DO EXTRATOR

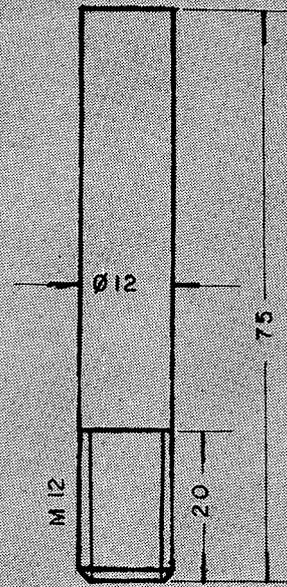


FIG. 71 CORPO DO EXTRATOR

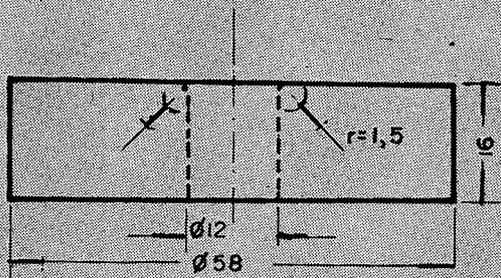


FIG. 72 PLAGA DE IMPACTO

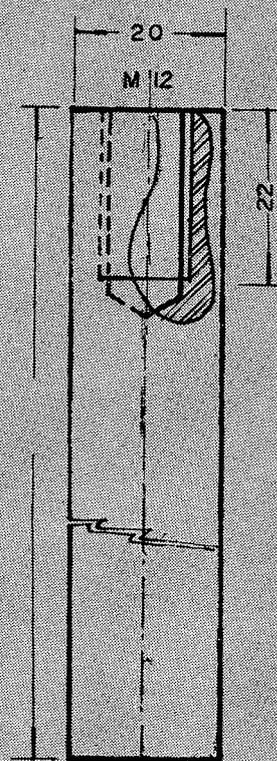


FIG. 73 BASE DO EXTRATOR

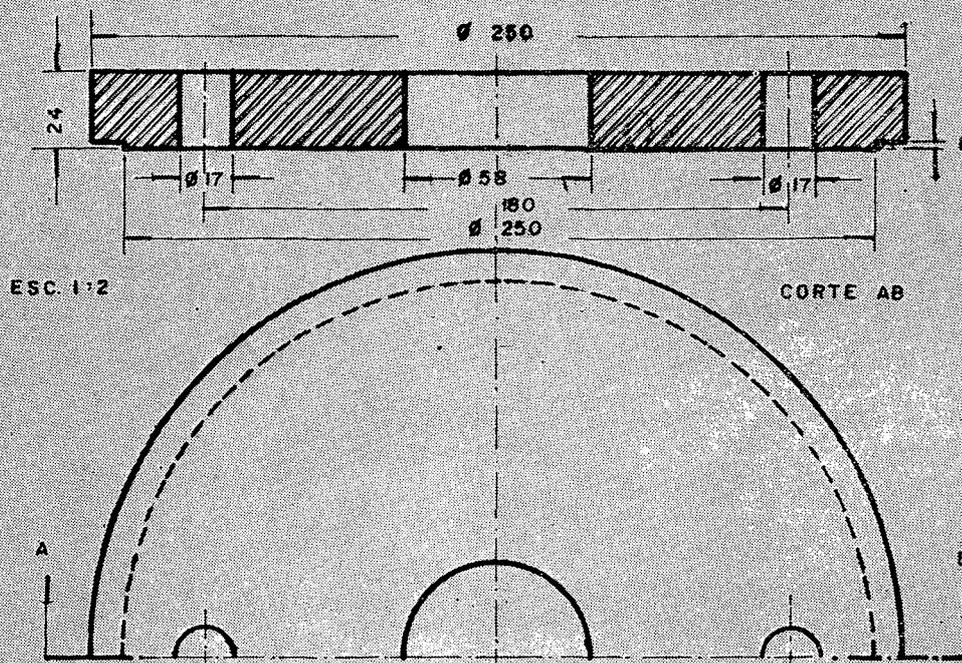


FIG. 74 PLACA PORTA MATRIZ

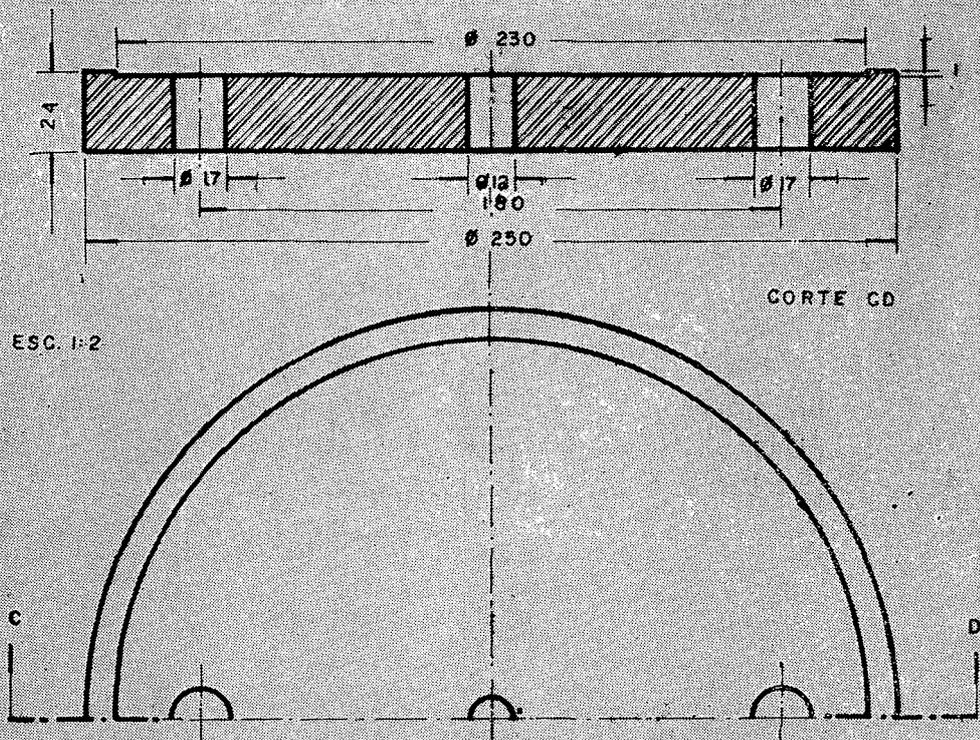
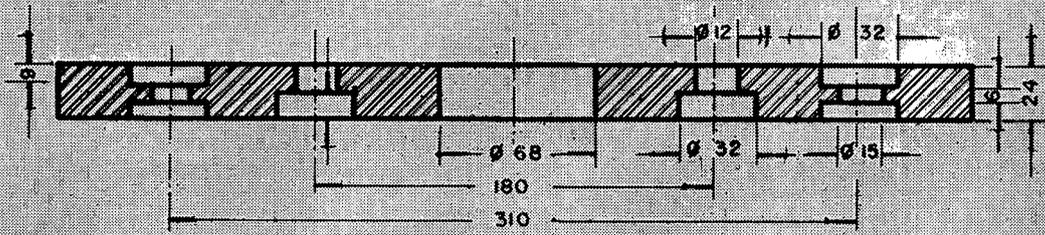


FIG. 75 PLACA DE BASE SUPERIOR



CORTE AB

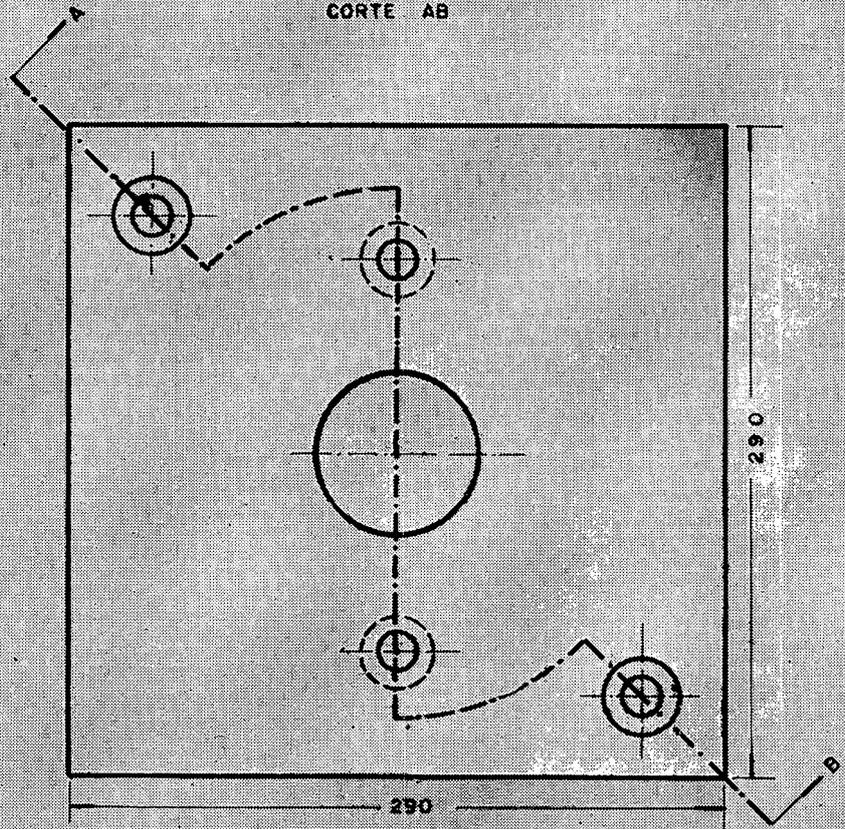


FIG. 78 PLACA DE BASE INFERIOR

ESC. F2

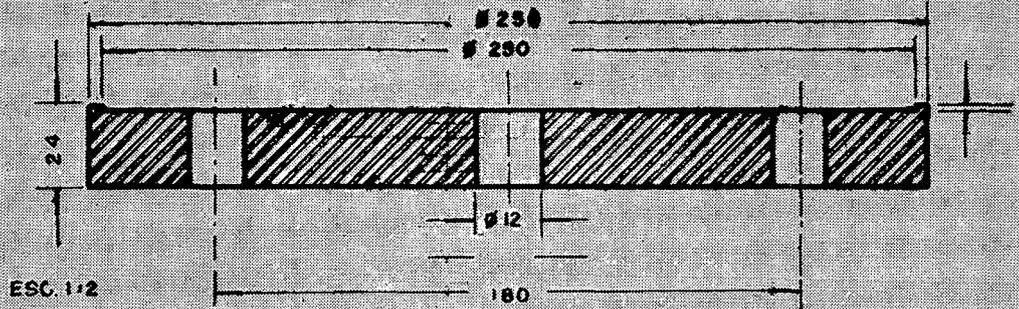


FIG. 76 PLACA DE BASE INTERMEDIÁRIA
CORTE C-D

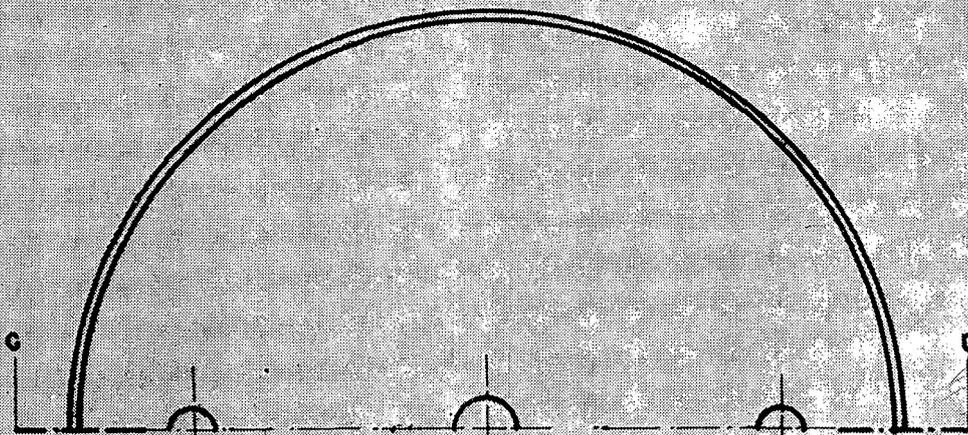


FIG. 76 PLACA DE BASE INTERMEDIÁRIA

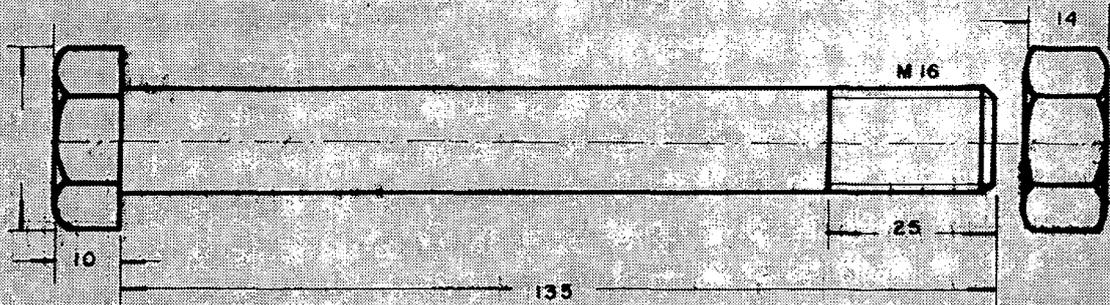
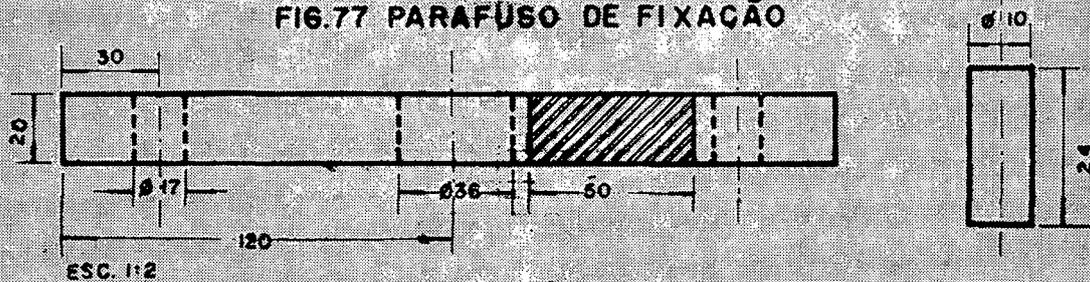


FIG. 77 PARAFUSO DE FIXAÇÃO



FIGS. 79 e 80 TRAVESSÃO e CALÇO

BIBLIOGRAFIA

- 1 — Feldmann, H. D., "Cold forging of steel", p. 39, Hutchinson Scientific Technical, London, 1961.
- 2 — Feldmann, H. D., opus cit. p. 41-43.
- 3 — Feldmann, H. D., opus cit. p. 262.
- 4 — Dolly, J. W., Riley, W. F., "Experimental Stress Analysis" p. 342-464, Mc Graw-Hill, N. York, 1965.
- 5 — Beckwith, T. G., Lewis, B. N., "Mechanical Measurements", p. 243-249, Addison — Addison — Wesley Publishing Company, Inc., London, 1965.
- 6 — Dolly, J. W., Riley, W. F. opus cit., p. 384.
- 7 — Beckwith, T. G., opus cit. p. 251.
- 8 — Holister, G. S., "Experimental Stress Analysis", p. 54, Cambridge University Press, London, 1967.
- 9 — Feldmann, H. D., opus cit. p. 189.
- 10 — Wick, C. H., "Chipless Machining", p. 347-360, The Industrial Press N. York, 1960.
- 11 — Everhart, J. L., "Impact and Cold Extrusion of Metals", p. 80-89, chemical Publishing Company, Inc., N. York, 1964.
- 12 — Foldes, A. G., "ABM Boletim", **72**, p. 809-817, (1962).
- 13 — Labib Ghali, "Les Mémoires Scientifiques de la Révue de Metallurje", **12**, p. 859-867, (1968).
- 14 — Geleji, "Forge Equipament, Rolling Mills and Acessories", p. 228-232, Akadémiai Kiado, Budapest, 1967.
- 15 — Rolloff, H. Matek, W. "Machinen Elemente" (figuras e tabelas), p. 21, Fridr. Vieweg — Sohn, Hannover, 1963.
- 16 — Makelt, H., "Die Mechanischen Pressen", p. 31, Carl Hanser Verlag, Munich, 1961.
- 17 — Lange, K., "Gesensschmieden von Stahl", p. 196-198, Springer, Berlin, 1958.