

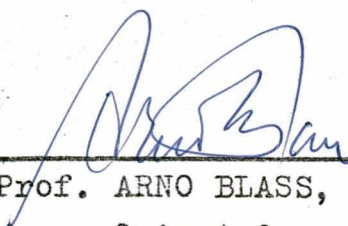
UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
COORDENAÇÃO DOS PROGRAMAS DE PÓS-GRADUAÇÃO
ENGENHARIA MECÂNICA

FORJAMENTO EM MATRIZ FECHADA
MEDIÇÃO DAS FORÇAS NO FORJAMENTO EM ALUMÍNIO


ROBERVAL RYMER DA SILVA CARVALHO

FLORIANÓPOLIS
SANTA CATARINA - BRASIL

ESTA TESE FOI JULGADA ADEQUADA PARA A
OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
"MESTRE EM CIÊNCIAS"
E APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO
ORIENTADOR E PELO CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO




Prof. ARNO BLASS, Ph.D.
Orientador



Prof. ARNO BLASS, Ph.D.
Coordenador da Pós-Graduação
em Eng. Mecânica

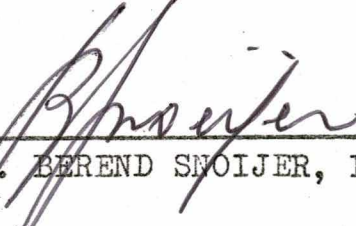
BANCA EXAMINADORA:



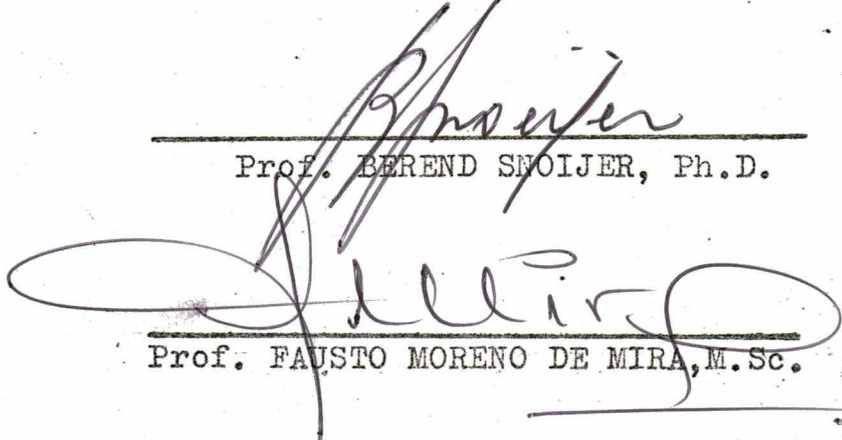
Prof. ARNO BLASS, Ph.D.



Prof. JAROSLAV KOZEL, Ph.D.



Prof. BEREND SNOIJER, Ph.D.



Prof. FAUSTO MORENO DE MIRA, M.Sc.

À minha esposa

Aos meus pais

Aos meus sogros

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

O autor deseja agradecer:

- À Escola Federal de engenharia de Itajubá (MG), por ter oferecido o Curso de Pós-Graduação, bem como a manutenção econômica / necessária;
- Ao Prof. Arno Blass, pela orientação;
- Ao Prof. Jaroslav Kozel, pelo auxílio prestado à parte prática/ dêste trabalho;
- Ao Prof. Berend Snoijer, pela ajuda dada a este trabalho;
- Ao funcionário César Antonio da Silva, pela confecção da ferramenta e montagem da mesma;
- Aos demais professores, funcionários e colegas, que direta ou indiretamente colaboraram neste trabalho.

RESUMO

Pretende êste trabalho comparar resultados experimentais na medição das forças no forjamento em matriz de uma peça simples de alumínio de pureza comercial, com estimativas baseadas em modelos teóricos aqui apresentados e discutidos.

No Capítulo III, apresentam-se os equipamentos utilizados para a realização dos ensaios experimentais, bem como a instrumentação necessária para a medição das forças e da velocidade de conformação no decorrer do forjamento.

Apresenta-se, ainda, o levantamento experimental das curvas relacionando as forças com a deformação do forjado.

Finalizando, discutem-se os resultados experimentais obtidos, analisando-os à luz da teoria abordada sobre o assunto. Conclusões e sugestões para futuros trabalhos são também apresentadas.

ABSTRACT

The purpose of this work is to compare experimental / measurements of the forces involved in closed-die forging of a simple part in commercially pure aluminium, with estimates based / on theoretical models which are presented and discussed.

In Chapter III the experimental equipment, as well as the instrumentation, are presented.

Later, the experimental results are presented and / plotted.

Finally, the experimental results are discussed and analysed under the theoretical background provided. Concluding / remarks and suggestions for future work are also presented.

Í N D I C E

	PÁG.
<u>CAP. I</u> - INTRODUÇÃO.	
1.1 - Histórico	01
<u>CAP. II</u> - REVISÃO DA LITERATURA.	
2.1 - Teorias sobre o forjamento em matriz	04
2.1.1 - Análise de GELEJI	04
2.1.2 - Solução limite superior	16
<u>CAP. III</u> -- DESCRIÇÃO DA INSTALAÇÃO DE ENSAIO.	
3.1 - Equipamento para a realização dos ensaios de forjamento	18
3.1.1 - Máquina utilizada	18
3.1.2 - Ferramenta	19
3.2 - Instrumentação para a medida dos parâmetros do forjamento	35
3.2.1 - Medição das forças	35
3.2.1.1 - Calibração dos extensômetros	39
3.2.2 - Velocidade	40
<u>CAP. IV</u> - TRABALHO EXPERIMENTAL.	
4.1 - Aferição da Prensa Hidráulica AMSLER-Tipo 500D / 1029	42
4.1.1 - Influência da temperatura	45
4.2 - Calibração dos anéis e célula de carga	50
4.3 - Calibração da Ponte com o Multímetro Digital	59

4.3.1 - Procedimento adotado.....	59
4.3.2 - Resultados obtidos	59
4.4 - Ensaio de forjamento e resultados.....	64
4.4.1 - Estudo do resfriamento do bilete	64
<u>CAP. V</u> - DISCUSSÃO DOS RESULTADOS, CONCLUSÕES E SUGES TÕES.	
5.1 - Discussão dos resultados e conclusões	84
5.2 - Sugestões	89
<u>REFERÊNCIAS</u>	90

APÊNDICES

<u>APÊNDICE I</u> - DETALHES DOS COMPONENTES DA FERRAMENTA ...	93
<u>APÊNDICE II</u> - GRÁFICOS EM DEGRAUS.	
2.1 - Gráfico em degrau correspondente à Força P	106
2.2 - Gráfico em degrau correspondente à Força P_1	107
2.3 - Gráfico em degrau correspondente à Força P_2	108

S I M B O L O G I A

Os subscritos não definidos abaixo o são quando usados no texto.

A	área da secção transversal dos anéis dinamométricos.
A_1	área da secção transversal do forjado.
A_2	área da garganta da rebarba.
$a = D$	diâmetro entre os extremos da rebarba.
b	largura da rebarba.
D_{PS}	diâmetro do forjado sem a rebarba.
$d = d_G$	diâmetro no plano da rebarba.
E	módulo de Young.
$H = h_{max}$	profundidade da impressão.
h_1	distância entre as calotas esféricas.
$h_2 = S$	espessura da garganta da rebarba.
k_{rm}	resistência média à mudança de forma na compressão da rebarba.
L	largura da impressão.
N_c, N_{ciz}, N_a	potências
P'	força de calibração sobre os anéis.
P, P_1, P_2, P_3	forças na conformação (segundo GELEJI).
P_{mm}, P_{mt}	forças na conformação (segundo solução limite / superior).
p	tensão ou pressão normal.
V_o	velocidade de conformação.
μ	coeficiente de atrito.
σ	tensão normal.
ϵ	deformação específica longitudinal.
τ	tensão cizalhante.

RELAÇÃO DE FIGURAS

	<u>PÁG.</u>
FIG. 1 - Forças na conformação em matriz	5
FIG. 2 - Matriz sem reação da rebarba	6
FIG. 3 - Sequência de conformação com formação de re barba	6
FIG. 4 - Matriz experimental segundo GELEJI	7
FIG. 5 - Curvas da força necessária para conformação em matriz sem reação da rebarba	8
FIG. 6 - Comparação da extrusão e conformação em ma triz	9
FIG. 7 - Volume de material que participa da confor mação	11
FIG. 8 - Forças na conformação em matriz	12
FIG. 9 - Dimensões das matrizes experimentais	13
FIG. 10 - Força na conformação em matriz: a) com rea ção da rebarba; b) sem reação da rebarba ..	13
FIG. 11 - Determinação das forças na conformação. Ma triz com reação da rebarba	14
FIG. 12 - Determinação da tensão radial	15
FIG. 13 - Estimativa da força na conformação com re barba	16
FIG. 14 - Vista geral da instalação utilizada para os	

ensaios experimentais no forjamento em ma -
 triz 18

FIG. 15 - Vista parcial da instalação utilizada para/
 os ensaios experimentais: instrumentação .. 19

FIG. 16 - Vista em corte da ferramenta utilizada .. 20

FIG. 17 - Vista do conjunto das matrizes montadas à
 prensa 22

FIG. 18 - Detalhe da célula de carga para medição da
 força P_1 24

FIG. 19 - Gráfico para o cálculo da altura mínima da
 matriz 25

FIG. 20 - Raios de curvatura mínimos dos forjados, pa
 ra uso geral, em mm. 26

FIG. 21 - Nomograma para o cálculo da espessura míni-
 ma de paredes das cavidades 27

FIG. 22 - Detalhe da bucha do estampo (vista de cima)

FIG. 23 - Detalhe da bucha do estampo (vista inverti-
 da) 28

FIG. 24 - Detalhe do anel dinamométrico (Força P_2).. 28

FIG. 25 - Detalhe do anel guia 29

FIG. 26 - Detalhe do disco guia 30

FIG. 27 - Detalhe do eixo guia 30

FIG. 28 - Detalhe da matriz pròpriamente dita (vista/
 de cima) 31

FIG. 29 - Detalhe da matriz pròpriamente dita (vista invertida)	31
FIG. 30 - Canal da rebarba, na matriz, e rebarba, no forjado	32
FIG. 31 - Detalhe do anel dinamométrico para medição/da força total	32
FIG. 32 - Detalhe do conjunto: discos de isolamento / térmico, e pinos de fixação	33
FIG. 33 - Detalhe do conjunto: guia e tubos de injeção e retorno d'agua	34
FIG. 34 - Detalhe do anel de fixação	34
FIG. 35 - Ponte Amplificadora KWS/GE - 5 HOTTINGER - BALDWIN	38
FIG. 36 - Oscilógrafo U.V. RECORDER SE 3006	38
FIG. 37 - Vista parcial do dispositivo para medição / da velocidade de conformação	41
FIG. 38 - Montagem esquemática dos equipamentos para/ aferição da prensa	43
FIG. 39 - Vista parcial dos equipamentos para aferição da prensa.....	44
FIG. 40 - Vista da fonte de tensão de alimentação das lâmpadas elétricas de iluminação das escalas dos microscópios	44
FIG. 41 - Curva de aferição da prensa AMSLER (tipo / 500D 1029)	49

FIG. 42 - Vista geral da montagem para calibração do anel de medição da Força P	51
FIG. 43 - Vista parcial da montagem para calibração/ da célula de carga para medição da Força / P_1	52
FIG. 44 - Curva de calibração do anel da Força P ...	56
FIG. 45 - Curva de calibração da célula de carga da Força P_1	57
FIG. 46 - Curva de calibração do anel da Força P_2 ..	58
FIG. 47 - Curva de calibração Ponte-Digital	63
FIG. 48 - Vista parcial do forno utilizado no aqueci- mento dos biletos, vendo-se também a liga- ção do referido termopar	65
FIG. 49 - Vista do bilote utilizado no forjamento ..	68
FIG. 50 - Vista do forjado obtido por forjamento ...	68
FIG. 51 - Registros gráficos das variações dos parâ- metros (forças e deslocamento) no osciló - grafo - bilote A	70
FIG. 52 - Registros gráficos das variações dos parâ- metros (forças e deslocamento) no osciló - grafo - bilote B	72
FIG. 53 - Registros gráficos das variações dos parâ- metros (forças e deslocamento) no osciló - grafo - bilote D	74
FIG. 54 - Registros gráficos das variações dos parâ-	

metros (forças e deslocamento) no oscilógrafo - bilete F	76
FIG. 55 - Registros gráficos das variações dos parâmetros (forças e deslocamento) no oscilógrafo - bilete AB	78
FIG. 56 - Registros gráficos das variações dos parâmetros (forças e deslocamento) no oscilógrafo - bilete AC	80
FIG. 57 - Traçado da curva Força-Total - Largura da Rebarba	82
FIG. 58 - Traçado da curva Força da Rebarba - Largura da Rebarba	83

RELAÇÃO DE QUADROS

	<u>PÁG.</u>
QUADRO 1 - Levantamento da curva de aferição da Prensa AMSLER (carregamento)	47
QUADRO 2 - Levantamento da curva de aferição da Prensa AMSLER (descarregamento)	48
QUADRO 3 - Levantamento da curva de calibração do anel dinamométrico, para medição da Força/P	53
QUADRO 4 - Levantamento da curva de calibração da célula de carga, para medição da Força P_1 .	54
QUADRO 5 - Levantamento da curva de calibração do anel dinamométrico para medição da Força / P_2	55
QUADRO 6 - Levantamento da curva de calibração Ponte-Digital (Força P).....	60
QUADRO 7 - Levantamento da curva de calibração Ponte-Digital (Força P_1)	61
QUADRO 8 - Levantamento da curva de calibração Ponte-Digital (Força P_2)	62
QUADRO 9 - Resumo dos resultados experimentais obtidos no forjamento	67
QUADRO 10- Quadro dos valores da Força Total - Largura da Rebarba	81

QUADRO 11 - Quadro dos valores da Força da Rebarba - Largura da Rebarba	81
QUADRO 12 - Quadro comparativo de forças entre os va- lores medidos e calculados no forjamento	87
QUADRO 13 - Resultados obtidos nos ensaios para valo- res de forças no forjamento ,.....	88

CAPÍTULO I

1 - INTRODUÇÃO

1.1 - Histórico

O forjamento é definido como o processo de trabalhar/ metais e suas ligas, seja a quente ou a frio, dando-lhes forma e tamanhos desejados, por meio de deformação plástica produzida por martelamento ou prensagem.

Trata-se, indiscutivelmente, do mais antigo processo/ mecânico de trabalhar metais, aproveitando as propriedades de / plasticidade dos mesmos. A aplicação de calor aumenta a plasticidade dos metais, permitindo a sua deformação permanente com menores esforços, e tornando possível a execução das diversas operações necessárias à fabricação das mais variadas peças. A arte de forjar metais consta dos mais antigos registros da História da civilização, tendo sido desenvolvida gradativamente e desde as / mais remotas descobertas de metais, até atingir ao elevado grau / de aperfeiçoamento contemporâneo, tendo assim, contribuído em todos os tempos para o progresso material da Humanidade.

A primitiva arte de forjar provavelmente consistia / no martelamento de pedaços de metal com pedras, como meio de fabricação de utensílios e armas de guerra. Apesar dos limitados / conhecimentos metalúrgicos e dos reduzidos recursos para o trabalho mecânico dos metais então disponíveis, um artesanato especializado foi desenvolvido, transmitindo-se, de geração a geração, os conhecimentos assim adquiridos.

As famosas espadas de Damasco, Toledo e Balboa consti

tuem magníficos exemplos da arte de forjar, em que já se empregava até mesmo o tratamento térmico do metal.

No século XIX, a aparição da máquina a vapor e seu desenvolvimento propiciou o surgimento do martelo de queda, tal como conhecido hoje em dia, como novo equipamento de forjar. Sua evolução acompanhou as necessidades da técnica de conformação. Os primitivos martelos de queda consistiam de uma massa cadente, levantada pela força humana aplicada a uma corda ou correia passando por uma simples polia superior. Surgiu, em seguida, o tipo de fricção, em que um ou mais homens aplicavam o seu peso na extremidade livre de uma correia passando sobre uma polia superior acionada, produzindo assim o atrito necessário para elevar a massa cadente. Esses martelos de queda requeriam muito esforço humano e dispunham de pouco auxílio mecânico, tornando-se por essa razão, inadequados para trabalhos mais pesados. Em 1836, JOHN NUTTALL desenvolveu um martelo de queda com sistema de correia e rolos de fricção. Somente em / 1838 é que JAMES NASMITH, escocês, concebeu o martelo de forjar a vapor, de ação direta, que foi construído em 1845 por BOURDON, na usina Schneider - Le Creusot, na França, constituindo esse desenvolvimento uma grande contribuição à evolução do forjamento.

Até aproximadamente 1850 os martelos de forjar usavam matrizes abertas, com as faces planas, ou então apenas uma das matrizes com cavidade na forma aproximada da peça a forjar, produzindo peças com grande variação de forma e dimensões.

A necessidade de reprodução fiel de peças forjadas com maior produtividade, levou E. K. ROOT e C. E. BILLINGS, da COLT / ARMS CO de Connecticut, U.S.A., a projetarem matrizes fechadas¹, o que veio a constituir outro passo relevante no progresso da arte / de forjar, eliminando uma grande parcela de trabalho manual de a cabamento dos forjados.

Alguns autores atribuem o emprêgo de matrizes com cavidade como tendo ocorrido originariamente na Inglaterra, por volta de 1730, à época do desenvolvimento do aço, tendo em vista que alguns implementos produzidos naquela época não poderiam ter sido forjados numa simples bigorna. Outros acreditam que as matrizes fechadas tiveram seu primeiro emprêgo na era de Napoleão, como meio capaz de produzir armas em quantidade suficiente para seus exércitos.

A fabricação de armas de fogo durante a Guerra Civil Norte-Americana constitui, talvez, a primeira aplicação importante dos forjados em matrizes fechadas, e já em 1862 era concedida a dois cidadãos de New England, U.S.A., a primeira patente relativa ao martelo de queda de prancha.

Esses martelos possuíam uma prancha de madeira, geralmente carvalho, fixada aos cabeçotes e passando entre rolos estria dos localizados na parte superior. Um dos rolos de fricção possuía movimento horizontal, a fim de permitir que o cabeçote fosse levantado ou largado em queda livre, sob o comando do operador adotando o mesmo princípio básico de acionamento ainda em uso nos dias presentes.

Até o princípio do século corrente a maior utilização de peças forjadas se verificava na indústria de construção de máquinas em geral, porém o advento da indústria automobilística e, posteriormente, o da aeronáutica criou uma demanda muitas vezes maior de peças forjadas que, em função das propriedades só nelas encontradas, são usadas em larga escala na fabricação em série de veículos automotores.

CAPÍTULO II

2 - REVISÃO DA LITERATURA

2.1 - Teorias sobre o forjamento em Matriz

O cálculo ou estimativa das forças no forjamento em matriz, tem merecido ampla atenção na literatura específica, do presente século.

E. SIEBEL, S. KOBAYASHI e E. G. THOMSEN, H. J. STÜTER, H. LIPPMANN e A. GELEJI apresentam argumentação teórica baseada / em observações feitas em ensaios de recalque simples, aplicáveis / ao processo de forjamento².

2.1.1 - Análise de GELEJI

GELEJI³ apresenta uma análise completa, considerando os fatores intervenientes mais importantes, como sejam o efeito do atrito na interface matriz-peça e o efeito da rebarba. Por essa razão, tem merecido ampla consideração na literatura, em que pesem ressalvas que lhe são levantadas² no que tange à necessidade de estimar determinados parâmetros.

Segundo GELEJI³, na determinação das forças / no forjamento em matriz, influem os seguintes fatores :

- (i) forma da matriz;
- (ii) acabamento da superfície interna da matriz e sua temperatura;
- (iii) material a conformar;
- (iv) acabamento da superfície e temperatura do material a forjar;

(v) velocidade de conformação.

A força total de forjamento é, então, decomposta em diversas componentes elementares conforme mostra a Figura 1, onde:

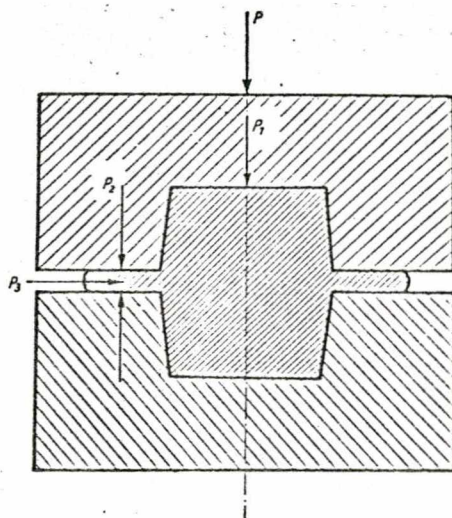


FIG. 1 - Forças na conformação em matriz (GELEJI³).

Força P_1 é a força pura de forjamento, responsável pela mudança de forma principal, e ainda pela expulsão do material / pela garganta da rebarba.

Força P_2 é a força que tende a fechar (estrangular) a garganta da rebarba.

Força P_3 é a componente reativa que impede o livre escoamento da rebarba.

No caso de se desejar determinar a variação de P_1 durante a conformação, e livre de qualquer ação perturbadora, deve-se forjar o material em uma matriz onde não se verifique reação de rebarba.

A Figura 2 mostra uma matriz onde não existe tal reação de rebarba.

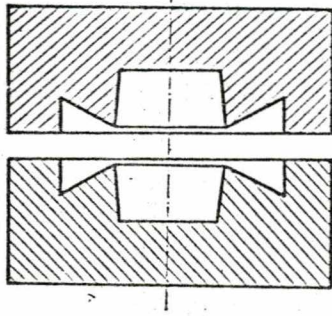


FIG. 2 - Matriz sem reação da rebarba.

Nesta matriz a bacia da rebarba foi construída de tal maneira que nem P_2 nem P_3 comparecerão.

A Figura 3 mostra a seqüência de conformação numa matriz sem reação da rebarba.

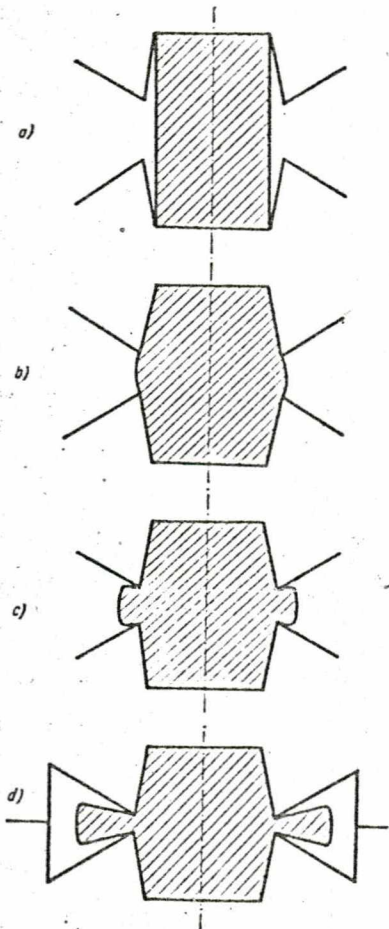


FIG. 3 - Sequência de conformação/ com formação de rebarba / (GELEJI³).

Nesta seqüência de conformação observa-se que o material, ao se escoar para a bacia da rebarba, não entra em contato com a matriz. Em consequência, não há o aparecimento das forças reativas P_2 e P_3 . Observa-se que o mecanismo de formação da rebarba é o mesmo da analogia com o problema da extrusão (Figura 6).

GELEJI³ utilizou uma matriz sem reação da rebarba, Figura 4, montada numa máquina universal de tração, realizando uma série de experiências para corpos de prova de chumbo de diversas alturas.

Os resultados estão contidos resumidamente nas Figuras 5 (a-f).

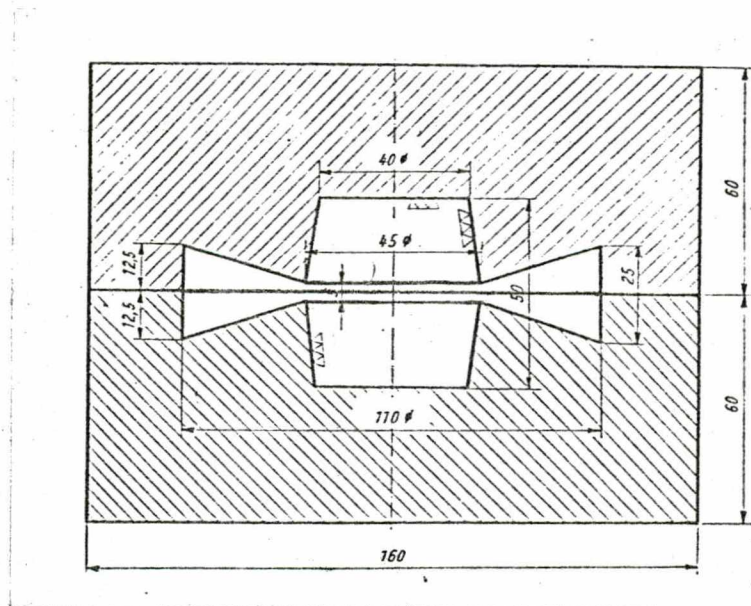


FIG. 4 - Matriz experimental segundo GELEJI³.

O ponto b corresponde ao início da formação da rebarba; o trecho b-c é tanto mais longo quanto mais espessa for a rebarba por ocasião da saída da impressão. Dos pontos assinalados nos diagramas da Figura 5, o ponto b é o de maior importância para as considerações e cálculos futuros.

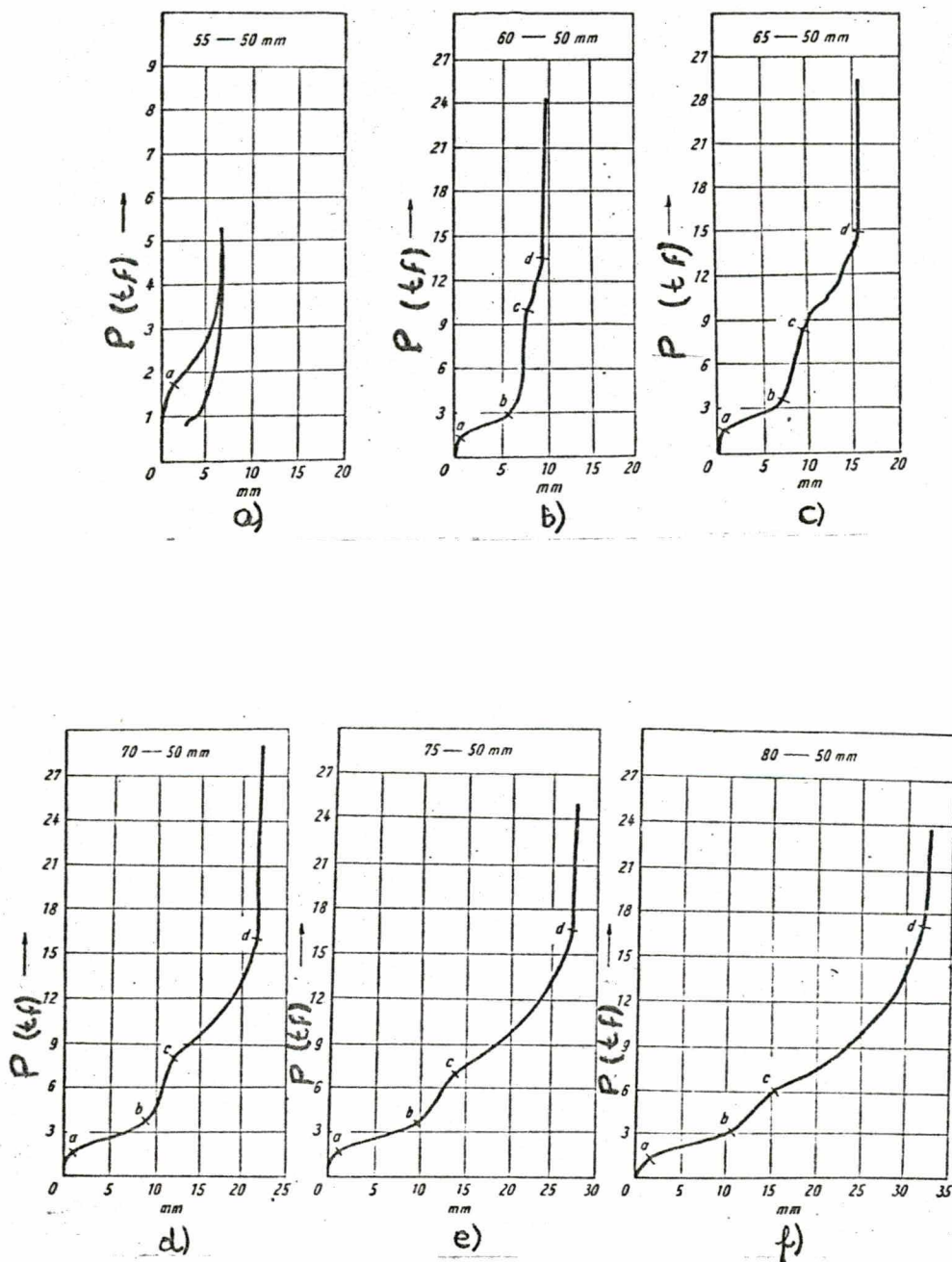


FIG. 5 - Curvas da força necessária para conformação em matriz sem reação da rebarba (GELEJP³).

Afim de instituir expressões que descrevam o mecanismo de formação da rebarba, GELEJI³ fez uma analogia com o problema / da extrusão. A Figura 6, ilustra essa analogia.

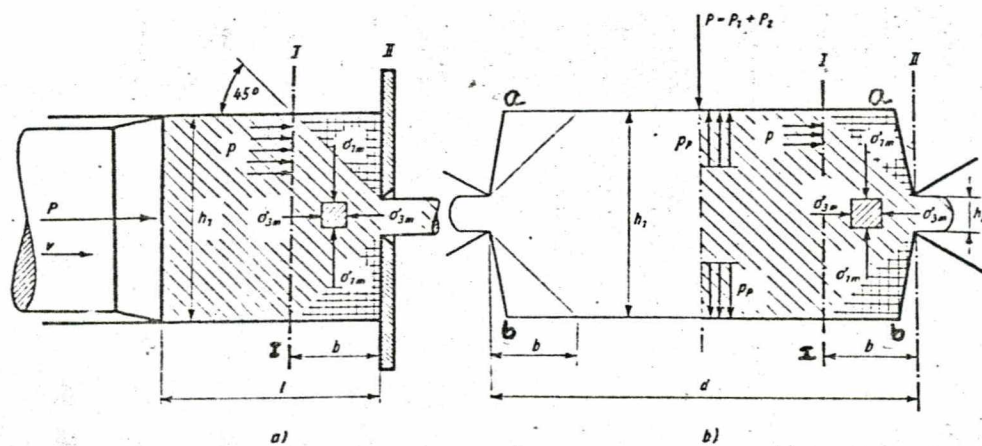


FIG. 6 - Comparação da extrusão e conformação em matriz (segundo GELEJI³).

Em ambos os casos, a tensão p , atuante na secção I-I, comprime o material em direção à abertura de saída de altura h_2 .

A Tensão p é expressa por

$$p = 2k_m - k_f \quad (\text{TRESCA})$$

onde a resistência média à mudança de forma é dada³ por

$$k_m = \frac{k_f}{1 - 0,93 \frac{\Delta A}{A_1}}$$

sendo

$$A_1 = (d - 2b) h_1 \pi$$

$$A_2 = d h_2 \pi$$

$$\Delta A = A_1 - A_2$$

e onde k_f é a resistência à mudança de forma³.

Como pode ser observado, a rebarba é comprimida para/fora da matriz pela pressão p , que atua na secção I-I de área (A_1), ou então pela força

$$P_0 = h_1 \cdot (d - 2b) \cdot \pi \cdot p$$

Esta força P_0 é resultante da força

$$P_1 = \frac{\pi}{4} d^2 \cdot p_p$$

que atua nos fundos a-a e b-b da matriz. p_p é a tensão vigente naquelas superfícies.

Segundo a teoria do escoamento, de TRESCA, pode-se, numa primeira aproximação, admitir que

$$p_p = p + k_f$$

donde

$$p_p = (2k_m - k_f) + k_f = \frac{2k_f}{1 - 0,93 \frac{\Delta A}{A_1}}$$

ou seja :

$$p_p = 2k_m \frac{1 - 0,93 \frac{\Delta A}{A_1}}{1 - 0,93 \frac{\Delta A}{A_1}}$$

e portanto

$$P_1 = 2k_m \cdot \frac{\pi}{4} \cdot d^2$$

Durante o forjamento, o material no interior da matriz sofre deslocamentos. Ao final da conformação, entretanto, o volume de material deslocado passa a depender da forma e dimensões da matriz. Os deslocamentos no interior do material, durante a expulsão do mesmo para a rebarba, não se verificam em todo o volume.

Pode-se observar que apenas numa parte do material,

limitada pelos pontos ABCDEFGH (Figura 7), é que se verificam deslocamentos, o restante do material passando a comportar-se rigidamente. O material só pode escoar dentro da zona cônica, limitada pelo ângulo de 45° , isto é, fora das zonas mortas (AJD e EKH). Por outro lado, também não é todo o volume do cone que sofre deslocamentos, e sim, apenas a porção limitada pelo raio R (Figura 7), que tangencia a superfície do cone AJD e EKH nos pontos A e D e E e H respectivamente. Logo, o volume no interior do qual se verificam deslocamentos (volume V) por ocasião da expulsão do material supérfluo para a rebarba é função da distância h_1 , entre as duas calotas esféricas e do diâmetro da matriz no plano da rebarba conforme mostra a Figura 7.

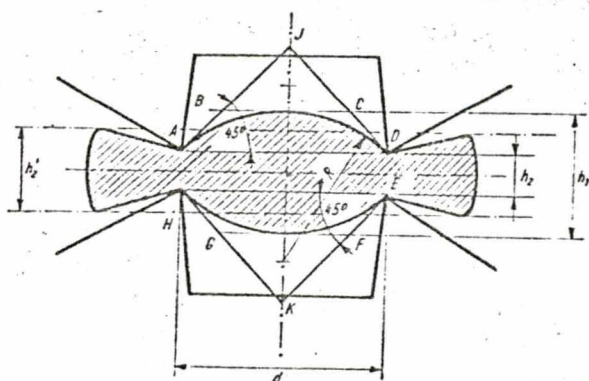


FIG. 7 - Volume de material que participa da conformação ($GELEJI^3$).

Para produzir estes deslocamentos é necessário uma força adicional P_e . Esta força pode ser calculada da mesma forma que na extrusão, isto é:

$$P_e = \Psi \cdot p_p \cdot V$$

onde

$$\Psi = c \cdot \sqrt[4]{\frac{V_0}{h_1}}$$

é o coeficiente de trabalho interno³, sendo C um parâmetro empírico, da ordem, segundo GELEJI³, de $0,025 \left[\text{cm}^{-1} \cdot \text{s}^{1/4} \right]$.

A força necessária para expulsar a rebarba pela garganta é:

$$P = P_1 + P_e .$$

e portanto, segundo GELEJI³,

$$P = 2k_m \left[\frac{\pi}{4} d^2 + \Psi v \right] \quad (01)$$

P, portanto, é a força necessária para fazer com que o material supérfluo, depois de preenchida toda a matriz, escoe pela garganta da rebarba. A força aumenta gradativamente durante a aproximação das matrizes (inferior e superior). Após o fechamento da ferramenta, a força aumenta instantâneamente.

Até aqui foi estudado o caso para o qual não se verifica reação da rebarba. Em seguida será analisado o caso em que se leva em conta essa reação.

A reação da rebarba é função da pressão exercida sobre ela (Figura 8).

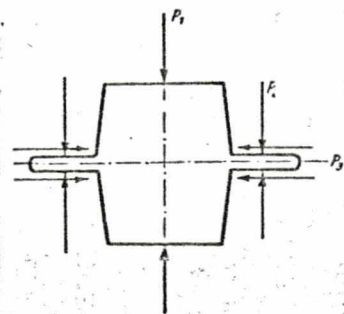


FIG. 8 - Forças na conformação em matriz/ (GELEJI³).

Em seu estudo experimental, GELEJI³ construiu duas matrizes idênticas, uma com e outra sem reação da rebarba como mostra a Figura 9, e realizou ensaios experimentais com chumbo (com $k_f = 1,6 \text{ kgf/mm}^2$).

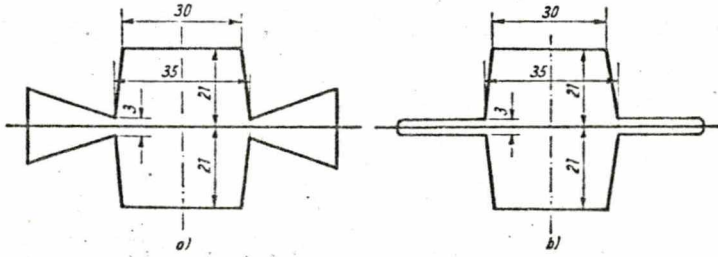


FIG. 9 - Dimensões das matrizes experimentais (GELEJI³).

Os gráficos da Figura 10 apresentam os resultados de seus ensaios. Observa-se que para o gráfico com reação da rebarba/ (Figura 10a), não se pode observar os pontos característicos que se obtém, quando não atua a citada reação (Figura 10b).

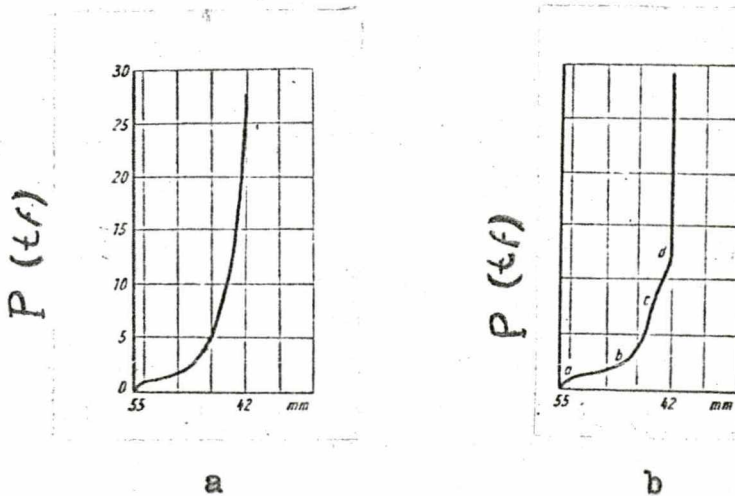


FIG. 10 - Força na conformação em matriz (GELEJI³).
 a) com reação da rebarba;
 b) sem reação da rebarba.

A força na conformação por forjamento em matriz com/

reação da rebarba, pode ser calculada da seguinte forma (Figura 11)

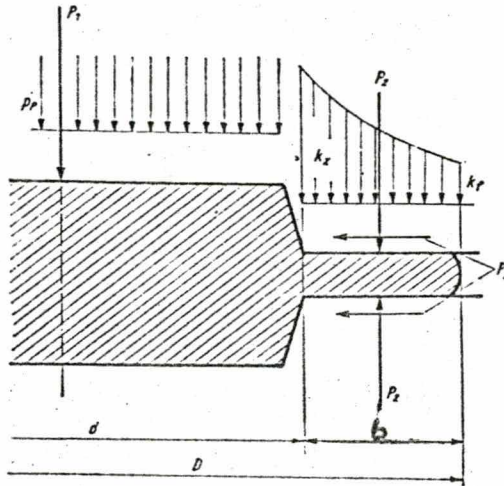


FIG. 11 - Determinação das forças na conformação. Matriz com reação da rebarba (GELEJI³).

$$P_2 = k_{rm} (D^2 - d^2) \frac{\pi}{4} \quad (02)$$

onde

$$k_{rm} = 0,5 k_f \left[e^{\frac{2 \mu b}{h^2}} - 1 \right]$$

é a resistência média à mudança de forma³ na compressão da rebarba.

O escoamento da rebarba pela garganta é obstado por uma componente reativa

$$P_3 = 2 P_2 \mu \quad (03)$$

traduzida pela presença de uma componente radial de tensão σ_r / (Figura 12).

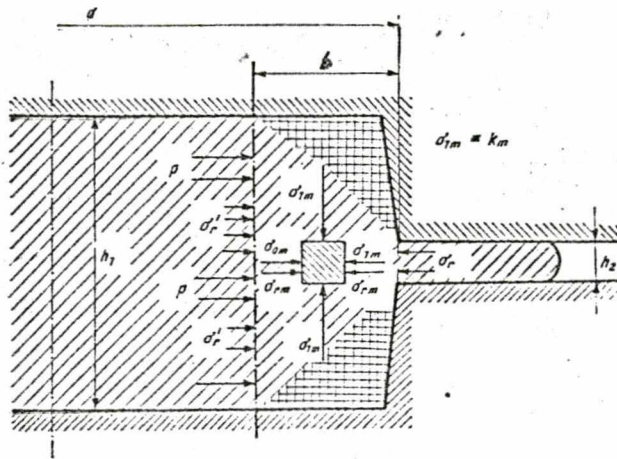


FIG. 12 - Determinação da tensão radial.

Em geral, pode-se escrever:

$$\sigma_r h_2 d \pi = 2 P_2 \mu$$

ou

$$\sigma_r h_2 d \pi = 2 k_{rm} \frac{\pi}{4} (D^2 - d^2) \mu$$

onde a tensão que se verifica na rebarba é

$$\sigma_r = k_{rm} \mu \frac{(D^2 - d^2)}{2 d h_2}$$

Na zona do funil de escoamento, a rebarba provoca uma tensão σ_{rm} , isto é :

$$\sigma_{rm} = 0,5 \sigma_r \left[1 + \frac{A_2}{A_1} \right]$$

com

$$A_1 = h_1 (d - 2b) \pi$$

$$A_2 = h_2 d \pi$$

donde

$$\sigma_{rm} = 0,5 \sigma_r \left[1 + \frac{d h_2}{(d - 2b) h_1} \right]$$

Esta tensão soma-se à tensão σ_{3m} , vigente na zona do funil de escoamento (Figura 12), logo o critério para o escoamento (Tresca) nestas condições será:

$$k_f = k_m - (\sigma_{3m} + \sigma_{rm})$$

e k_m no cone de deformação assume o valor

$$k_m = \frac{k_f + \sigma_{rm}}{1 - 0,93 \frac{\Delta A}{A_1}}$$

Assim sendo, a força na conformação no forjamento em matriz com reação da rebarba passa a ser expressa (de acordo / com as equações 01 e 02) por

$$P = 2k_m \left(\frac{\pi}{4} d^2 + \psi V \right) + k_{rm} (D^2 - d^2) \frac{\pi}{4} \quad (04)$$

2.1.2 - Solução limite superior

Outro método promissor para estimativa da / força de forjamento repousa na solução limite superior⁴. Parte - se aqui, da hipótese de que a movimentação de material ao final / da conformação se restringe a uma camada de espessura h_2 .

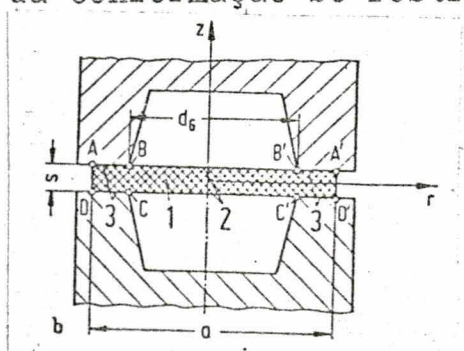


FIG. 13 - Estimativa da força na conformação com rebarba.

Entre essa camada e o restante do material (rígido) , existe cisalhamento, isto é, $\tau = K$, enquanto que na rebarba se tem escorregamento $\tau < K$ ou também cisalhamento (atrito de aderência). Tem-se assim, três parcelas:

Potência de conformação N_c na zona 1 (camada);

Potência de cisalhamento N_{ciz} na zona 2 (interface);

Potência de atrito N_a na zona 3 (rebarba).

A forma da impressão é de importância secundária para o cálculo da força final.

São decisivas as dimensões (largura ou diâmetro) da impressão, a espessura da rebarba e a distância entre os extremos da rebarba D . Usando o critério de escoamento de von MISES, e considerando-se exclusivamente peças com simetria de rotação, calcula-se a força P_{max} como

$$P_{max} = k_{fl} \pi \left[\frac{D^2}{4} + \frac{d^3}{\sqrt{3} \cdot 12 h_2} + \frac{2}{3} \mu \frac{D^3 - d^3}{8 h_2} \right] \quad (05)$$

Segundo TRESCA, tem-se:

$$P_{max} = k_{fl} \pi \left[\frac{D^2}{4} + \frac{d^3}{24 h_2} + \mu \frac{D^3 - d^3}{12 h_2} \right] \quad (06)$$

sendo que k_{fl} é calculado através da seguinte equação:

$$k_{fl} = k_f \left[1 + 0,92 \frac{b}{h_2} \right]$$

segundo recomendação de H. LIPPMANN².

CAPÍTULO III

3 - DESCRIÇÃO DA INSTALAÇÃO DE ENSAIO

Uma visão da instalação utilizada para os ensaios experimentais é apresentada nas fotografias das Figuras 14 e 15.

É possível visualizar a instalação como composta de dois / subsistemas ; ou seja :

- (i) equipamento de ensaio propriamente dito;
- (ii) instrumentação de medida.

3.1 - Equipamentos para a realização dos ensaios de forja -
mento.

3.1.1 - Máquina utilizada

Os ensaios foram todos / efetuados numa prensa de fricção GUTMANN (Figura 14), com / capacidade máxima de 150 toneladas-força, na qual foi montada uma ferramenta especialmente projetada.

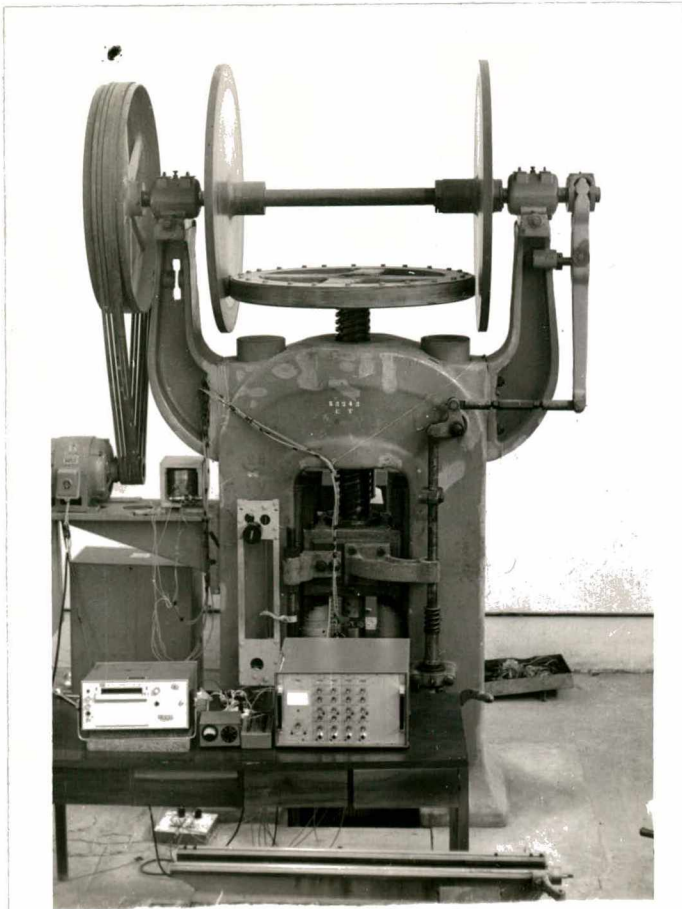


FIG. 14 - Vista geral da / instalação utilizada / para os ensaios / experimentais no / forjamento em matriz



FIG. 15 - Vista parcial da instalação utilizada para / os ensaios experimentais : instrumentação .

3.1.2 - Ferramenta

A Figura 16 mostra, em corte, a ferramenta utilizada. Desenhos individuais de seus componentes são apresentados no Apêndice 1. Uma descrição da ferramenta e de seu modo de o peração é apresentado a seguir, obedecendo à numeração apresentada na Figura 16.

A matriz superior é composta das seguintes peças:

estampo (1), contendo parte da impressão, constituindo-se, também, na célula de carga para a medição da componente de força P_1 ;

bucha do estampo (2), atuando na zona de formação de rebarba, transmitindo a componente / de força correspondente, através dos pinos (3) ao anel dinamométrico (4) de medição da compo-

nente de Força P_2 ; os pinos (3) atuam em /

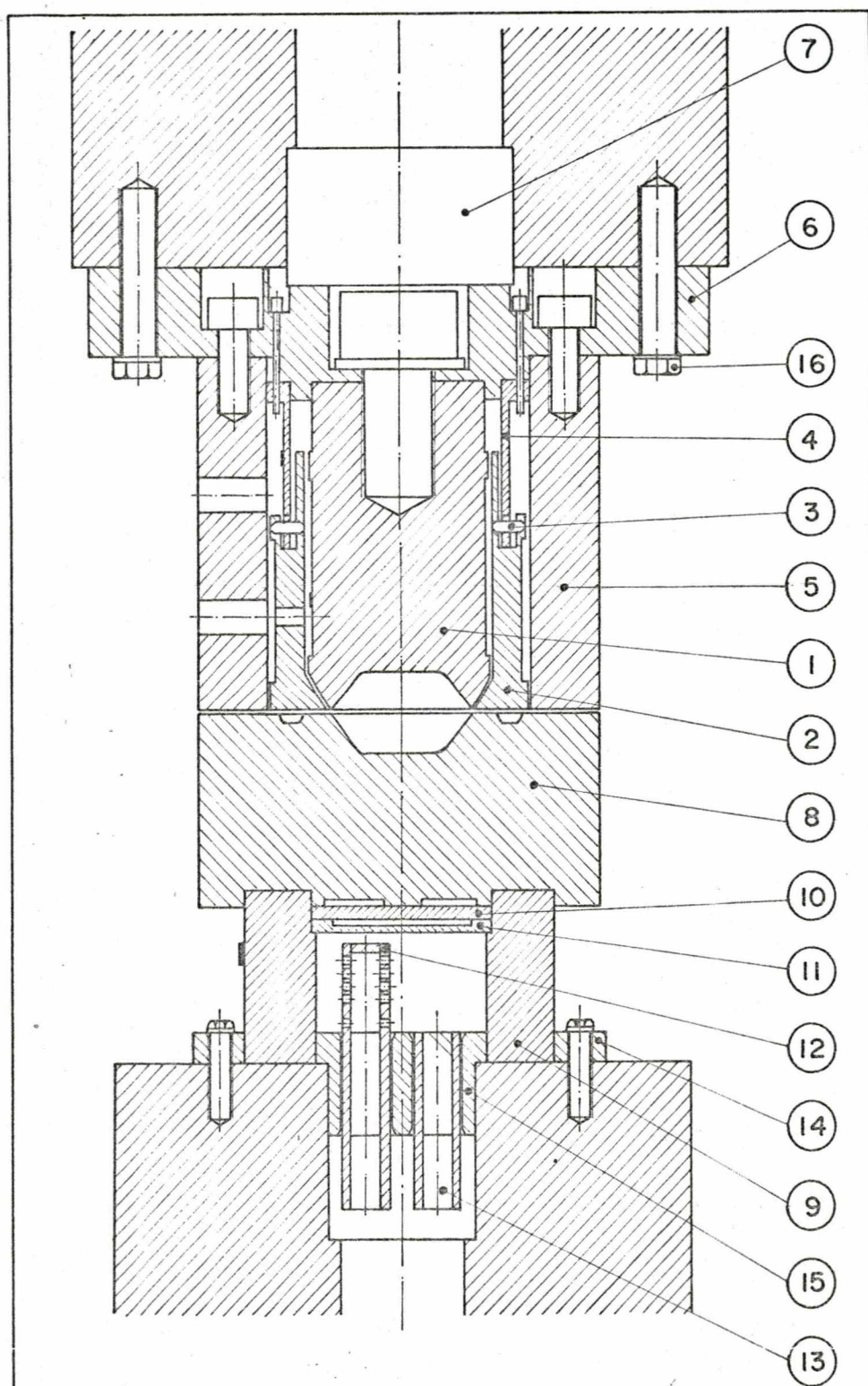


FIG. 16 - Vista em corte da ferramenta utilizada.

rasgos providos no anel dinamométrico (4), com o objetivo de permitir a fixação entre a bucha do estampo (2) e o mesmo;

anel guia (5), que envolve os elementos acima/mencionados;

disco e eixo guia (6) e (7) que transmitem os esforços ao carro da prensa.

A matriz inferior se compõe de:

matriz propriamente dita(8) contendo o restante da impressão que se apoia sobre o anel dinamométrico de medição da força total P (9) constituindo na célula de carga, que mede a força correspondente envolvida no processo de deformação;

discos isolantes (10) e (11), que visam minimizar a transferência de calor entre a matriz propriamente dita (8) e o anel dinamométrico (9);

tubos de injeção e retorno d'agua (12) e (13) que visam a refrigeração do anel dinamométrico (9);

anel de fixação (14), que envolve o anel dinamométrico (9) impedindo seu movimento na horizontal e vertical (ver detalhes de seu projeto, Apêndice 1);

guia (15) dos tubos de injeção e retorno d'agua (12) e (13).

A montagem da ferramenta foi feita obedecendo ao desenho de conjunto, mostrado à Figura 16.

O conjunto se opera da seguinte forma: por intermédio da alavanca lateral da prensa de fricção (Figura 14), o carro da prensa é acionado manualmente, adquirindo uma certa velocidade e indo de encontro ao bilete que se encontra assente à matriz propriamente dita (8). Ao dar-se o impacto, o bilete é prensado entre o estampo (1) e a matriz propriamente dita (8). Surgem / nestes elementos forças de natureza compressiva, cujos sinais são medidos através da variação de tensão dos extensômetros, transdutores que se acham colados às superfícies do estampo (1) e do anel dinamométrico (9). Ao preencher-se os meios moldes da impressão, o material supérfluo dirige-se para a abertura do canal de rebarba, entrando em contato interfacial com a bucha do estampo (2), provocando nesta uma força ascensional, que tende a lhe imprimir um movimento vertical. Ocorre que o anel dinamométrico (4) se apoia diretamente sobre a bucha do estampo (2) e é preso, em sua região superior, ao disco guia (6); conseqüentemente impede que haja movimento da bucha do estampo (2), e com isso sofre uma compressão, cuja força é medida pela variação de tensão dos extensômetros que se acham colados em sua superfície.



FIG. 17 - Vista do conjunto das matrizes montadas à prensa.

A Figura 17 mostra a fotografia referente a essa montagem. Observam-se, também, blocos separadores/laterais, que foram colocados com o intuito de impedir o choque / entre matrizes, ao final da conformação.

A Tabela abaixo lista os diversos / componentes da ferramenta, obedecendo à numeração apresentada na Figura 16, e fornece informações complementares a respeito dos / mesmos.

Nº	COMPONENTES	MATERIAL	TRATAMENTO TÉRMICO
01	estampo	aço VCO	temperado e revenido
02	bucha do estampo	aço VCO	temperado e revenido
03	pinos de fixação	aço ABNT 1020	-
04	anel dinamométrico (força da rebarba)	aço ABNT 1050	temperado
05	anel guia	aço ABNT 1050	-
06	disco guia	aço ABNT 1020	-
07	eixo guia	aço ABNT 1020	-
08	matriz propriamente dita	aço YPCW	temperado e revenido
09	anel dinamométrico (força total)	aço ABNT 1050	temperado e revenido
10	disco isolante	amianto	-
11	disco isolante	aço ABNT 1020	-
12	tubo de injeção d'água	aço ABNT 1020	-
13	tubo de retorno d'água	aço ABNT 1020	-
14	anel de fixação	aço ABNT 1020	-
15	guia dos tubos de injeção e retorno d'água	aço ABNT 1020	-
16	parafusos	aço ABNT 1020	-

TABELA 1

Esta ferramenta foi construída no Laboratório de Máquinas Operatrizes da Universidade Federal de Santa Catarina e os tratamentos térmicos foram realizados na Secção de Tratamento Térmico da Escola Técnica Tupy - Joinville, Santa Catarina.

A seguir, são mostradas fotografias referentes aos componentes da ferramenta, bem como seu dimensionamento, obedecendo à numeração apresentada à Figura 16.

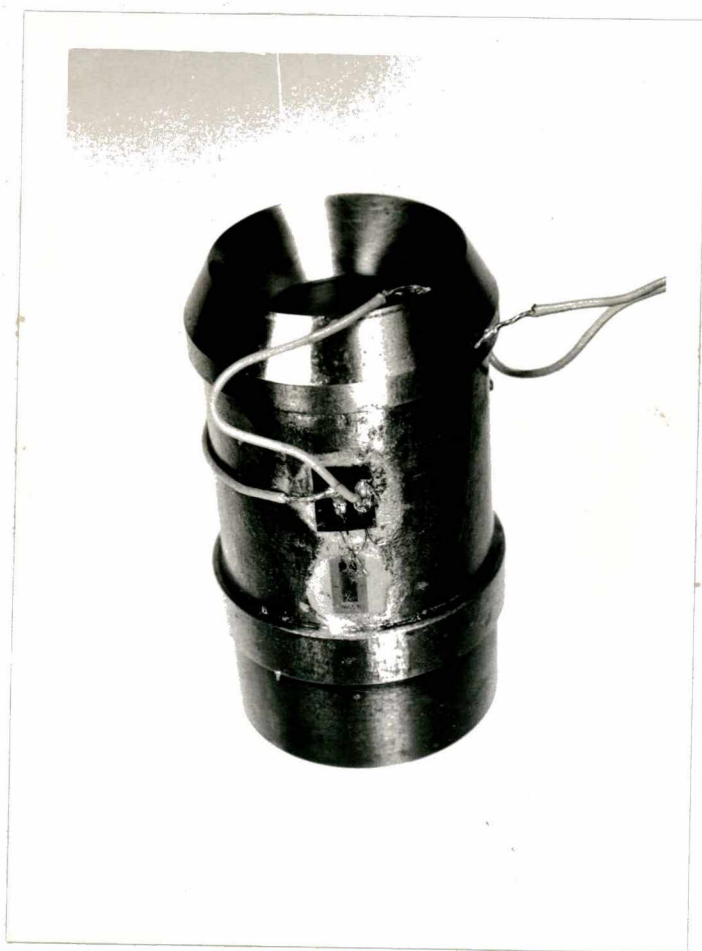


FIG. 18 - Detalhe da célula de carga para medição da força P_1 (estampo (01)).

Para a determinação da distância entre os extremos da rebarba (D), partiu-se da expressão dos volumes conhecidos do bilete e da peça e, utilizando-se a equação⁵,

$$V = V_m + V_r$$

onde

$$\begin{array}{ll} V & - \text{volume do bilette} & \left[\text{cm}^3 \right] \\ V_m & - \text{volume da impressão} & \left[\text{cm}^3 \right] \\ V_r & - \text{volume da rebarba} & \left[\text{cm}^3 \right] \end{array}$$

determinou-se V_r . Assim, fixada a altura h_2 da rebarba torna-se/ possível obter a distância entre os extremos da rebarba (D), tendo-se chegado à dimensão máxima $D = 52,0$ mm.

Para o dimensionamento da rebarba, foram utilizadas indicações de BRUCHANOW e REBELSKI⁶, segundo as quais a espessura da garganta da rebarba deve satisfazer à relação $h_2 = 0,015 D_{ps}$ obtendo-se, no presente caso $h_2 = 0,67$ mm, o que é compatível com os valores adotados, Para os cálculos acima não foi considerado o efeito da temperatura.

Obviamente, após o resfriamento, as peças forjadas apresentarão dimensões inferiores às resultantes, imediatamente após o forjamento. Essa diferença, entretanto, é pequena e não será considerada no presente trabalho.

A altura do estampo (1) e da matriz propriamente dita (8), foi dimensionada com base no gráfico da Figura 19, que relaciona a altura mínima da matriz em função da profundidade máxima da impressão¹. Sendo $h_{max} = 12,2$ mm, resulta

$$H_{min} = 120 \text{ mm.}$$

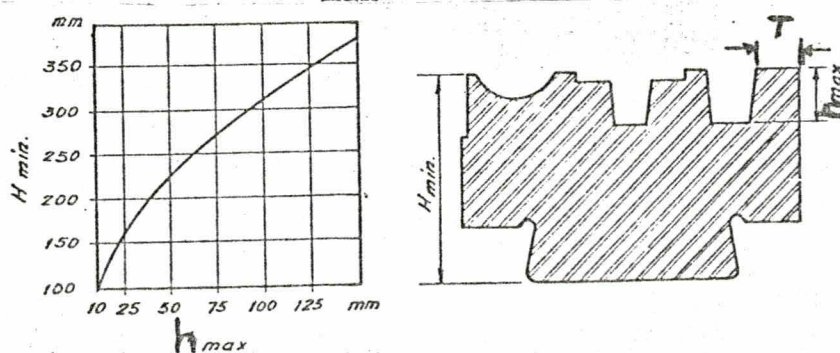


FIG. 19 - Gráfico para o cálculo da altura mínima da matriz.

Os raios de curvatura das gravuras foram di mencionados segundo a tabela da figura 20, extraídos da Norma / DIN 7523.

$\frac{H}{L}$	Canto externo r	Canto interno R
< 2	0,05 H + 0,5 (1)	2,25 r + 0,5 (2)
2 a 4	0,06 H + 0,5 (3)	3 r + 0,5 (4)
> 4	0,07 H + 0,5 (5)	3,5 r + 0,5 (6)

FIG. 20 -- Raios de curvatura mínimos dos forjados, para uso geral, em mm.

Sendo no caso $\frac{H}{L} < 2$, resulta, pela tabela,

la,

$$r = 1,125 \text{ mm}$$

$$R = 2,131 \text{ mm}$$

adotando-se os valores normalizados¹ $r = 1,5 \text{ mm}$ e $R = 2,5 \text{ mm}$.

A espessura mínima da parede (T), Figura 19, foi determinada a partir do nomograma apresentado por A. N. / BRUCHANOW⁶, e ilustrado na Figura 21.

Tendo-se

$$h_{\max} = 12,2 \text{ mm}; R = 2,5 \text{ mm e } \alpha = 38^\circ,$$

resulta

$$T = 20 \text{ mm}.$$

FIG. 21 - Nomograma para o cálculo da espessura mínima de paredes das cavidades. Exemplo: Para $h_{\max} = 42\text{mm}$, $R = 5\text{mm}$ e $\alpha = 11^\circ$ tem-se $T = 57\text{mm}$.

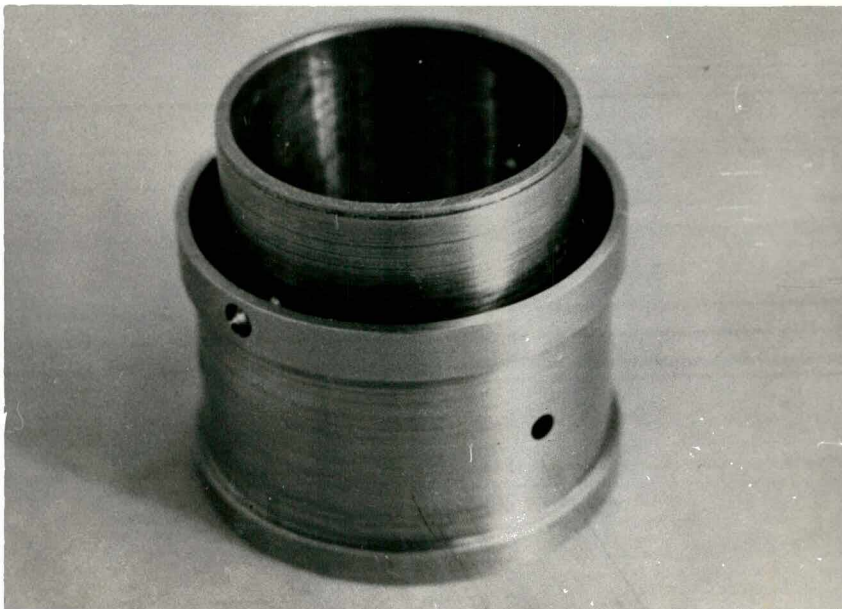
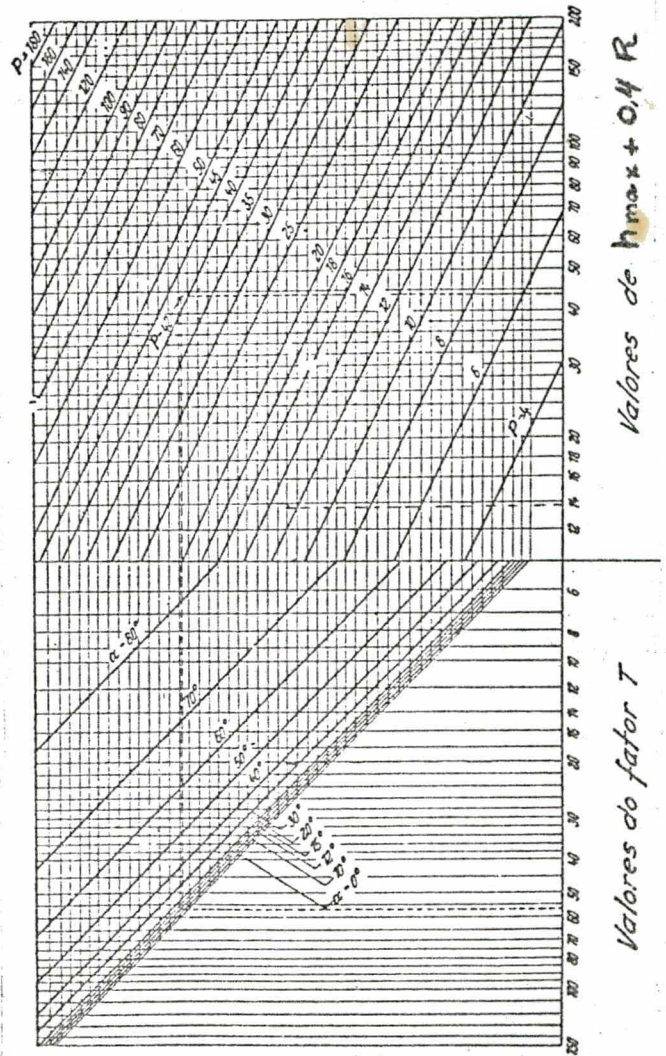


FIG. 22 - Detalhe da bucha do estampo (vista de cima).

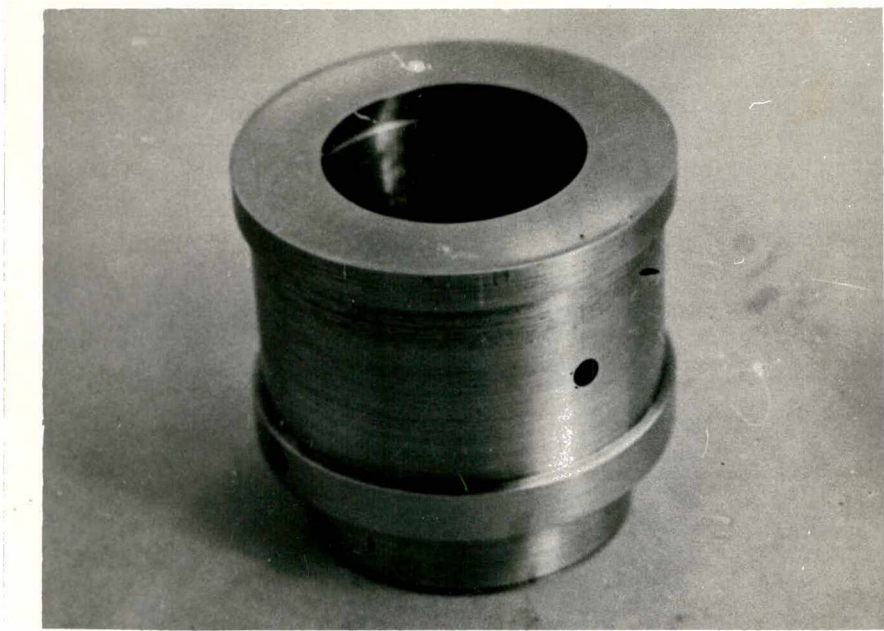


FIG. 23 - Detalhe da bucha do estampo (vista invertida).



FIG. 24 - Detalhe do anel /
dinamométrico (4).

A bucha do estampo (2) bem como o anel dinâmico (4) foram dimensionados para uma carga de 9.000 kgf, segundo a equação⁷

$$A = \frac{P'}{\sigma} = \frac{P'}{\epsilon E} = \frac{\pi}{4} (D_e^2 - d_i^2) \quad (07)$$

Tendo-se adotado para o diâmetro interno (d_i) das peças as dimensões 55,5 e 59,5 respectivamente, resultaram / para os diâmetros externos (D_e) as dimensões 59,5 e 62,5 mm. Para efeito de colagem dos extensômetros, a altura do anel dinâmico (4) foi tomada igual a 50 mm afim de permitir espaço suficiente para a colagem dos mesmos.⁸

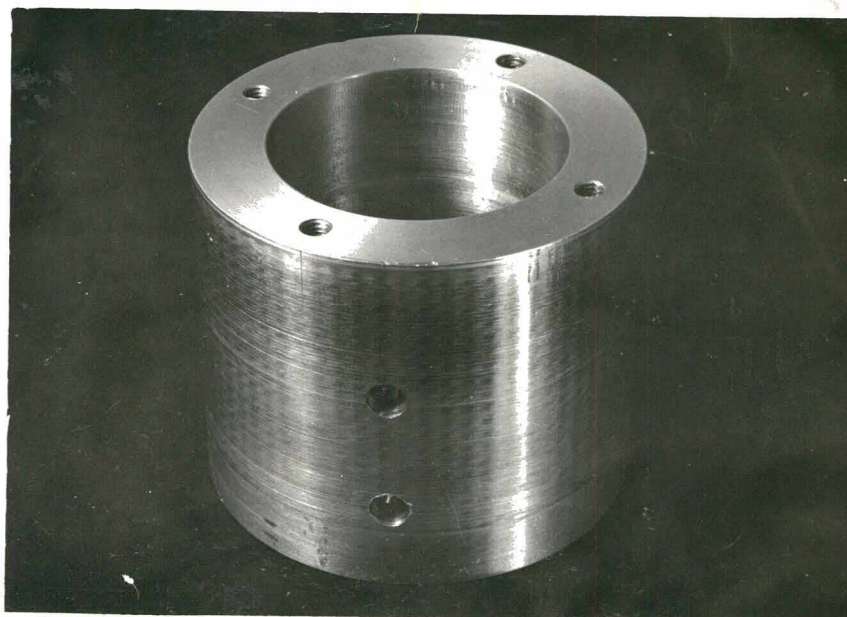


FIG. 25 - Detalhe do anel guia (5).



FIG. 26 - Detalhe do disco guia (6).



FIG. 27 - Detalhe do eixo guia(7).



FIG. 28 - Detalhe da matriz propriamente dita (8), (vis
ta de cima).

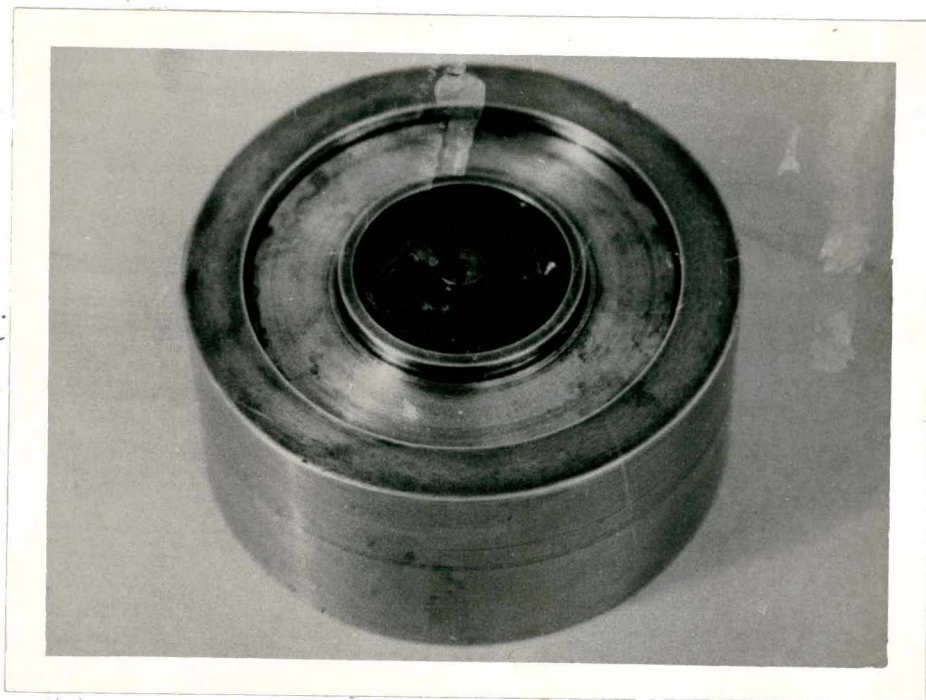


FIG. 29 - Detalhe da matriz propriamente dita (8), (vis
ta invertida).

A forma dada para o canal de rebarba foi a u-
sualmente utilizada em forjamento, ilustrada na Figura 30.

Por conveniência operacional, porém, tendo em vista o interesse em medir a componente da Força P_2 , esse canal foi invertido e integralmente alojado na matriz propriamente dita (8). Seu dimensionamento se fez segundo a tabela pertinente (Ref. 1, tabela 4.9, pg. 90).

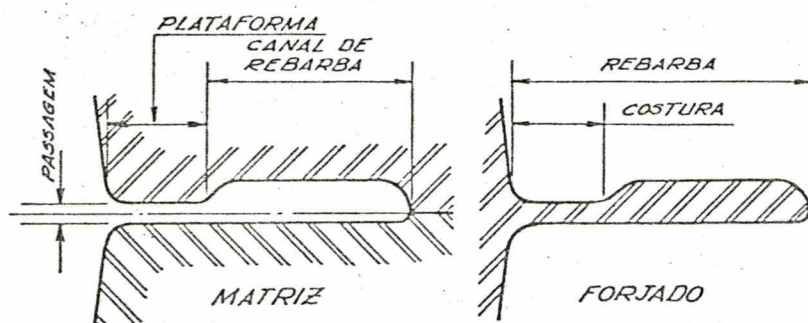


FIG. 30 - Canal da rebarba, na matriz, e rebarba, no forjado.



FIG. 31 - Detalhe do anel dinamométrico (9) para medição da força total.

O anel dinamométrico (9) foi dimensionado para uma carga de 100.000 kgf, segundo a equação (0.7), tendo-se adotado $d_i = 50$ mm, de que resulta $D_e = 90$ mm. Sua altura foi tomada igual a 50 mm afim de permitir espaço suficiente para colagem dos extensômetros.⁸



FIG. 32 - Detalhe do conjunto: discos de isolamento térmico (10) e (11), e pinos de fixação (3).

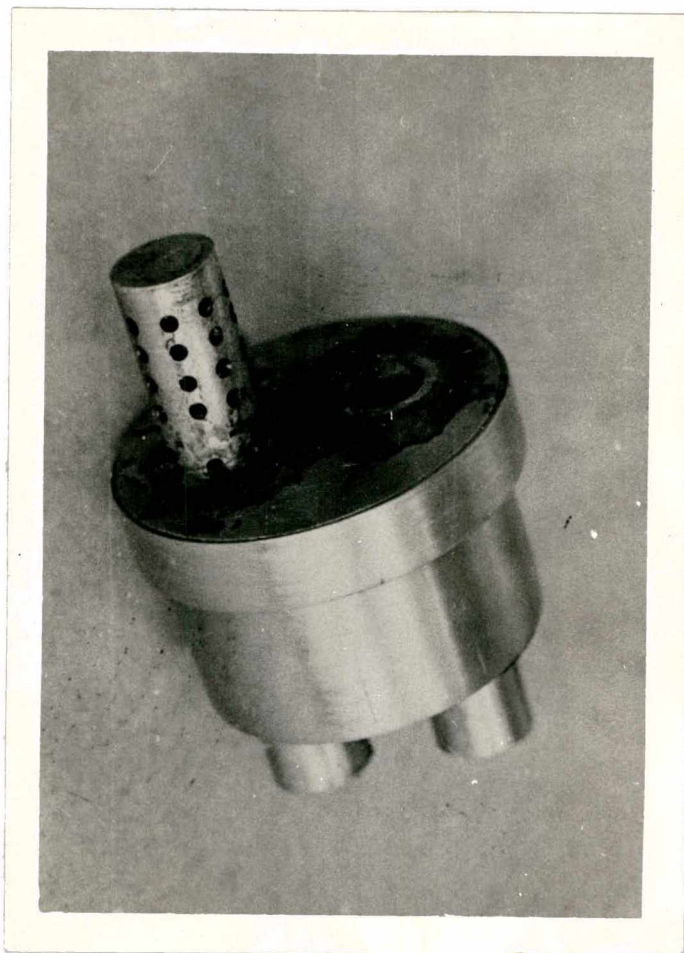


FIG. 33 - Detalhe do conjunto: guia (15) e tubos de injeção e retorno d'agua (12) e(13)



FIG. 34 - Detalhe do anel de fixação (14).

Os elementos relacionados na tabela 1, ilustrados na Figura 16, mostrados em fotografias nas Figuras 25, 26, 27, 32, 33 e 34, foram dimensionados de acordo com as medidas resultantes para os elementos previamente mencionados e as dimensões impostas pela máquina utilizada. Excetua-se os pinos de fixação (3) que foram dimensionados segundo a NORMA DIN 1433.

3.2 - Instrumentação para a medida dos parâmetros do forjamento.

Os parâmetros medidos nos ensaios de forjamento, foram as diversas componentes de forças e a velocidade.

3.2.1 - Medição de forças

Para a medição das forças desenvolvidas no processo de deformação e transmitidas aos anéis (4) e (9) e célula de carga (1), foram empregados transdutores do tipo resistivo, ou seja, extensômetros colados às superfícies dessas peças, defasados de 120° , e em número de tres, ligados entre si em série, em cada uma das peças solicitadas (Figura 16).

Face à deformação compressiva nestas peças, os extensômetros se deformam produzindo uma variação de tensão, dada por:

$$V = \frac{U}{2} \frac{\Delta R}{R} = \frac{U}{2} \epsilon K$$

onde:

V = sinal de tensão registrado no oscilógrafo (Figura 36);

U = tensão da ponte (Figura 35);

2 = significa que a ligação foi feita em

meia ponte;

$\frac{\Delta R}{R}$ - variação resistiva dos extensômetros

ϵ - deformação específica longitudinal /
da peça, igual à dos extensômetros ;

K - fator de ganho dos extensômetros.

Foram utilizados extensômetros com as seguintes características:

Tipo : 6/120 LY 11

R : 120.0 \pm 0,2% Ω

K : 2,05 \pm 1%

Ponte amplificadora : utilizou-se a ponte amplificadora KWS/GE - 5 HOTTINGER-BALDWIN (Figura 3.5), com as seguintes características principais:

Linearidade - \pm 0,1%

Variação do zero - em pouco tempo max.
 \pm 0,5 μ /m,

Interferências - 0,3 μ /m para 10V de alimentação da ponte ,

Sensibilidade - 40 μ /m para 10V de alimentação da ponte ,

Principais dados técnicos de saída:

Tensão - 4 a +4V

Impedância mínima \geq 100 Ω

Resistência interna $<$ 1 Ω

Outros dados:

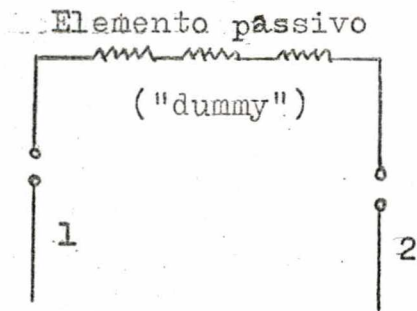
Temperatura de funcionamento -10 a $+50^{\circ}\text{C}$

Tipos de extensômetros 40 a $1200\ \Omega$

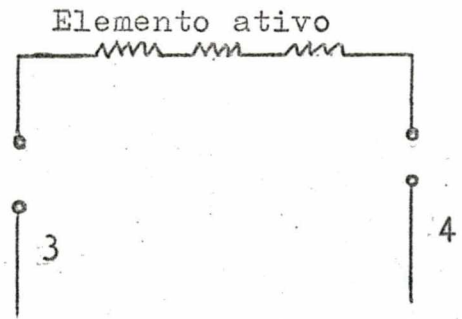
Em seu uso foram empregados três canais, sendo que cada canal corresponde a um sinal de tensão proporcional às forças desenvolvidas nos anéis e célula de carga. A ligação dos cabos elétricos para a ponte, foi feita em meia ponte, conforme o seguinte esquema elétrico simplificado:

ESQUEMA ELÉTRICO SIMPLIFICADO

ESQUEMA I



ESQUEMA II



1, 2, 3 e 4 = cabos elétricos blindados.

ESQUEMA I - Este esquema mostra três extensômetros / passivos, compensadores ou Dummies, ligados em série, em cujos bornes de saída se tem um valor de resistência igual a $360\ \Omega$. Eles são utilizados para permitir o equilíbrio elétrico exigido quando é estabelecida a ligação interna da ponte.

ESQUEMA II - Este esquema mostra três extensômetros /

ativos ligados em série; tais extensômetros são colados às superfícies dos a- / néis e célula de carga e enviam os sinais elétricos para a ponte amplificadora.

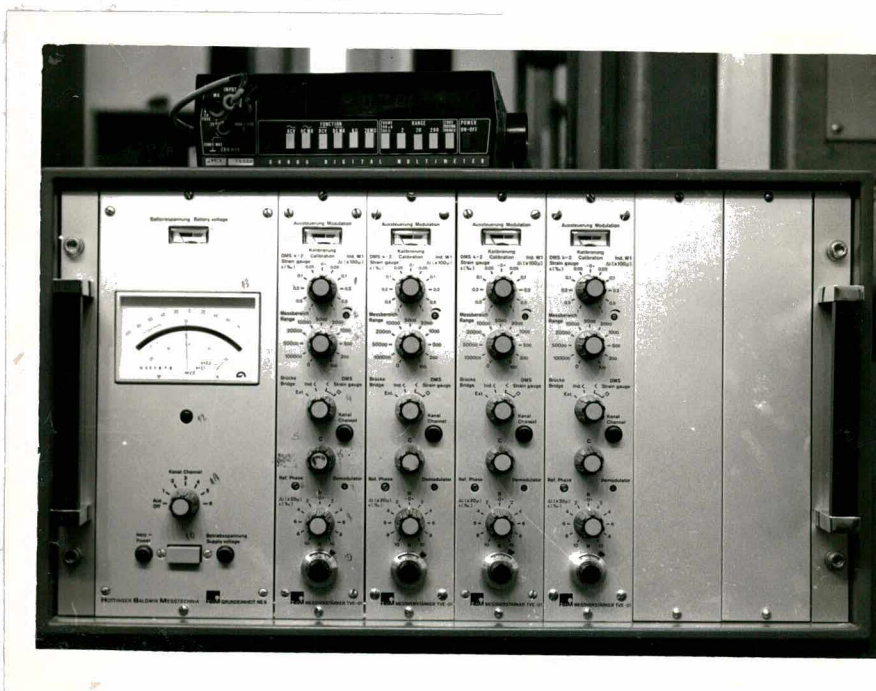


FIG. 35 - Ponte Amplificadora KWS/GE-5 HOTTINGER-BALDWIN.

Oscilógrafo : Para o registro gráfico da medição das forças (e também da velocidade de conformação), empregou-se o oscilógrafo de luz ultra-violeta para impressão de papel fotográfico, modelo U.V. RECORDER SE 3006 de 6 canais (Figura 36) .



FIG. 36 -
Oscilógrafo
U.V. RECORDER SE 3006

Galvanômetros : Para as medidas de forças, foram utilizados, no registrador, galvanômetros com as seguintes características:

Tipo	A. 3300
Frequência natural	3300 c/s
Resistência nominal ($\pm 10\%$)	42 Ω
Resistência de amortecimento	250 Ω
Corrente máxima de segurança ,	50 mA
Sensibilidade ($\pm 10\%$)	$\left\{ \begin{array}{l} 7,5 \text{ mA/cm} \\ 315 \text{ mV/cm} \end{array} \right.$

3.2.1.1 - Calibração dos extensômetros

A calibração para as medidas de forças no forjamento, foi efetuada da seguinte maneira: zerada a ponte e feita sua calibração nos diversos canais utilizados, foram os sinais de saída injetados no oscilógrafo, na mesma/ faixa de sensibilidade posteriormente usada nos ensaios de forjamento. Através de simulações, desequilibrando a ponte, foram registrados no oscilógrafo, gráficos em degraus. Estes registros / gráficos encontram-se no apêndice 2, itens 2.1, 2.2 e 2.3 e, fornecem relações entre tensão e deslocamento.

Uma vez obtidos os gráficos em degraus, é desconectada a ponte do oscilógrafo e através de cabo espacial de alta impedância, faz-se a conexão de cada saída com o multímetro digital, estabelecendo as relações entre tensão na ponte e digital, como nos quadros 6, 7 e 8 do Capítulo IV, item 4.3.2.

A partir daí, e de posse das curvas/ de calibração dos anéis e célula de carga, são estabelecidas as / seguintes relações para a divisão de 2 mm, no papel registrador .

$$\text{Força } P_1 : 2 \text{ mm} \longleftrightarrow 0,07 \text{ V} \longleftrightarrow 2,33(\text{tf}) \quad (08)$$

$$\text{Força } P_2 : 2 \text{ mm} \longleftrightarrow 0,08 \text{ V} \longleftrightarrow 2,00(\text{tf}) \quad (09)$$

$$\text{Força } P_2 : 2 \text{ mm} \longleftrightarrow 0,14 \text{ V} \longleftrightarrow 0,56(\text{tf}) \quad (10)$$

3.2.2 - Velocidade

Como se pode observar na Figura 37, foi projetado um dispositivo, montado ao lado da prensa, constando essencialmente de tres roldanas pelas quais passa um fio tenso. Sôbre o eixo da roldana intermediária foi colocado um potenciômetro (0 - 120 Ω), alimentado por uma pilha elétrica comum (1,5 V). Através de um cabo espacial foi o potenciômetro conectado ao oscilógrafo.

O carro da prensa foi dotado de uma braçadeira deslizando sôbre uma guia do dispositivo, podendo, eventualmente, arrastar uma haste prês a fio. Essa haste foi situada em tal posição, que o contato com a braçadeira se desse ao iniciar-se a conformação do bilete assente sobre a matriz prôpriamente dita (8). Com a variação da resistênci a do potenciômetro é produzida uma deflexão do galvanômetro no oscilógrafo, registrando-se, desta forma a variação do deslocamento do produto conformado com o tempo, isto é, a velocidade de conformação.

No oscilógrafo, especificado anteriormente (Figura 36) utilizou-se, nesse caso, um galvanômetro com as seguintes características:

Tipo	A.100
Frequência natural	100 c/s
Resistência nominal ($\pm 10\%$)	35 Ω
Resistência de amortecimento	100 Ω
Corrente máxima de segurança	10 mA

Sensibilidade ($\pm 10\%$) { 0,003 mA/cm
0,130 mV/cm

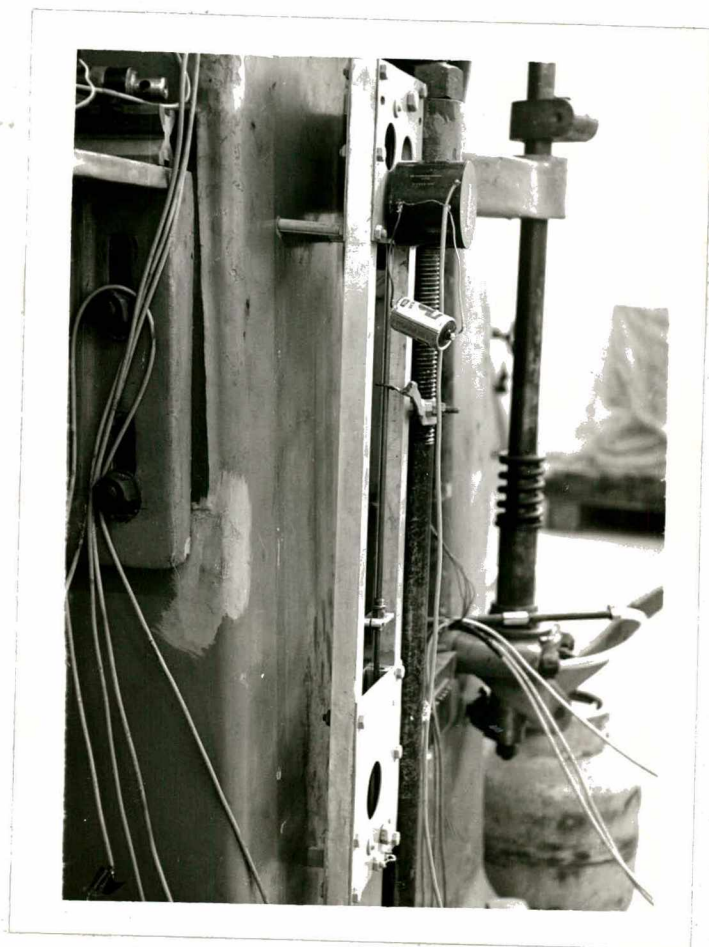


FIG. 37 - Vista parcial do dispositivo para medição da velocidade de conformação.

A calibração, no caso da velocidade, foi efetuada simplesmente deslocando-se a haste de guia do dispositivo de um determinado valor, correspondendo a uma quantidade de recalque do bilette, registrando-se no oscilógrafo a deflexão correspondente ao deslocamento procedido, comparando-se esse registro com as indicações de tempo do próprio oscilógrafo. Posteriormente, durante os ensaios, a tensão da pilha foi periodicamente verificada afim de não alterar o valor de calibração.

CAPÍTULO IV

4 - TRABALHO EXPERIMENTAL

4.1 - Aferição da Prensa Hidráulica AMSLER-Tipo 500D 1029.

A calibração dos anéis e célula de carga utilizadas / no equipamento experimental foi efetuada numa prensa hidráulica / AMSLER, tipo 500D 1029, com capacidade de 500 tf e escalas de 50, 250 e 500 tf.

Essa calibração foi precedida do levantamento da curva de aferição desta prensa para valores de carga compreendidos / entre 0 - 85 tf, tendo em vista a necessidade do conhecimento dos valores de carga efetivamente aplicados durante a calibração.

Para essa aferição foram utilizados dois dinamômetros de anel com dispositivo ótico de medição KMBO - 50 tf. Tais dinamômetros servem para medir cargas de tração ou de compressão puramente estática, fornecendo uma precisão maior do que a dos dinamômetros mecânicos.

Os dinamômetros utilizados tinham, cada um, capacidade de máxima de 50 tf, com um campo de medição que se estendia de 10 a 100% da carga máxima. As Figuras 38, 39 e 40 mostram a montagem dos equipamentos de aferição da prensa. A Figura 38 mostra esquematicamente como se procedeu à montagem. Observam-se na mesma, dois trilhos paralelos sobre os quais se assenta uma chapa de ferro, com a finalidade de permitir melhor distribuição de carga, / quando o sistema é solicitado pela prensa. A colocação dos trilhos visava repartir racionalmente a carga aplicada sobre os dinamômetros, mesmo porque cada um dos dinamômetros suportam apenas / 50 tf e a carga de aferição era de 85 tf.

- a - braço da prensa
b, d, f, h, j - cartolina
c, g - chapa de ferro
e - trilhos de aço
i - dinamômetros
k - mesa da prensa

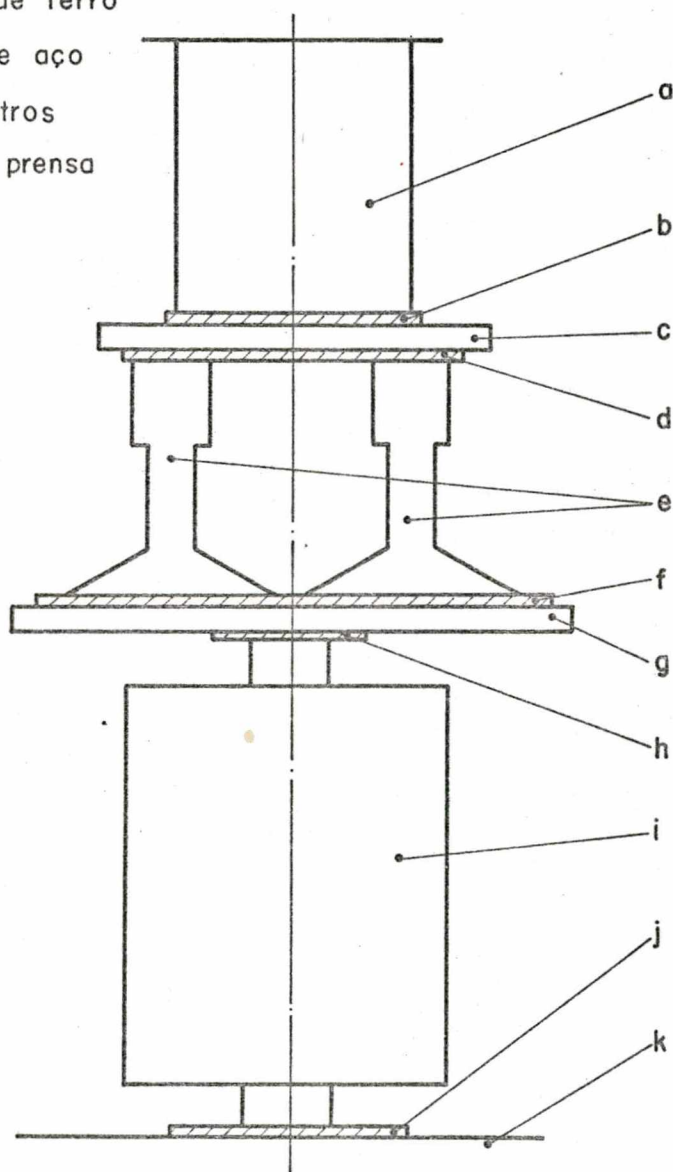


Fig. 38 - Montagem esquemática dos equipamentos para aferição da prensa.

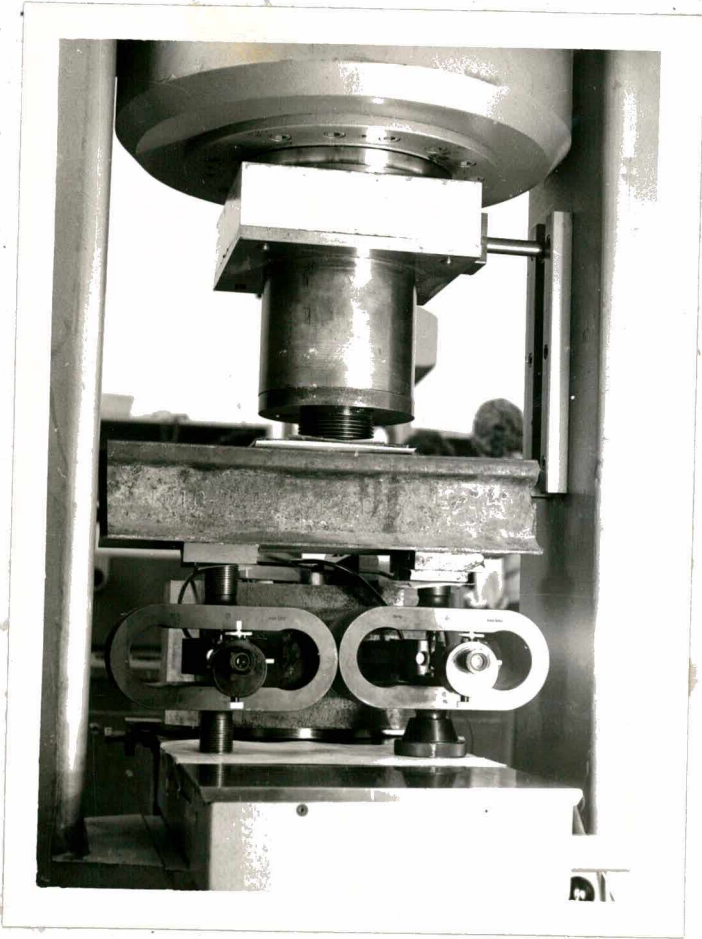


FIG. 39 - Vista parcial dos equipamentos para afeição da prensa.



FIG. 40 - Vista da fonte de tensão de alimentação das lâmpadas elétricas de iluminação das escalas dos microscópios.

A escala utilizada, na prensa, para o registro de cargas foi o de 0 - 250 tf. Valores de medições foram tomados em intervalos de 5 tf até a carga máxima de 85 tf, tanto no carregamento quanto no descarregamento.

Os valores de carga lidas na escala da prensa, bem como as reais obtidas, com o uso dos dinamômetros de anel com dispositivos óticos de medição, estão mostrados nos quadros 1 e 2. A Figura 41 mostra a curva de aferição da prensa em questão.

4.1.1 - Influência da Temperatura

Os dinamômetros pressupõem uma temperatura de ensaio de + 20°. O módulo de elasticidade é um fator que depende da temperatura. Segundo recomendação do fabricante, deve-se considerar um coeficiente de temperatura de 0,03% por grau centígrada

Para o valor dinamométrico X_i , lido numa medição, a carga P_i correspondente resulta:

$$P_i = \frac{X_i - X_{n-1}}{E_i} + P_{n-1}$$

sendo

$$E_i = \frac{\Delta E}{\Delta P} = \frac{X_n - X_{n-1}}{P_n - P_{n-1}}$$

onde

E_i = Unidades de leitura por unidade de carga/ para o respectivo intervalo (o fabricante fornece uma tabela de valores de 5 a 50tf)

X_i = valor dinamométrico qualquer, lido em uma medição ou determinado por interpolação ;

P_i = carga correspondente a X_i ;

P_n = carga correspondente a X_n ;

X_{n-1} = Valor dinamométrico próximo menor /
($X_{n-1} < X_i$) de X_n na tabela de valoo
res teóricos;

P_{n-1} = carga correspondente a X_{n-1} .

Os valores de leituras foram tomados em número de cin
co (5).

AFERIÇÃO DA PRENSA AMSLER - TIPO 500D 1029

Data : 20/10/75

Temperatura ambiente : 25°C

Carregamento

CARGA APLICADA (tf)	VALOR REAL MÉDIO DA CARGA (tf)	ERRO MÉDIO NO MOSTRADOR (tf)	ERRO PERCENTUAL
5	4,913	0,087	1,74
10	9,901	0,099	0,99
15	14,906	0,094	0,62
20	19,902	0,098	0,49
25	24,988	0,012	0,48
30	29,999	0,001	0,00
35	34,898	0,102	0,29
40	39,936	0,064	0,16
45	44,921	0,079	0,17
50	49,948	0,052	0,10
60	60,020	- 0,020	0,03
65	65,084	- 0,084	0,12
70	70,027	- 0,027	0,03
75	75,187	- 0,187	0,24
80	80,373	- 0,373	0,46
85	85,320	- 0,320	0,37

QUADRO 1

AFERIÇÃO DA PRENSA AMSLER - TIPO 500D 1029

Data : 20/10/75

Temperatura ambiente : 25°C

Descarregamento

CARGA APLICADA (tf)	VALOR REAL MÉDIO DA CARGA (tf)	ERRO MÉDIO NO MOSTRADOR (tf)	ERRO PERCENTUAL
80	81,040	- 1,040	1,30
75	75,909	- 0,909	1,21
70	70,637	- 0,637	0,91
65	65,711	- 0,711	1,09
60	60,577	- 0,577	0,96
55	55,457	- 0,457	0,83
50	50,474	- 0,474	0,94
45	45,464	- 0,464	1,03
40	40,429	- 0,429	1,07
35	35,269	- 0,269	0,76
30	30,278	- 0,278	0,92
25	25,235	- 0,235	0,94
20	20,093	- 0,093	0,46
15	15,114	- 0,114	0,76
10	10,133	- 0,133	1,33
5	5,112	- 0,112	2,24

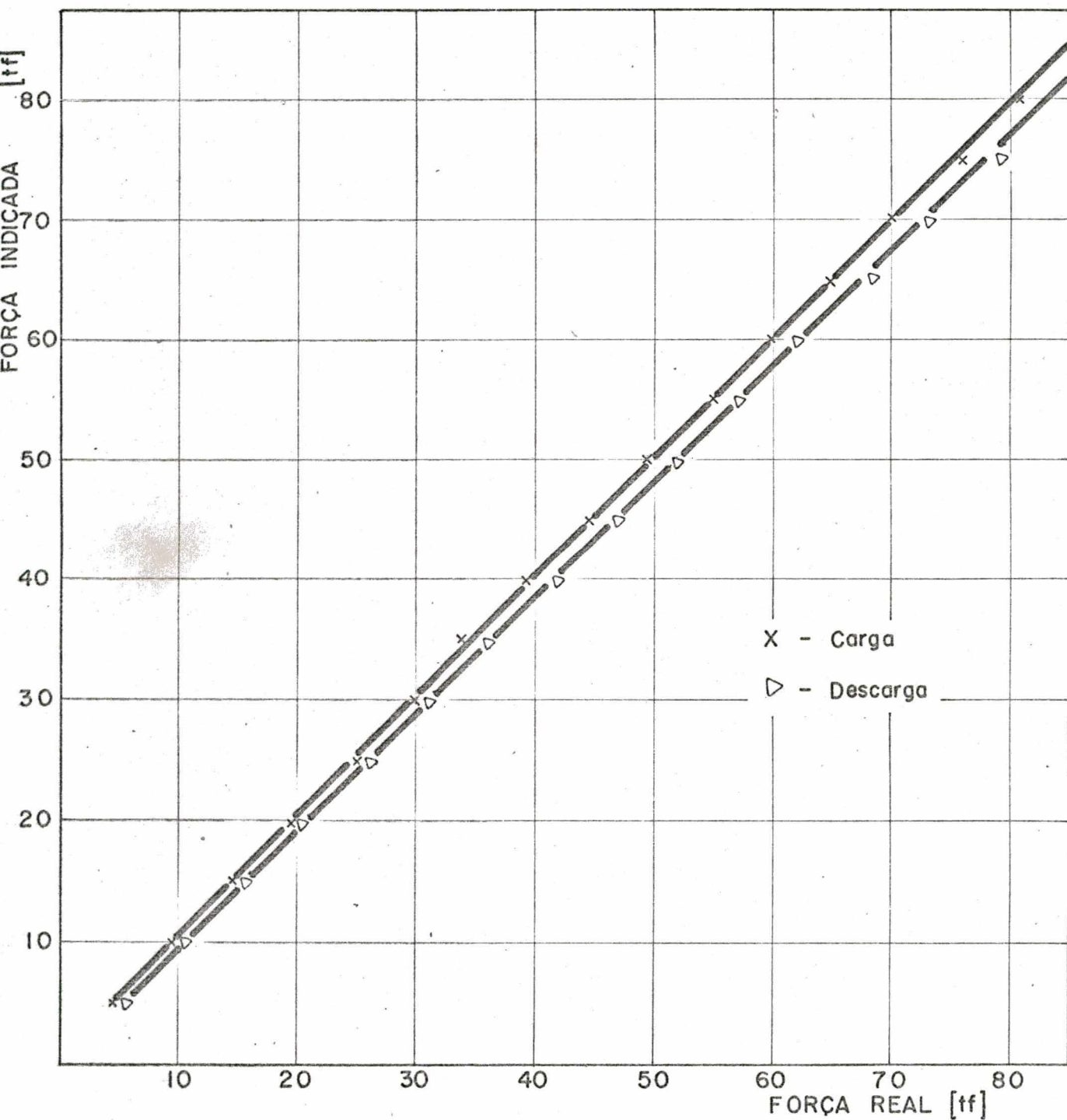


Fig. 41 - Curva de aferição da PRENSA AMSLER (tipo 500D-1029).

4.2. - Calibração dos anéis e célula de carga

O levantamento das curvas de calibração dos anéis e célula de carga foi efetuado na prensa AMSLER 500D 1029. O equipamento adicional empregado consistiu de:

a) Ponte Amplificadora KWS/GER- 5 B HOTTINGER-BALDWIN
(Figura 35).

b) Multímetro digital FLUKE 75362 8000 A .

As escalas adotadas, na Prensa AMSLER, para o registro de cargas foram as seguintes:

0 - 250 tf para calibração do anel e célula de carga relativa às forças total e principal (forças P e P_1);

0 - 50 tf para calibração do anel relativo/ à força da rebarba (força P_2).

As faixas de cargas utilizadas na calibração foram de

0 - 65 tf para o anel da força P.

0 - 55 tf para a célula de carga da força P_1

0 - 9 tf para o anel da força P_2 .

sendo os intervalos de leitura iguais a 5 tf para o anel e célula/ de carga relativa às forças P e P_1 , e 0,5 tf para o anel relativo à força P_2 .

Para a calibração destes anéis e célula de carga foi feita a montagem ilustrada nas Figuras 42 e 43. A calibração consiste em:

a) zerar a prensa na escala previamente escolhida;

b) fazer um primeiro carregamento até o valor máximo/da carga de calibração, verificando em seguida a faixa de sensibilidade na ponte, que deverá ser mantida durante toda a calibração. Esta faixa de sensibilidade deve ser tal que, ao ser atingida a carga em questão, o ponteiro indicador do analógico tenha/varrido todo seu campo de medição. As faixas de sensibilidade utilizadas foram as seguintes:

FS : 50 - para a força P_1

FS : 20 - para a força P_2

FS : 10 - para a força P

c) em seguida, inicia-se o carregamento sobre os a-néis e célula de carga, registrando-se os valores de cargas lidas bem como os valores de tensão correspondentes indicados no multímetro digital.



FIG. 42 - Vista geral da montagem para calibração do anel/ de medição da força P .

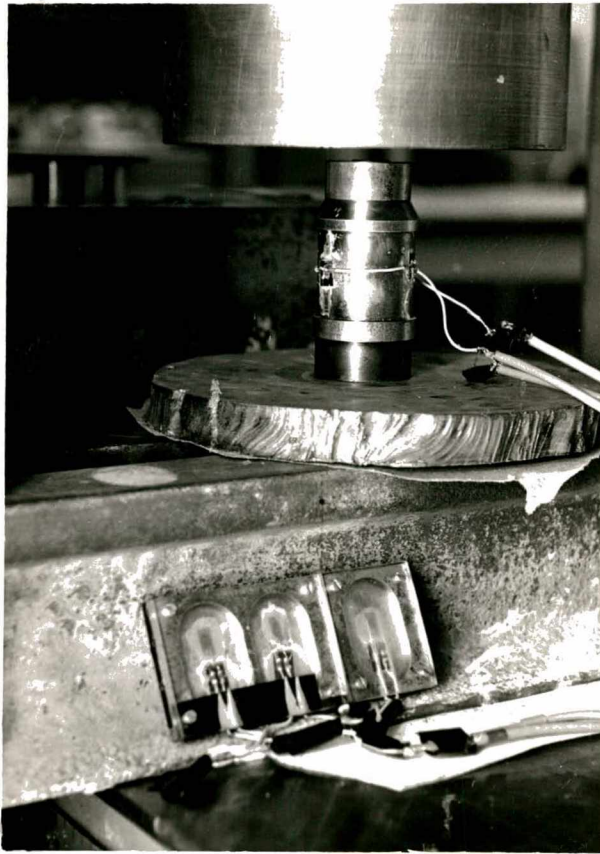


FIG. 43 - Vista parcial da montagem para calibração da célula de carga para medição da força P_1 (estampo (1)).

Os valores de cargas lidas, bem como as de tensão, no levantamento da curva de calibração dos anéis e célula de carga, encontram-se nos quadros de valores médios 3, 4 e 5 a partir de cinco leituras. As Figuras 44, 45 e 46 mostram as curvas de calibração em questão.

CALIBRAÇÃO DO ANEL PARA MEDIÇÃO DA FORÇA P

(PRENSA AMSLER-Tipo 500D 1029)

Temperatura ambiente : 25°C

Faixa de sensibilidade : 10

Data : 22/10/75

CARGA APLICADA (tf)	TENSÃO LIDA (V) CARREGAMENTO	TENSÃO LIDA (V) DESCARREGAMENTO
05	0.12	0.20
10	0.36	0.50
15	0.58	0.76
20	0.78	1.00
25	0.98	1.22
30	1.20	1.44
35	1.38	1.64
40	1.58	1.84
45	1.78	2.02
50	1.98	2.21
55	2.20	2.40
60	2.37	2.56
65	2.50	2.74

QUADRO 3

CALIBRAÇÃO DO ESTAMPO PARA MEDIÇÃO DA FORÇA P₁

(PRENSA AMSLER-Tipo 500D 1029)

Temperatura ambiente : 24°C

Faixa de sensibilidade : 50

Data : 23/10/75

CARGA APLICADA (tf)	TENSÃO LIDA (V) CARREGAMENTO	TENSÃO LIDA (V) DESCARREGAMENTO
05	0.14	0.14
10	0.30	0.31
15	0.46	0.48
20	0.64	0.66
25	0.78	0.82
30	0.96	0.98
35	1.11	1.14
40	1.26	1.30
45	1.44	1.46
50	1.60	1.59
55	1.74	1.74

QUADRO 4

CALIBRAÇÃO DO ANEL PARA MEDIÇÃO DA FORÇA P₂

(PRENSA AMSLER-Tipo 500D 1029)

Temperatura ambiente : 25°C

Faixa de sensibilidade : 20

Data : 24/10/75

CARGA APLICADA (tf)	TENSÃO LIDA (V) CARREGAMENTO	TENSÃO LIDA (V) DESCARREGAMENTO
1,0	0,18	0,24
1,5	0,32	0,36
2,0	0,42	0,50
2,5	0,54	0,62
3,0	0,66	0,74
3,5	0,76	0,86
4,0	0,88	0,96
4,5	0,98	1,10
5,0	1,10	1,20
5,5	1,28	1,36
6,0	1,36	1,48
6,5	1,48	1,60
7,0	1,60	1,68
7,5	1,68	1,78
8,0	1,80	1,92
8,5	1,92	2,04
9,0	2,04	2,14

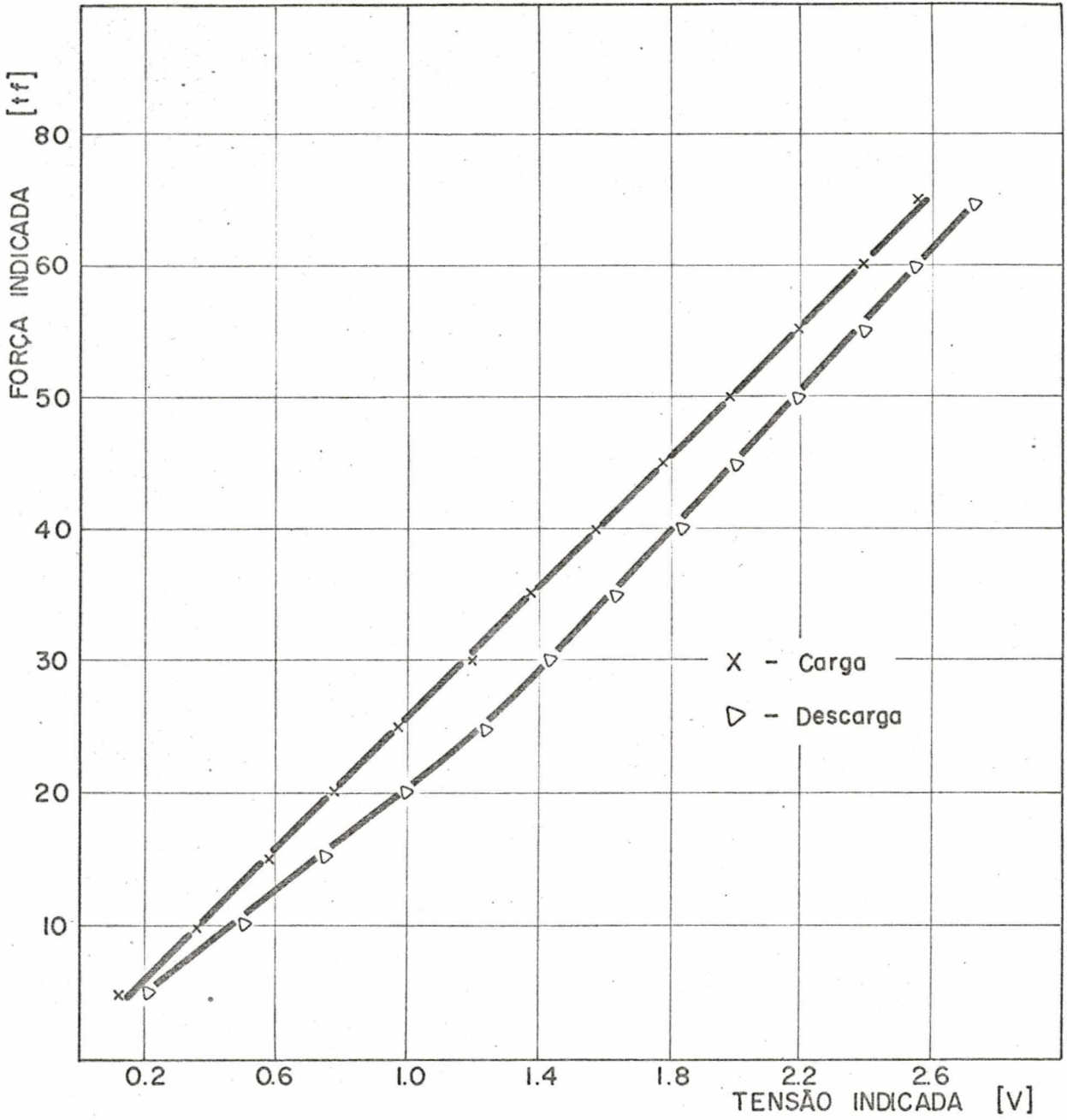
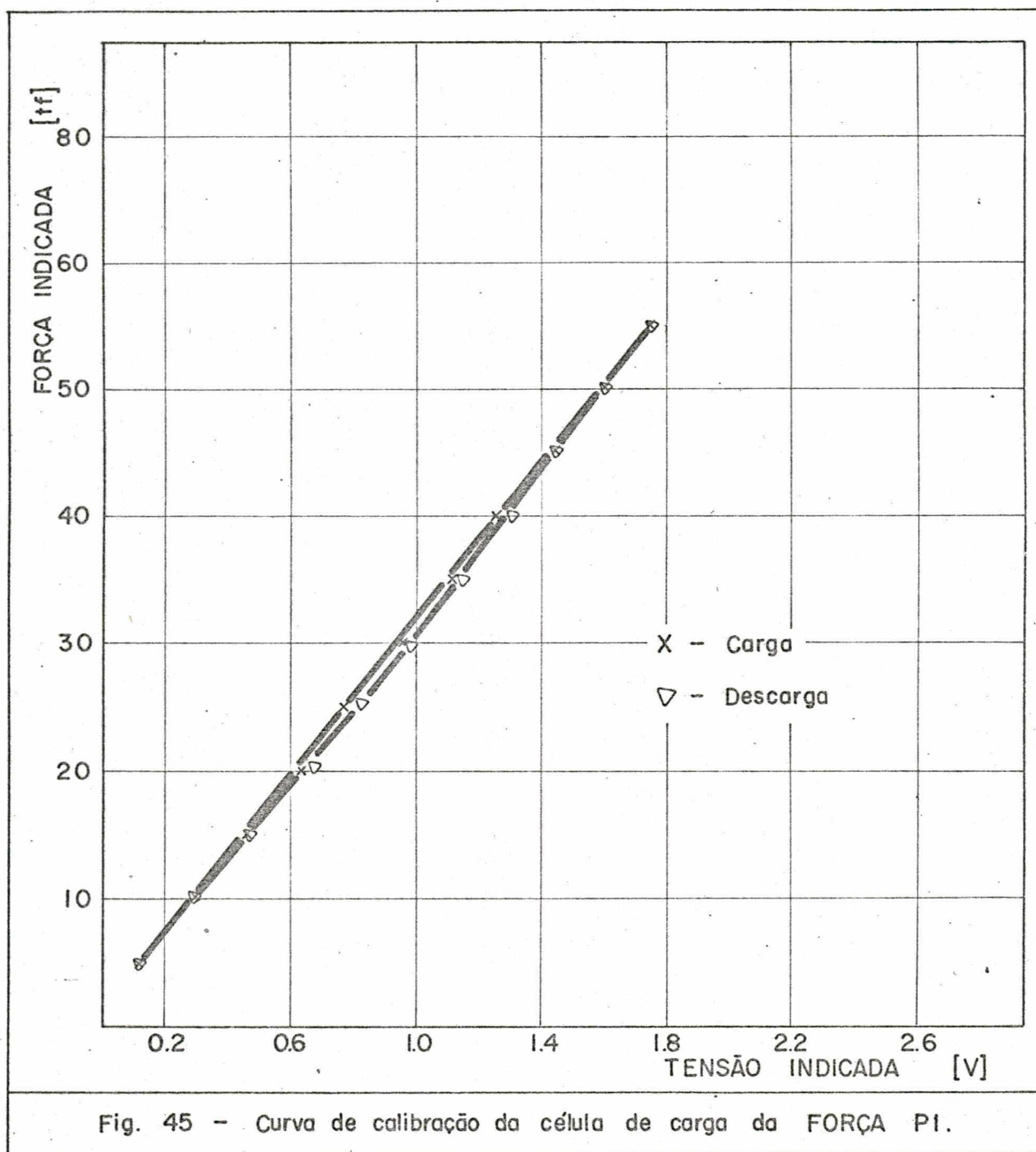


Fig. 44 - Curva de calibração do anel da FORÇA P.



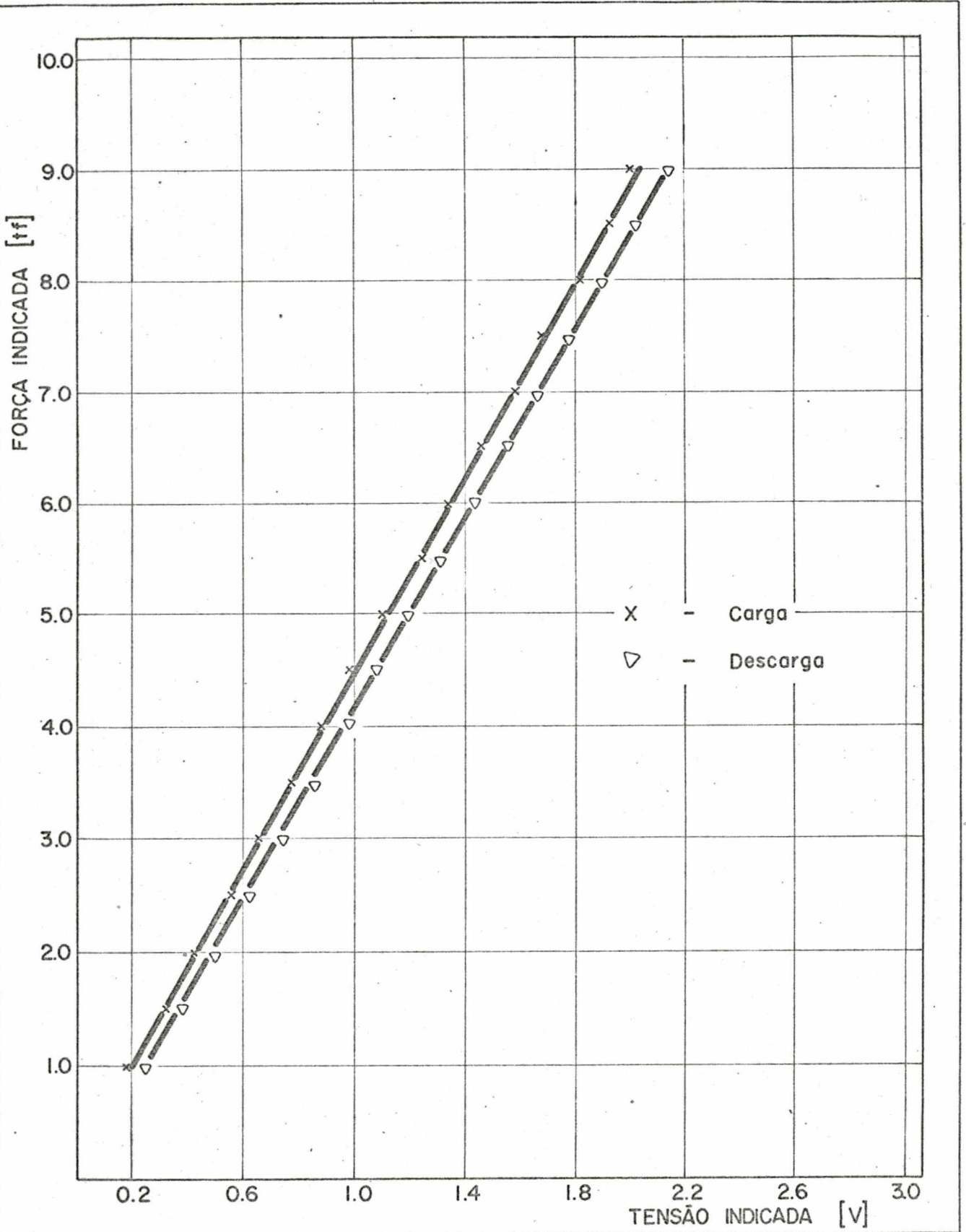


Fig. 46 - Curva de calibração do anel da FORÇA P2.

4.3 - Calibração da Ponte com o multímetro digital

4.3.1 - Procedimento adotado

Zerada a ponte e feita sua calibração nos diversos canais utilizados, segundo recomendação de seu manual de instrução, injeta-se seu sinal de saída no multímetro digital. Através do botão seletor da ponte extensométrica, correspondente à tensão de calibração, provoca-se o desequilíbrio padrão da mesma, fazendo-se, ao mesmo tempo, a leitura das tensões correspondentes no multímetro digital. As faixas de sensibilidade escolhidas para este procedimento devem ser as mesmas a serem usadas na realização dos diversos ensaios de forjamento.

4.3.2 - Resultados obtidos

Os valores de tensão correspondentes ao desequilíbrio da ponte, bem como as indicadas no digital encontram-se nos quadros 6, 7 e 8. A Figura 47 mostra a curva de calibração / ponte-digital.

LEVANTAMENTO DA CURVA DE CALIBRAÇÃO DA PONTE COMO MULTÍMETRO DIGITAL

Temperatura ambiente: 20°C

Faixa de sensibilidade : 50

Data : 15/04/76

(Força P)

PONTE (V)	MULTÍMETRO DIGITAL (V)
0.00	0.00
0,05	0.08
0.10	0.15
0.20	0.30
0.50	0.74
1.00	1.40

QUADRO 6

LEVANTAMENTO DA CURVA DE CALIBRAÇÃO DA PONTE COM
O MULTÍMETRO DIGITAL

Temperatura ambiente : 20°C

Faixa de sensibilidade : 50

Data : 15/04/76

(Força P_1)

PONTE (V)	MULTÍMETRO DIGITAL (V)
0.00	0.00
0.05	0.07
0.10	0.13
0.20	0.26
0.50	0.64
1.00	1.29

QUADRO 7

LEVANTAMENTO DA CURVA DE CALIBRAÇÃO DA PONTE COM
O MULTÍMETRO DIGITAL

Temperatura ambiente : 20°C

Faixa de sensibilidade : 20

Data : 15/04/76

(Força P_2)

PONTE (V)	MULTÍMETRO DIGITAL (V)
0.00	0.00
0.05	0.14
0.10	0.32
0.20	0.65
0.50	1.62
1.00	3.40

QUADRO 8

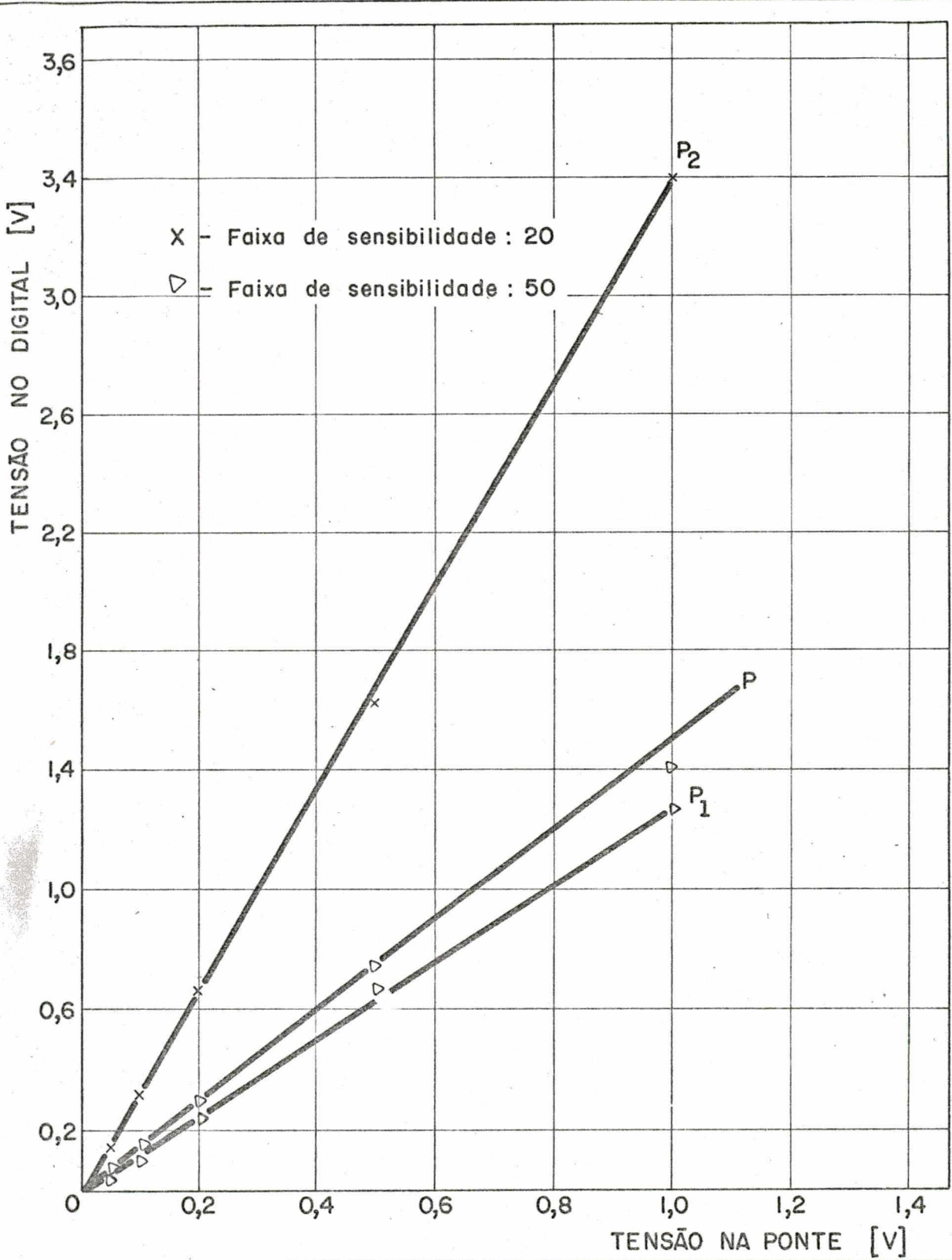


Fig. 47 - Curva de calibração PONTE - DIGITAL

4.4 - Ensaio de forjamento e resultados

Introdução

O material utilizado para a realização do presente trabalho, foi o alumínio 1 S comercialmente puro (99,5% AL), ofertado pela ALCAN. Esse material foi fornecido em barras de secção/transversal hexagonal (25,4 x 29,33).

A partir dessas barras foram confeccionados biletos com as seguintes dimensões:

Diâmetro - 25,30 mm

Comprimento - 50,60 mm

4.4.1 - Estudo do resfriamento do bilote

Preliminarmente à realização dos ensaios procedeu-se a um estudo do ciclo térmico do bilote, entre o aquecimento e a conformação, tanto em seu centro como na periferia. Tais ciclos foram levantados como se descreve:

a) preparou-se um bilote, com as mesmas dimensões dos que seriam usados nos ensaios, porém possuindo adicionalmente furação longitudinal em seu centro e periferia (diâmetro 1,2 mm, profundidade 20 mm). Nesses furos foram introduzidos termopares CHROMEL ALUMEL (Figura 48), cujos terminais se ligaram ao registrador de gráficos (Oscilógrafo);

b) uma vez atingida a temperatura de 450°C no centro do bilote (temperatura arbitrada), indicada pelo multímetro digital, que estava associado em paralelo com o oscilógrafo, retirava-se o bilote de dentro do forno, depositando-o em cima da matriz propriamente dita (8), ali o deixando até que atingisse/

a temperatura de 400°C (temperatura de forjamento do alumínio).

De posse dos registros gráficos do oscilógrafo, observou-se que o tempo gasto para atingir a temperatura de 450°C era da ordem de 47'', e o tempo para resfriar de 450°C a 400°C era de 60''.

Como se havia determinado em ensaios prévios, que o tempo gasto / para a prensa atingir o bilette era de 5'', conclui-se que era necessário manter o bilette sôbre a matriz prôpriamente dita (8) por um período da ordem de 55'', quando então se acionava a máquina.

Saliente-se que as temperaturas acima mencionadas foram alcançadas em valores equivalentes a tensão, indicadas pelo digital, através do uso da tabela de conversão de temperatura do referido termopar.



FIG. 48 - Vista parcial do forno utilizado no aquecimento dos bilettes, avendo-se também a ligação do referido termopar.

O objetivo de se levantar ciclos térmicos no centro e periferia do bilete foi o de se estabelecer o gradiente de temperatura existente entre aqueles dois pontos.

Na realização dos ensaios, a matriz propriamente dita (8) se aquecia de uma temperatura na ordem de 150°C , razão por que se refrigerava o anel (9) de medição da Força P.

Características do forno utilizado no aqueci-

mento dos biletas :

- Marca : BRASIMET
- Tipo : KS 15/8/25
- Tensão : 220 V
- Freqüência : 60 c/s
- Potência : 5 KW
- Temp. máxima : 1350°C

Resultados obtidos

Os registros gráficos das variações dos parâmetros (forças e deslocamento) verificadas no oscilógrafo são apresentados nas Figuras 51 a 56. O quadro 09 apresenta um resumo dos resultados obtidos. Apresenta-se também nos quadros 10 e 11 o levantamento experimental para o traçado das curvas (Figuras 57 e 58), que relaciona as forças com a deformação do forjado. Nas Figuras 49 e 50 são mostrados bilete e forjado utilizados e obtidos respectivamente no forjamento.

Resultados experimentais

BILETE	A	B	D	F	AB	AC
DIÂMETRO DO BILETE (mm)	25.3	25.3	25.3	25.3	25.3	25.3
ALTURA DO BILETE (mm)	50.6	50.6	50.6	50.6	50.6	50.6
VOLUME DO BILETE (mm ³)	25420	25420	25420	25420	25420	25420
LUBRIFICANTE	Molykote	Molykote	Molykote	Molykote	Molykote	Molykote
LARGURA DA REBARBA (mm)	0.8	2.2	2.8	2.9	2.0	3.2
ALTURA DA REBARBA (mm)	0.7	0.8	0.9	0.8	0.8	0.8
ALTURA DO FORJADO (mm)	24.7	24.7	24.6	24.7	24.8	24.7
FORÇA TOTAL (tf)	47.5	50.5	54.0	56.0	54.0	57.5
VELOCIDADE (mm/s)	117.72	117.72	123.80	117.72	117.27	123.33

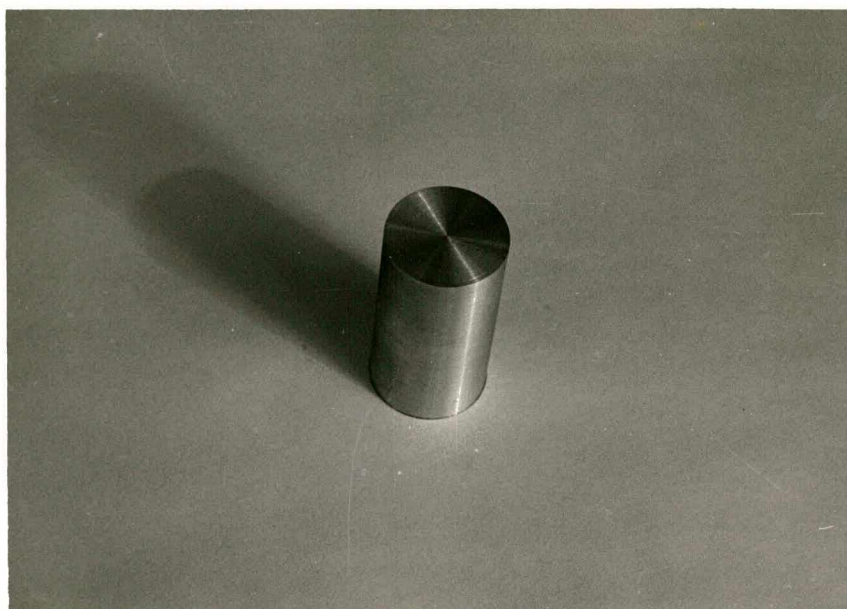


FIG. 49. - Vista do bilete utilizado no forjamento.



FIG. 50 - Vista do forjado obtido por forjamento.

FORJAMENTO EM MATRIZEnsaio ExperimentalCondições de ensaio

- Data : 20/05/76
- Material : Alumínio
- Lubrificante : Molykote "HTF"
- Temp. de Forjamento : 400°C
- Bilete : (A)

Diâmetro : 25.30 mm

Comprimento : 50.60 mm

Volume : 25420 mm³

Altura do corpo forjado : 24.70 mm

Altura do recalço : 25,90 mm

Largura da rebarba : 0.8 mm

Altura da rebarba : 0.7 mm

Resultados obtidos- Forças :

Força Total : 47.5 (tf)

Força principal : 47.5 (tf)

Força da rebarba : 0.0 (tf)

- Velocidade de conformação : 117.72 mm/s

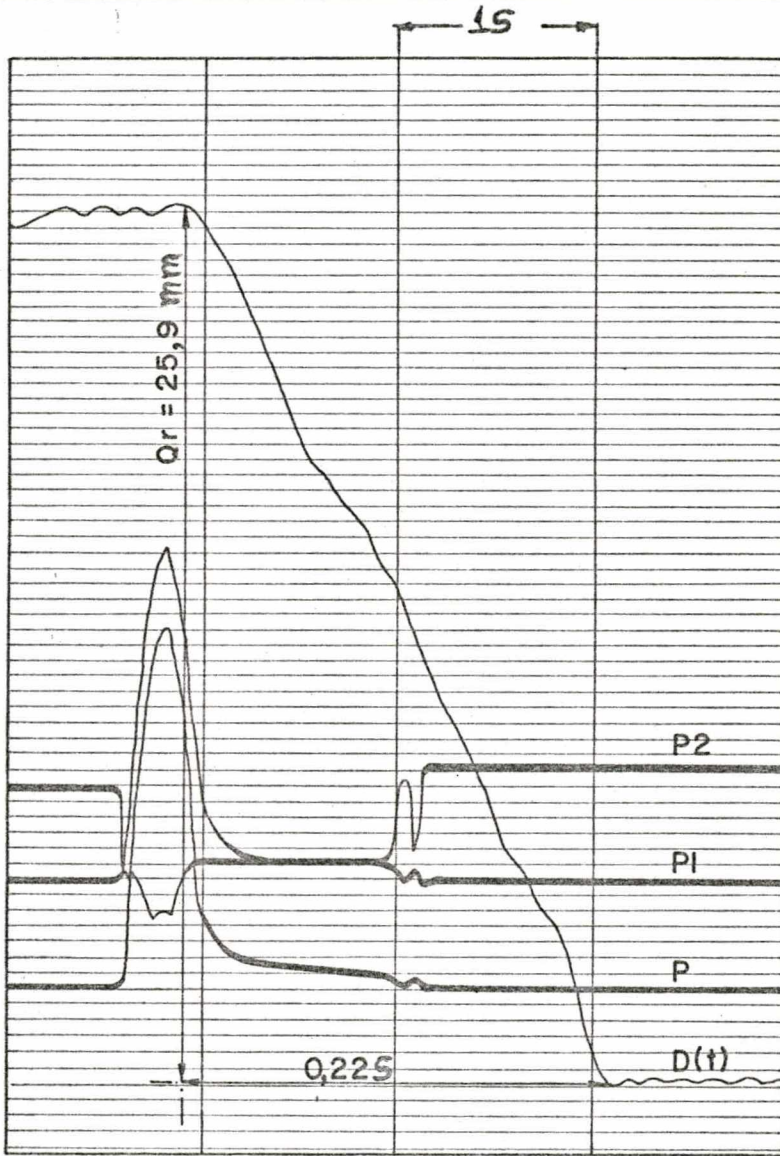


Fig. 51:

Registro gráfico de força e deslocamento no oscilógrafo. (U.V. Recorder)

Material: Alumínio - Bilete : (A)

FORJAMENTO EM MATRIZEnsaio experimentalCondições de ensaio

- Data : 20/05/76

- Material : Alumínio

- Lubrificante : Molykote "HTF"

- Temp. de forjamento : 400°C

- Bilete : (B)

Diâmetro : 25.30 mm

Comprimento : 50.60 mm

Volume : 25420 mm³

Altura do forjado : 24.70 mm

Altura recalçada : 25,90 mm

Largura da rebarba : 2.2 mm

Altura da rebarba : 0.8 mm

Resultados obtidos

- Forças :

Força total : 50.5 (tf)

Força principal : 46.5 (tf)

Força da rebarba : 4.0 (tf)

- velocidade de conformação : 117.72 mm/s

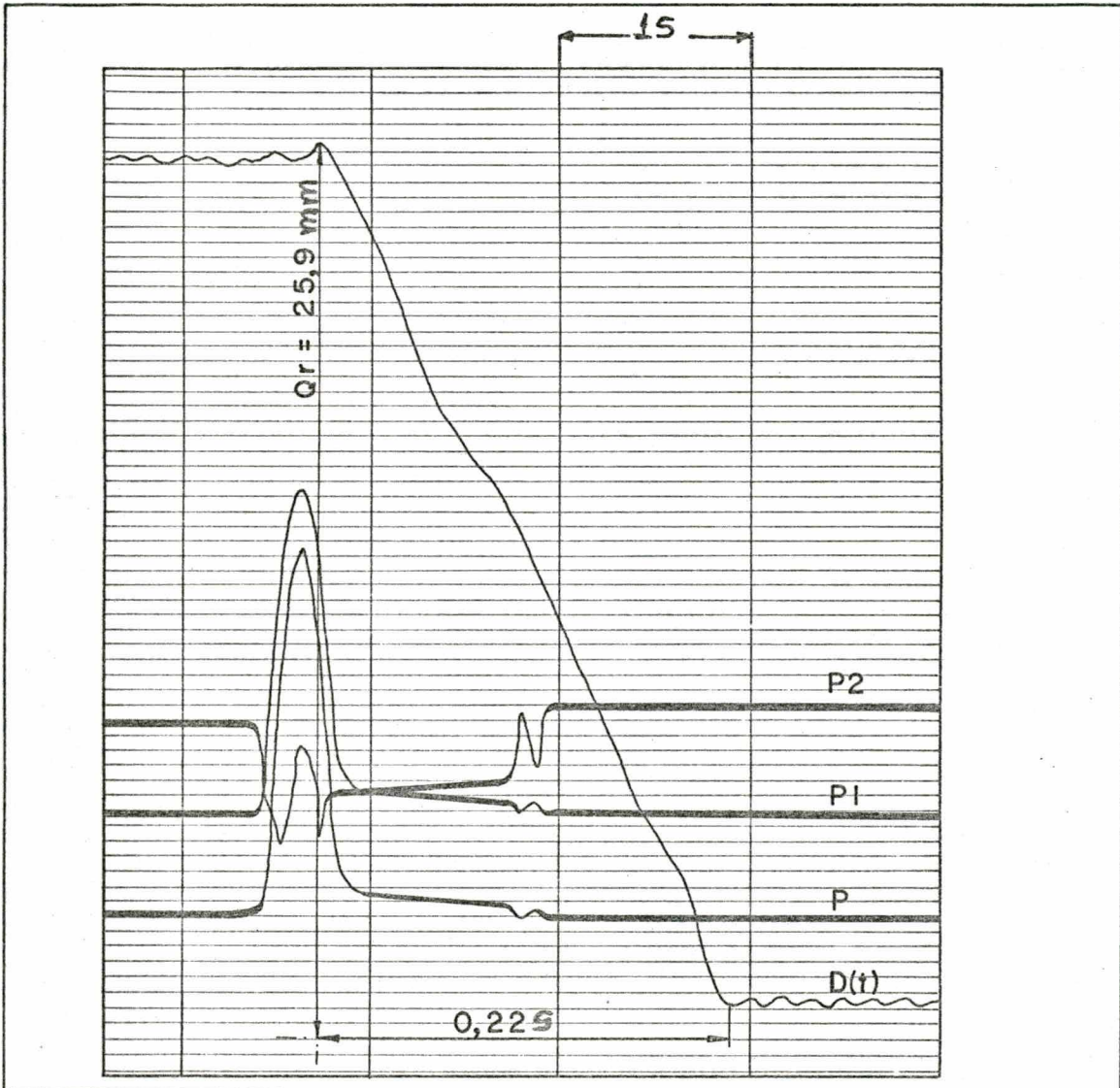


Fig. 52 :

Registro gráfico de forças e deslocamento no oscilógrafo (U. V. Recorder)

Material: Alumínio — Bilete : (B)

FORJAMENTO EM MATRIZ

Ensaio experimental

Condições de ensaio

- Data : 20/05/76
- Material : Alumínio
- Lubrificante : Molykote "HTF"
- Temp. de forjamento : 400°C
- Bilete : (D)

Diâmetro : 25.30 mm

Comprimento : 50.60 mm

Volume : 25420 mm³

Altura do forjado : 24.60 mm

Altura da recalçada : 26.00 mm

Largura da rebarba : 2.8 mm

Altura da rebarba : 0.9 mm

Resultados obtidos

- Forças :

Força total : 54.0 (tf)

Força principal : 48.5 (tf)

Força da rebarba : 6.3 (tf)

- Velocidade de conformação : 123.80 mm/s.

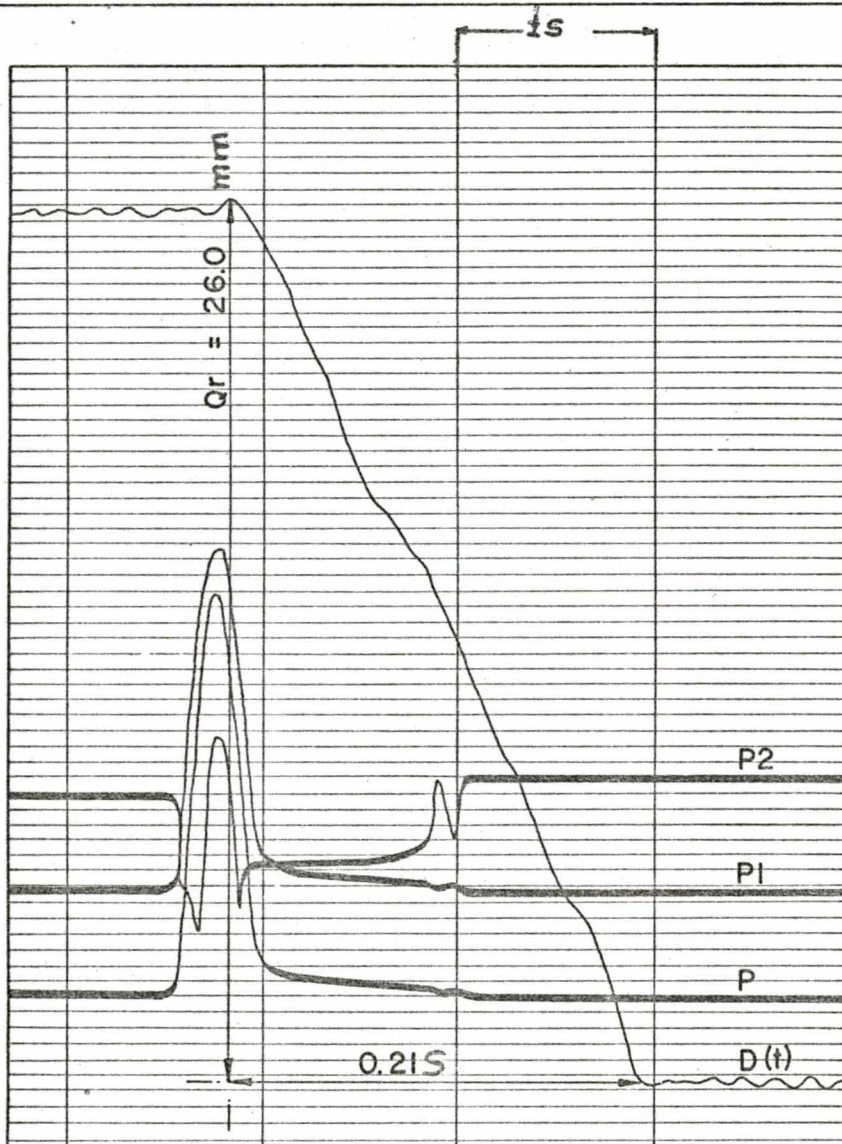


Fig. 53:

Registro gráfico de força e deslocamento no oscilógrafo. (U.V. Recorder)
 Material: Alumínio - Bilete: (D)

FORJAMENTO EM MATRIZ

Ensaio experimental

Condições de ensaio

- Data : 20/05/76
- Material : Alumínio
- Lubrificante : Molykote "HTF"
- Temp. de forjamento : 400°C
- Bilete : (F)

Diâmetro : 25.30 mm

Comprimento : 50.60 mm

Volume : 25420 mm³

Altura do corpo forjado : 24.70 mm

Altura do recalçada : 25,90 mm

Largura da rebarba : 2.9 mm

Altura da rebarba : 0.8 mm

Resultados obtidos

- Forças :

Força total : 56.0 (tf)

Força principal : 48.5 (tf)

Força da rebarba : 6.65 (tf)

- Velocidade de conformação : 117.27 mm/s

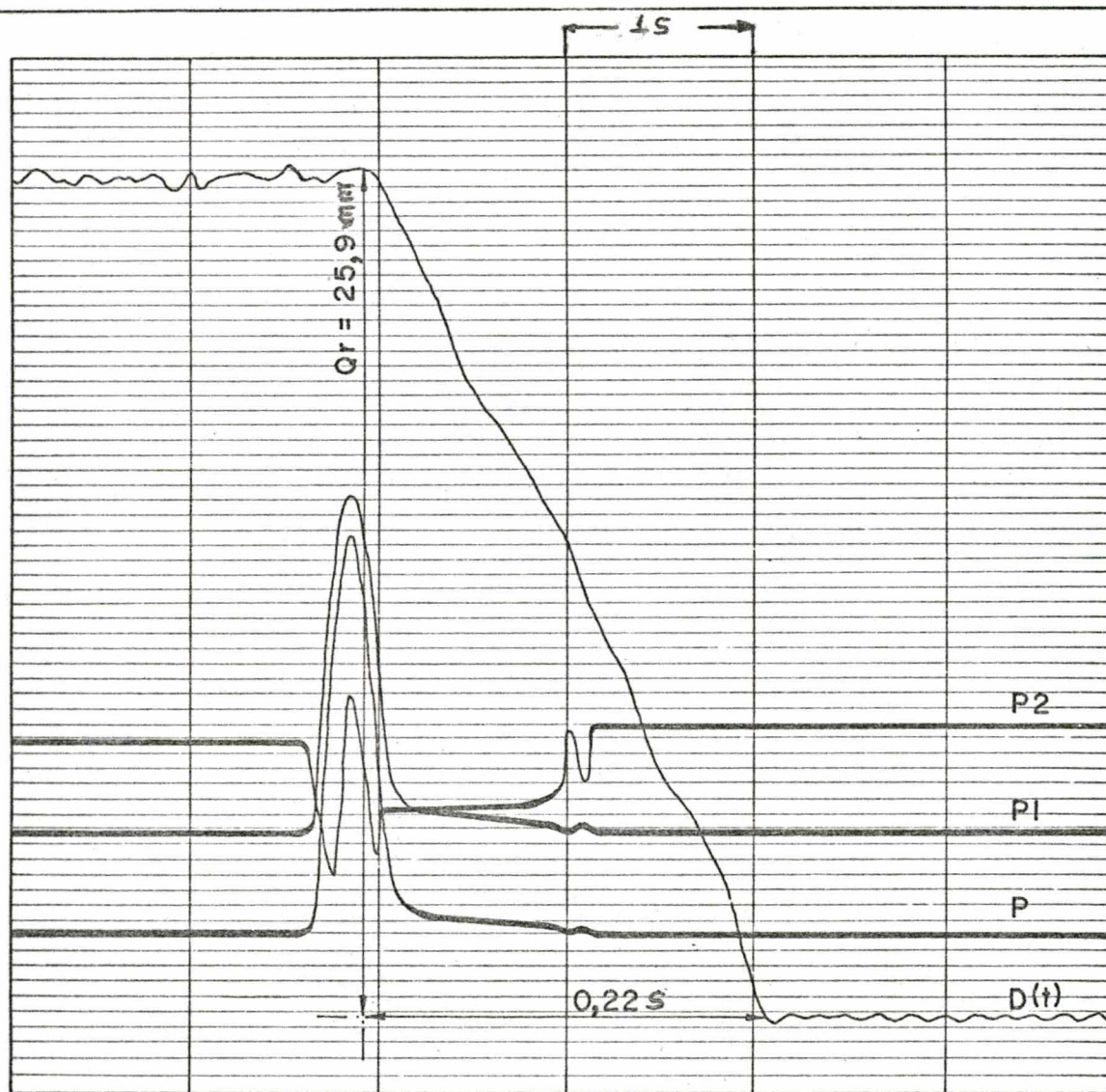


Fig. 54 :
 Registro gráfico de forças e deslocamento no oscilógrafo (U. V. Recorder)
 Material: Alumínio — Bilete: (F)

FORJAMENTO EM MATRIZ

Ensaio experimental

Condições de ensaio

- Data : 20/05/76
- Material : Alumínio
- Lubrificante : Molykote "HTF"
- Temp. de forjamento : 400°C
- Bilete : (AB)

Diâmetro : 25.30 mm

Comprimento : 50.60 mm

Volume : 25420 mm³

Altura do corpo forjado : 24,80 mm

Altura da cabeça recalçada : 25.80 mm

Largura da rebarba : 2.0 mm

Altura da rebarba : 0.8 mm

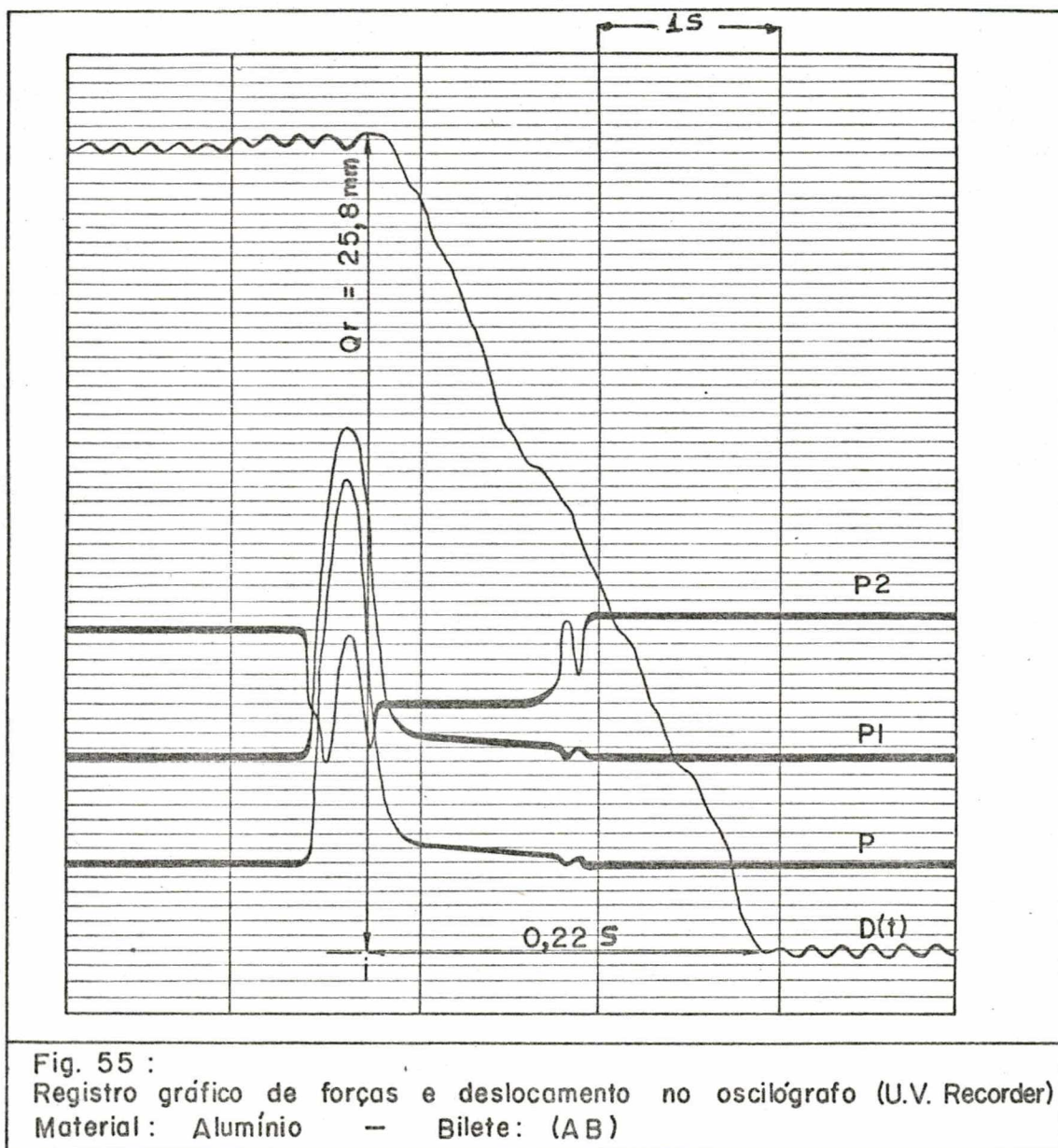
Resultados obtidos- Forças :

Força total : 54.0 (tf)

Força principal : 51.0 (tf)

Força da rebarba : 4.5 (tf)

- Velocidade de conformação : 117.27 mm/s



FORJAMENTO EM MATRIZ

Ensaio experimental

Condições de ensaio

- Data : 20/05/76
- Material : Alumínio
- Lubrificante : Molykote "HTF"
- Temperatura de forjamento : 400°C
- Bilete : (AC)

Diâmetro : 25.30 mm

Comprimento : 50.60 mm

Volume : 25420 mm³

Altura da peça forjada : 24.70 mm

Altura da peça recalçada : 25.90 mm

Largura da rebarba : 3.2 mm

Altura da rebarba : 0.8 mm

Resultados obtidos

- Forças :

Força total : 57.5 (tf)

Força principal : 48.5 (tf)

Força da rebarba : 7.85 (tf)

- Velocidade de conformação : 123.33 mm/s

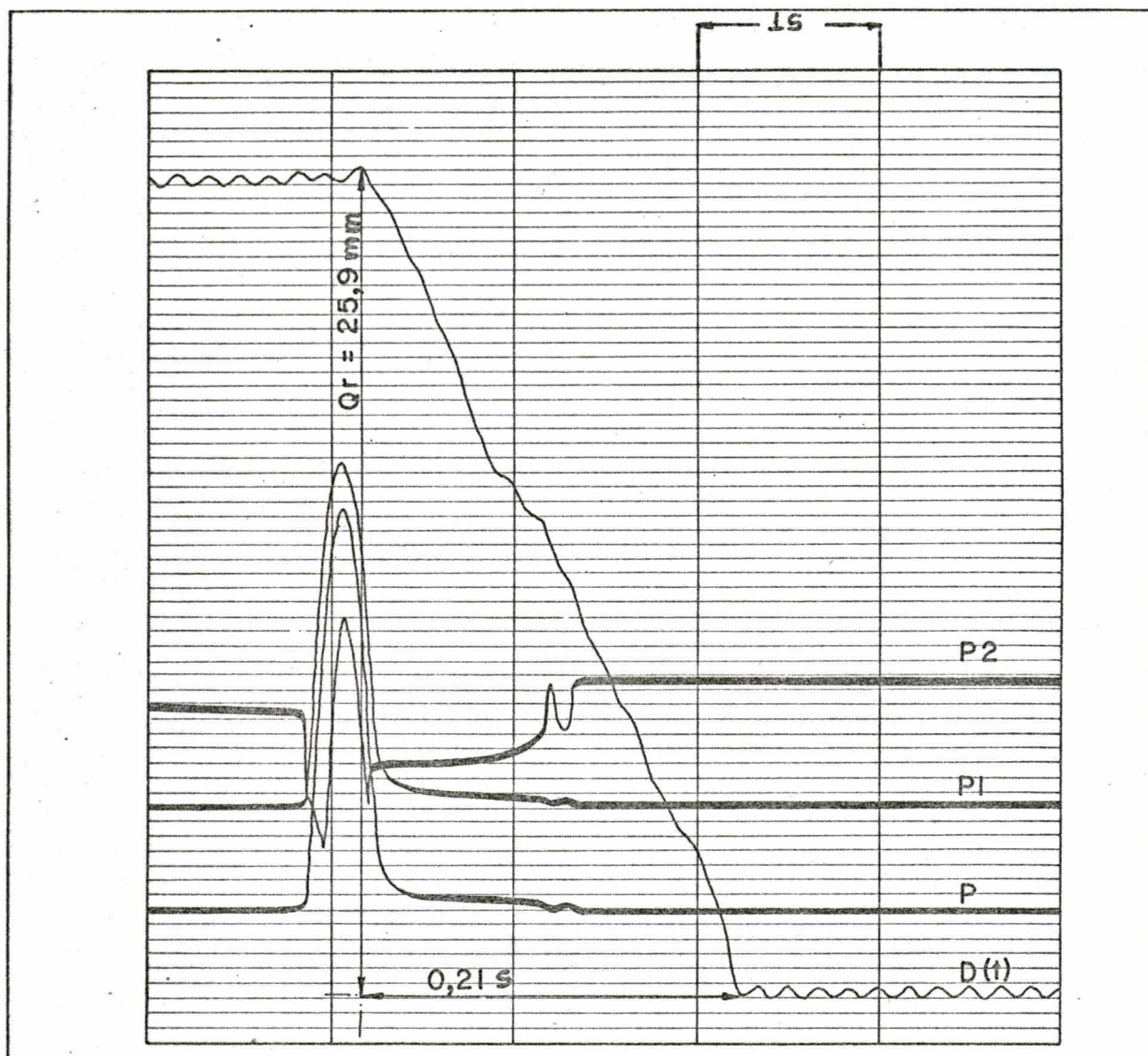


Fig. 56:
 Registro gráfico de força e deslocamento no oscilógrafo. (U.V. Recorder)
 Material : Alumínio - Bilete : (A C)

FORJAMENTO EM MATRIZ

Resultados obtidos

- Quadro dos valores da Força Total - Largura da Rebarba

BILETE	FORÇA TOTAL (P) (tf)	LARGURA DA REBARBA (b) (mm)
A	47.5	0.8
B	50.5	2.2
D	54.0	2.8
F	56.0	2.9
AB	54.0	2.0
AC	57.5	3.2

QUADRO 10

- Quadro dos valores da Força da Rebarba - Largura da Rebarba

BILETE	FORÇA DA REBARBA(P ₂) (tf)	LARGURA DA REBARBA(b) (mm)
A	0	0.8
B	4.0	2.2
D	6.3	2.8
F	6.65	2.9
AB	4.5	2.0
AC	7.85	3.2

QUADRO 11

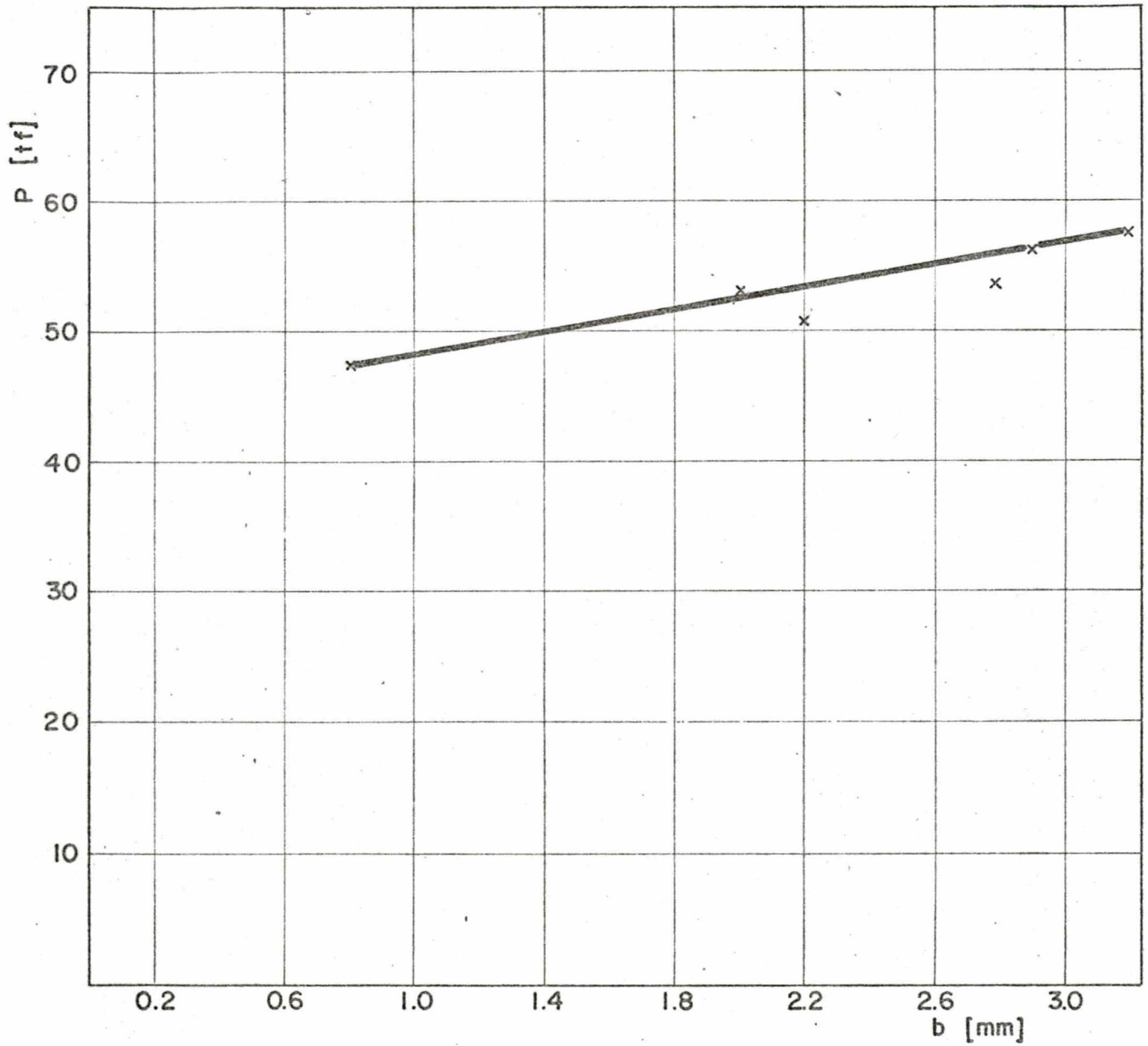


Fig. 57 - Traçado da curva FORÇA TOTAL - LARGURA DA REBARBA.

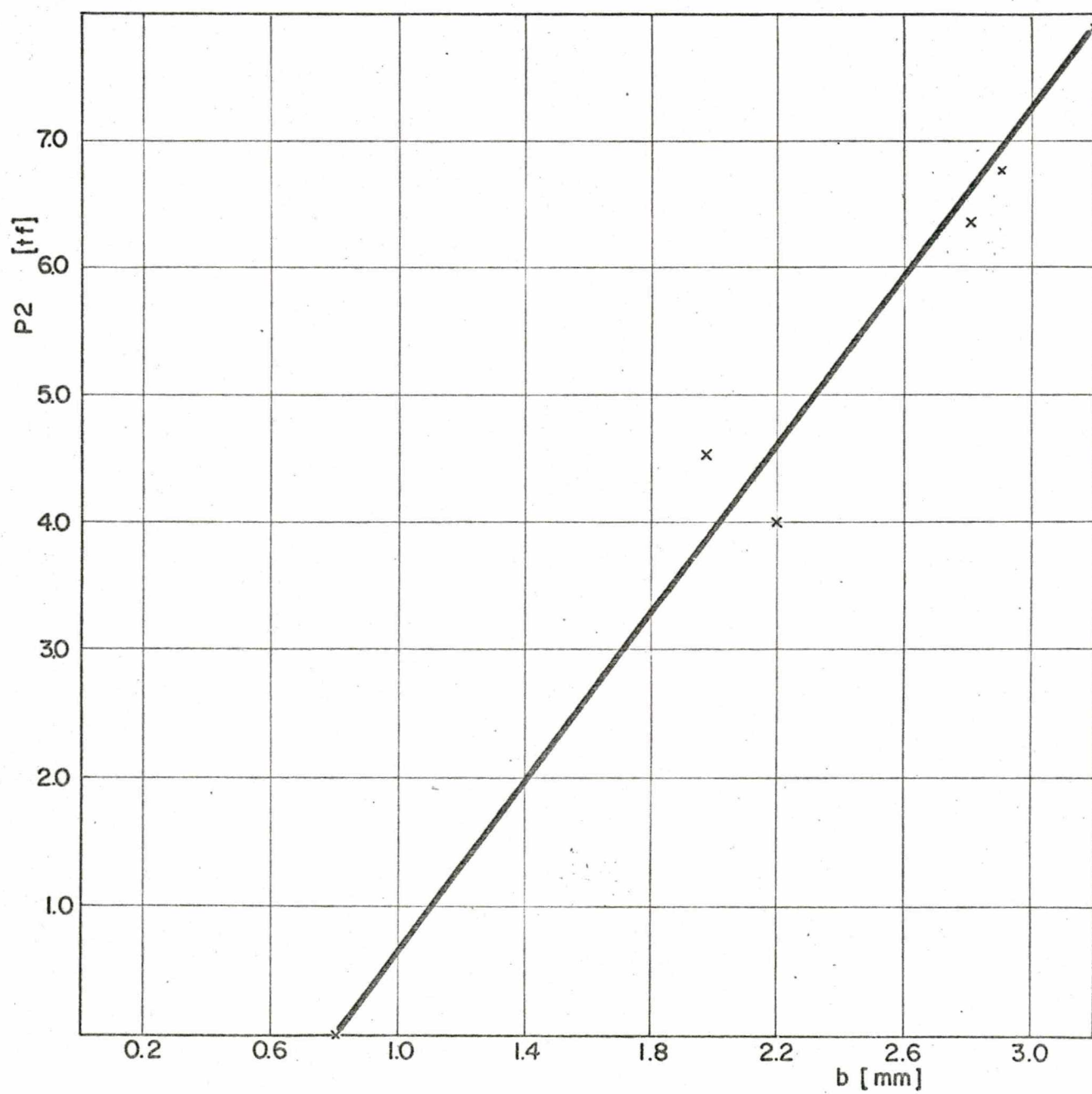


Fig. 58 - Traçado da curva FORÇA DA REBARBA - LARGURA DA REBARBA.

CAPÍTULO V

5 - DISCUSSÃO DOS RESULTADOS, CONCLUSÕES E SUGESTÕES.

5.1 - Discussão dos resultados e conclusões

Neste capítulo, os resultados obtidos experimentalmente são comparados com os valores que se obteve pelo emprego das formulações teóricas apresentadas no Capítulo 2, na medição das forças no forjamento.

Com tal finalidade, é apresentado o Quadro 12. No referido quadro se encontram os valores obtidos experimentalmente nos diversos ensaios e os calculados teoricamente.

O valor do coeficiente de atrito μ , selecionado para compor as formulações teóricas é de 0.15 (Ref. 5).

Devido às ligeiras variações de dimensão apresentadas// pelos forjados, seria necessário que se escolhesse um valor de K_f para cada forjado (função do grau de recalque, temperatura de forjamento e da velocidade de conformação), afim de se reproduzir as formulações teóricas propostas. Ocorre que as condições de ensaio foram as mesmas (temperatura de forjamento = 400°C), com leve variação do grau de recalque e velocidade de conformação de um forjado para outro, conforme observação no Quadro 09, o que exigiu a adoção de um único valor de K_f no tratamento dos billetes. Este valor é de 85 MN/m² (Ref. 10)

As equações usadas para comparação foram as seguintes :

- a) equações (01), (02) e (04) (GELEJI³);
- b) equações (05) e (06) (solução limite superior⁴).

A equação (01), que permite o cálculo da força pura de conformação (componente P_1), apresentou resultados inferiores aos

obtidos experimentalmente, sendo que para os forjados B, D, F e AC os mesmos se situaram bem próximos aos valores medidos; para os forjados A e AB, os resultados já se distanciaram razoavelmente.

A equação (02), que permite o cálculo da força na rebarba (componente P_2), apresentou resultados inferiores aos obtidos experimentalmente, porém com valores totalmente discrepantes.

As equações (05) e (06), que permitem o cálculo da força final máxima de conformação, apresentaram valores superiores aos obtidos experimentalmente, e com resultados bem distanciados dos valores obtidos na prática, sendo que a equação (06), obviamente apresentou valores mais próximos dos valores experimentais.

Assim, de uma maneira geral, pode-se concluir que:

A equação (01), foi reproduzida de maneira satisfatória, conforme mostra o Quadro 12;

Não se conseguiu reproduzir a equação (02);

A equação (04), segundo GELEJI³, que permite o cálculo da força total de conformação, forneceu resultados bem mais próximos dos valores obtidos na prática do que os devidos à solução limite superior⁴, o que já era esperado, pois a solução limite superior prevê o maior valor de força que deverá ocorrer no processo;

A verificação do equilíbrio estático entre as forças P , P_1 e P_2 , de sorte a se ter $P = P_1 + P_2$ teve relativo sucesso conforme mostra o Quadro 13;

Na observação dos Quadros 09 e 12 pode-se ver que os menores e maiores valores de força aconteceram para os forjados A e AC, respectivamente, o que realmente era esperado pelas previsões das formulações teóricas abordadas. Estas ocorrências se explicam da seguinte maneira:

Ao utilizar-se a teoria de GELEJI³, vê-se que a força / ura de conformação (Força P_1) está associada à velocidade de con -

formação por intermédio da equação (01), a qual mostra que a uma maior velocidade de conformação corresponderá um maior valor de força, e vice-versa.

Utilizando-se a solução limite superior⁴ vê-se que a força de conformação está associada à relação b/h_2 através das equações (05) e (06), sendo que para os forjados acima mencionados se verificaram a menor e maior relação obtida, respectivamente.

Na observação dos gráficos registrados no oscilógrafo, para os valores de forças no forjamento, pode-se ver que o sinal de tensão correspondente à força na rebarba (Força P_2), se inicia com uma queda de tensão; a seguir tem seu sinal invertido, para em seguida ter seu pico máximo. Este fato se explica da seguinte forma:

Ao dar-se o impacto, o estampo (1) comprime o disco / guia (6) que tende a arrastar consigo o anel dinamométrico (4), o qual se encontra preso ao mesmo por meio de parafusos. Como o anel dinamométrico (4) tem seu movimento impedido pelos pinos de fixação (3), pinos de união entre o mesmo e a bucha do estampo (2), fica então tracionado, dando origem no gráfico correspondente ao sinal de tensão trativa.

FORJADO	VALORES MEDIDOS			VALORES CALCULADOS				
	P ₁ (kgf)	P (kgf)	P ₂ (kgf)	P ₁ (kgf)	P (kgf)	P ₂ (kgf)	P _{mm} (kgf)	P _{mt} (kgf)
A	47500	47500	0	34086	34205	118	39995	35183
B	46500	50500	4000	44881	45329	447	64588	57343
D	48500	54000	6300	46271	46882	610	65181	58134
F	48500	56000	6680	53981	54661	680	81523	72625
AB	51000	54000	4500	42163	42542	379	59755	52982
AC	48500	57500	7850	58969	59776	807	89148	79542

QUADRO 12

RESULTADOS OBTIDOS NOS ENSAIOS PARA VALORES DE FOR
ÇAS NO FORJAMENTO

FORJADO	P (kgf)	P ₁ (kgf)	P ₂ (kgf)	△ (kgf)
A	47500	47500	0	0
B	50500	46500	4000	0
D	54000	48500	6300	800
F	56000	48500	6650	850
AB	54000	51000	4500	1500
AC	57500	48500	7850	1150

QUADRO 13

5.2 - Sugestões

Como sugestões para outros trabalhos experimentais / que poderiam ser desenvolvidos neste campo, citar-se-iam entre / outros:

- a) Estudo das características de lubrificação mais adequadas ao processo;
- b) Trabalho com matrizes frias no forjamento do alumínio;
- c) Medição da componente de força P_3 (03);
- d) Forjamento de aços.

Uma das dificuldades encontradas neste trabalho, na / realização dos ensaios, e que fez com que se desmontasse a ferramenta por várias vezes, foi a da penetração de material da rebarba na folga existente entre as componentes da ferramenta estampo (1) e a bucha do estampo (2). Foi necessário aumentar as condições de resistência mecânica do disco guia (6), através da colocação de inserto, aumentando com isso a região de esmagamento entre o estampo (1) e o disco guia (6), resolvendo parcialmente este / problema. Para trabalhos seguintes tornar-se-iam mais conveniente alterar o projeto da ferramenta, aumentando, com isso, ainda mais a região de esmagamento. Recomendar-se-ia, também, reestudar o sistema de resfriamento da área onde eventualmente serão colocados os extensômetros, visando com isso garantir maior constância / las condições de trabalho dos mesmos.

R E F E R E N C I A S

- [1] OSÓRIO, Alfredo do Amaral, "Matrizes fechadas para forjamento em martelos de queda". Escola Nacional de Engenharia, Rio de Janeiro (1959).
- [2] LIPPMANN, H. et al, "Grundlagen der bildsamen Formgebung". Verlag Stahleisen M. B. H., Düsseldorf (1966).
- [3] GELEJI, A., "Bildsame Formgebung der Metalle in Rechnung und Versuch", Akademie. Verlag, Berlin (1967).
- [4] LANGE, K., "Lehrbuch der Umformtechnik". Springer Verlag, Berlin (1974).
- [5] GELEJI, A., "Forge Equipment Rolling Mills and Accessories", Akademiai Klado, Budapest (1967).
- [6] BRUCHANOW, A. N. et al, "Gesensschmieden und Warmpressen". VEB Verlag Technik, Berlin (1955).
- [7] SNOEIJER, Berend, comunicação pessoal.
- [8] KOZEL, Jaroslav, comunicação pessoal.
- [9] NEUBERT, Hermann K. P., "Strain Gauges Kinds and Uses". Macmillan, London (1967).
- [10] BLASS, A., "A Finite Element Approach in Metalworking". Ph.D. Thesis, London University (1976).

APÊNDICES

RELAÇÃO DOS APÊNDICES

APÊNDICE I - Desenho da Ferramenta e Detalhes dos seus Componentes.

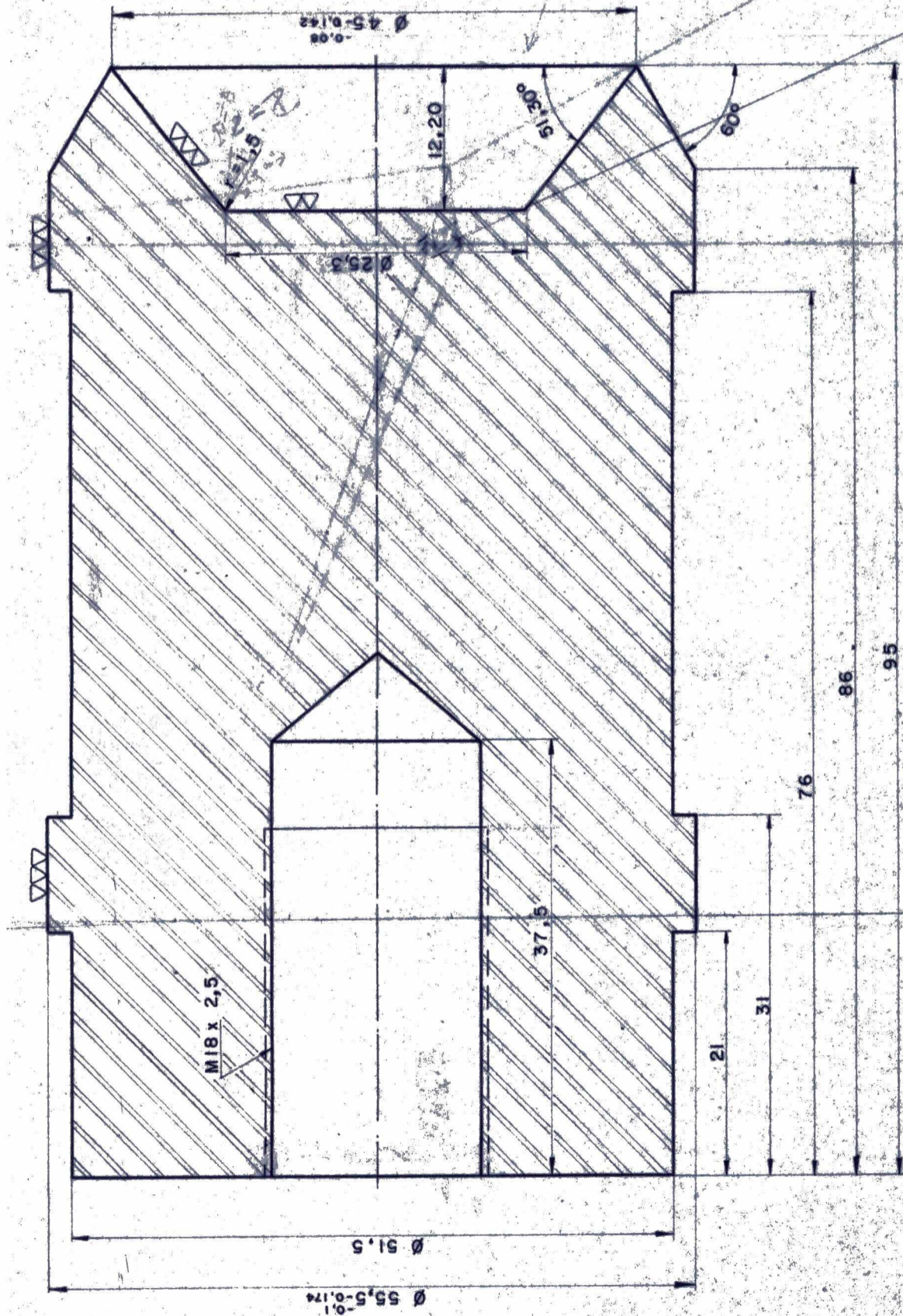
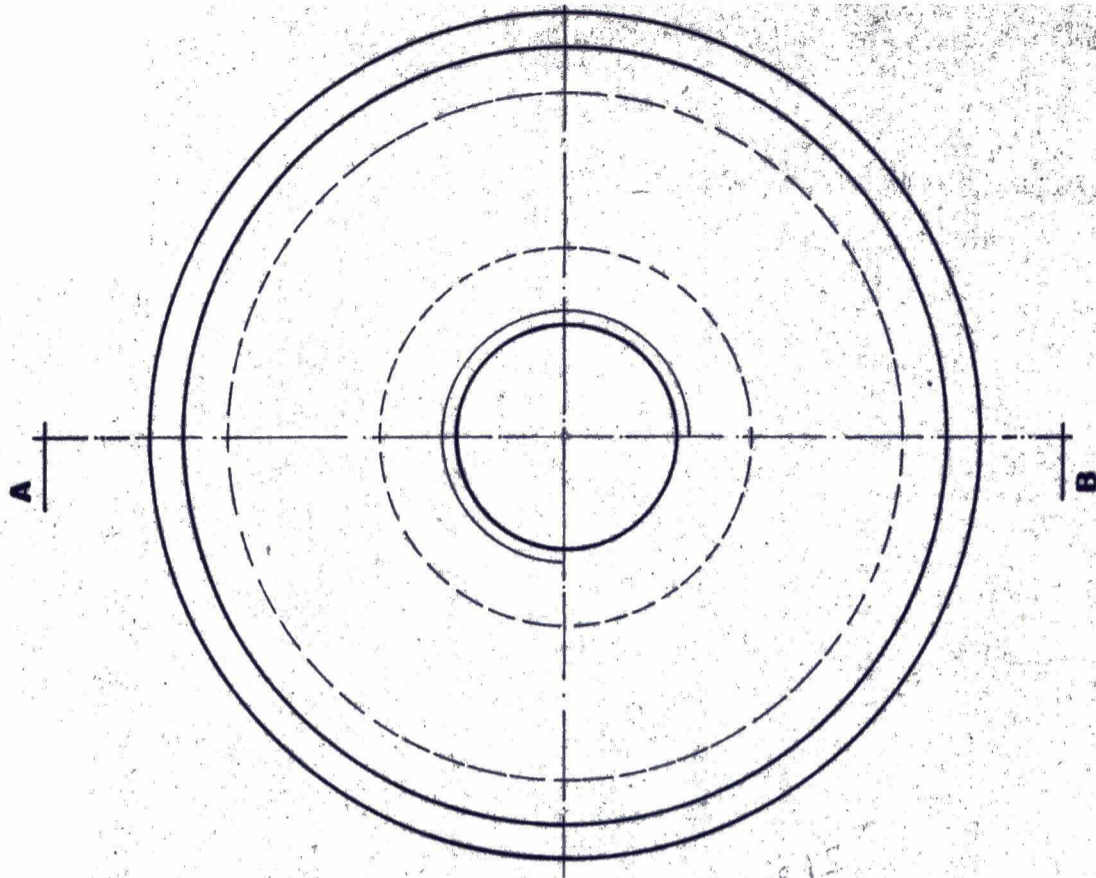
APÊNDICE II - Gráficos em degraus.

2.1 - Gráfico em degrau correspondente à Força P.

2.2 - Gráfico em degrau correspondente à Força P_1 .

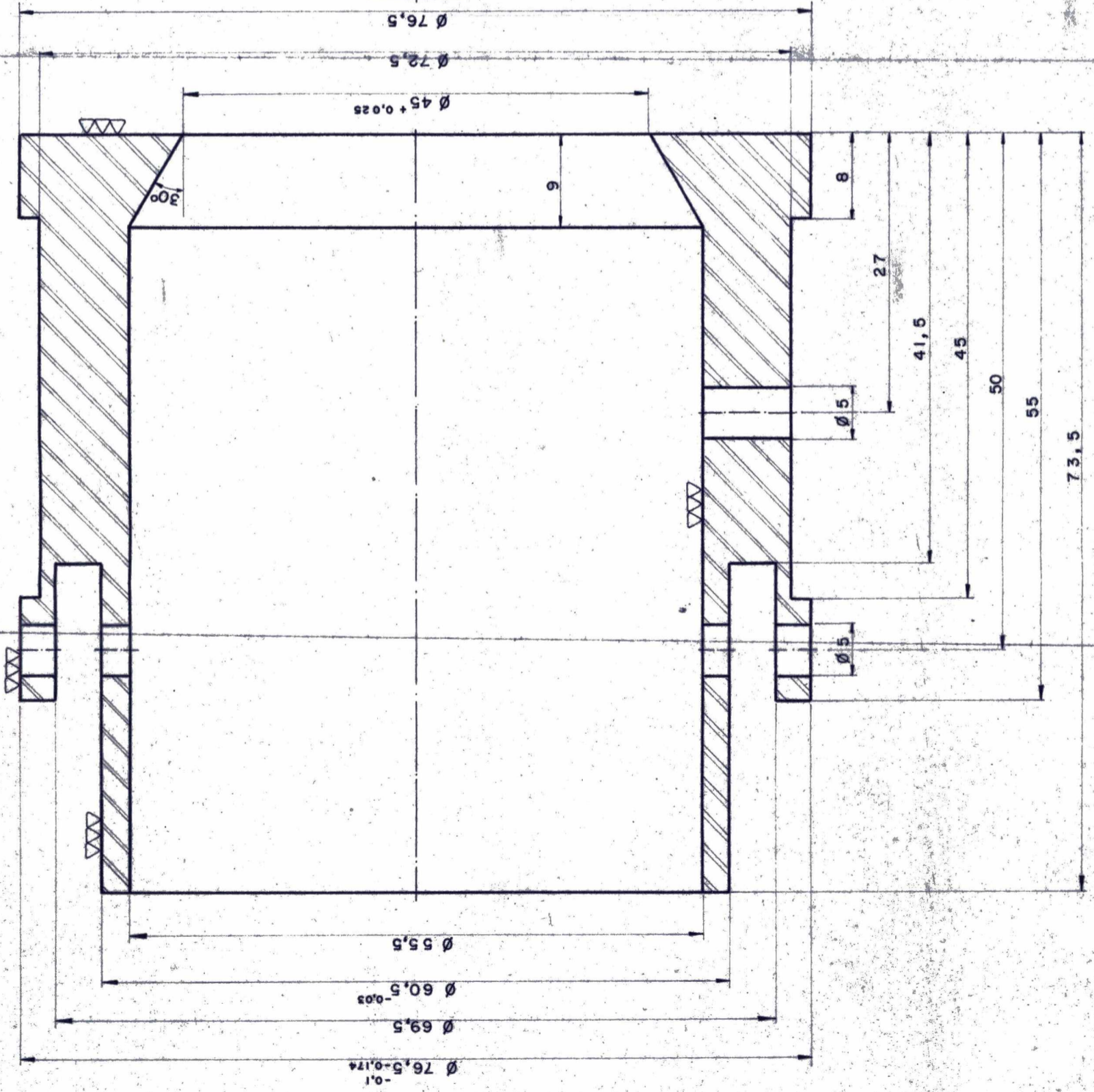
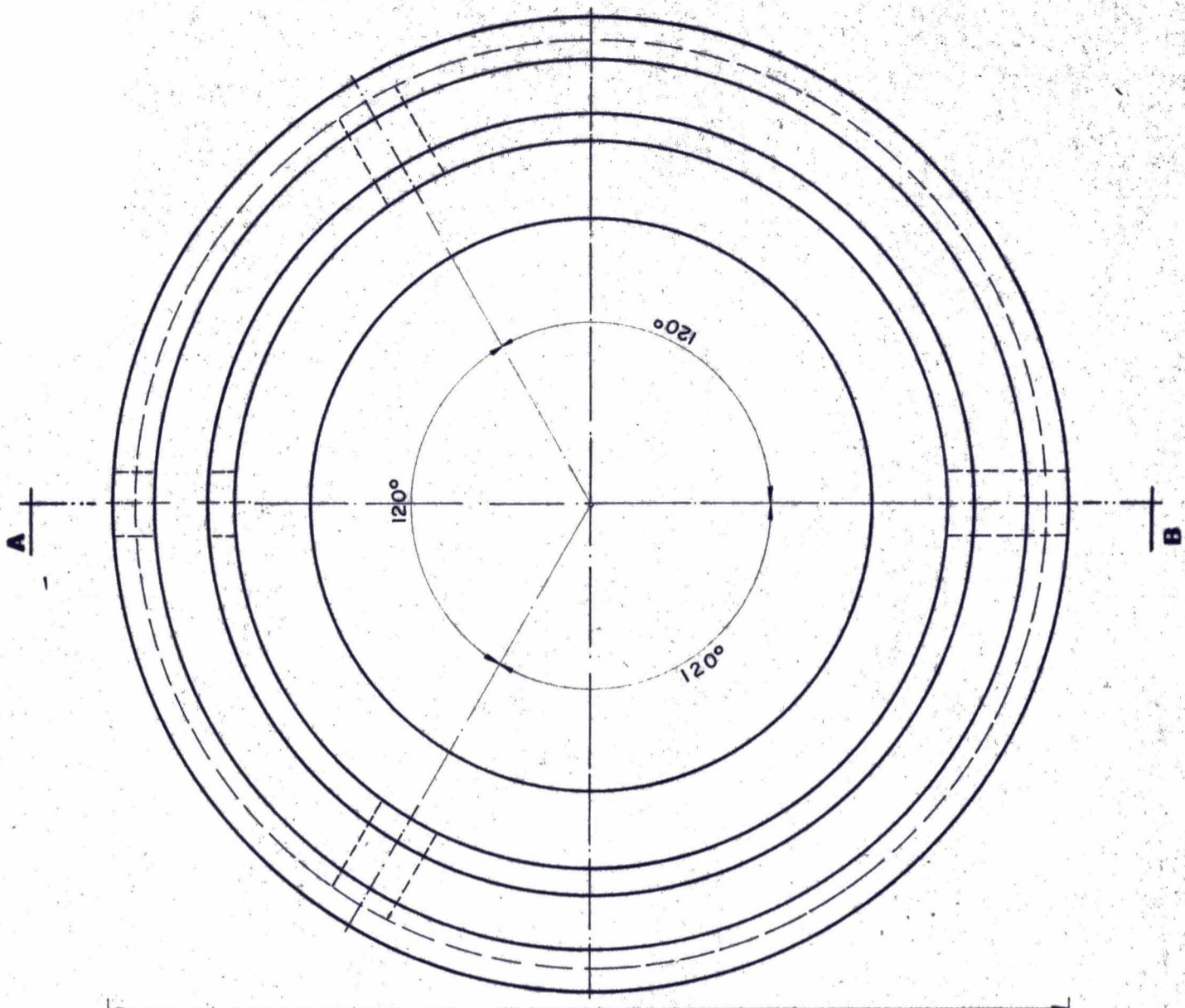
2.3 - Gráfico em degrau correspondente à Força P_2 .

A P E N D I C E I



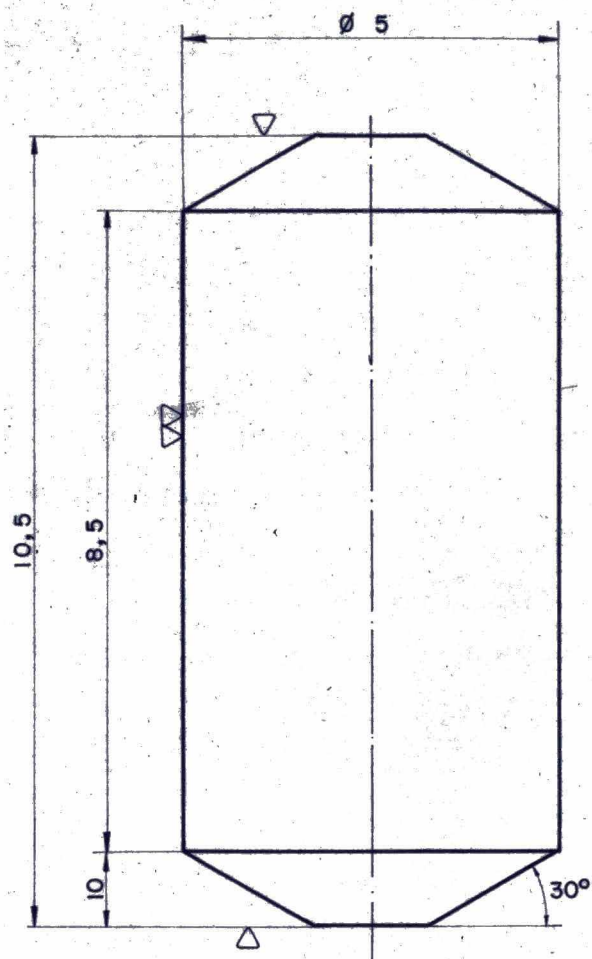
CORTE A-B

UFSC	PROJETO	ESPECIFICAÇÃO	PEÇA Nº
08/07/75	Roberval R. do S. Carvalho	Aço VCO (Temperado e Revenido)	1
DATA	DENOMINAÇÃO	ESCALA	QUANT
08/07/75	ESTAMPO	2:1	1

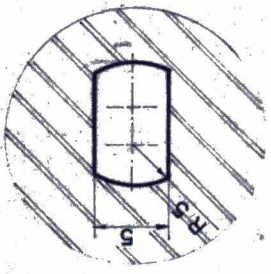
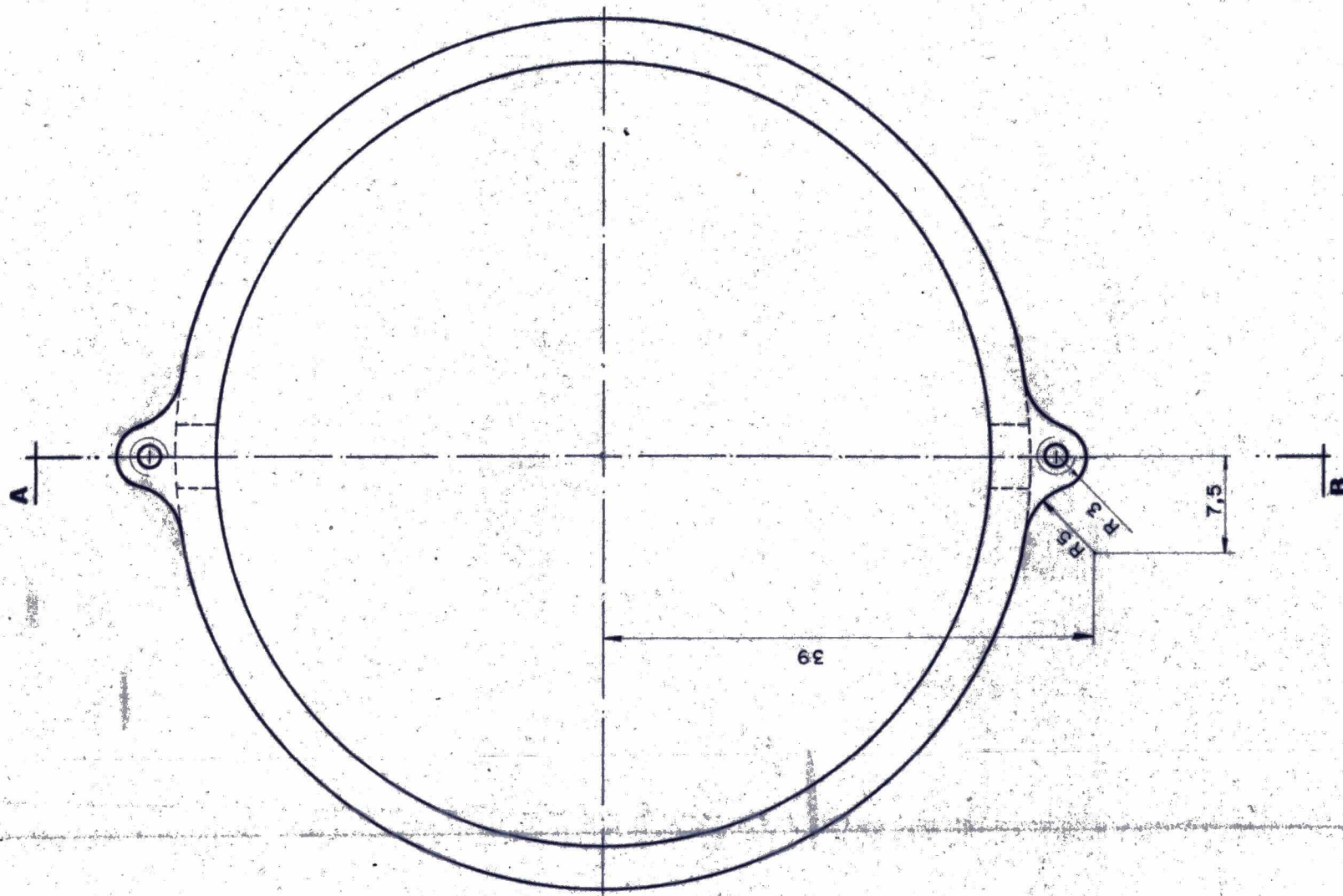


CORTE A-B

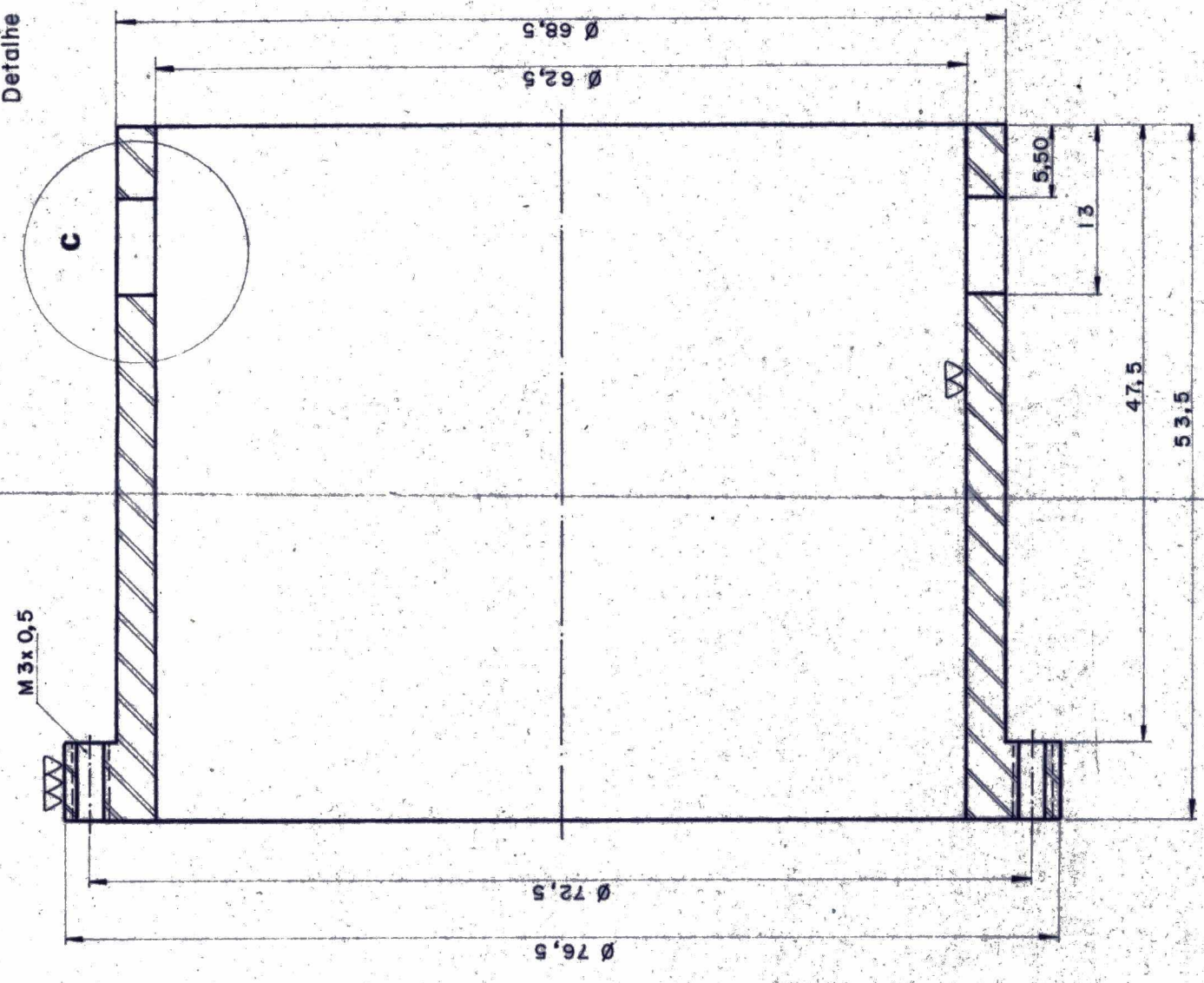
UFSC	PROJETO	ESPECIFICAÇÃO	PEÇA Nº
08/07/75	Roberval R. da S. Carvalho	Aço VCO (Temperado e Revenido)	2
	DENOMINAÇÃO	ESCALA	QUANT
	BUCHA DO ESTAMPO	2:1	1



UFSC	PROJETO Roberval R. da S. Carvalho	ESPECIFICAÇÃO Aço ABNT 1020	PEÇA Nº 3
DATA 09/07/75	DENOMINAÇÃO PINO DE FIXAÇÃO	ESCALA 10:1	QUANT. 2

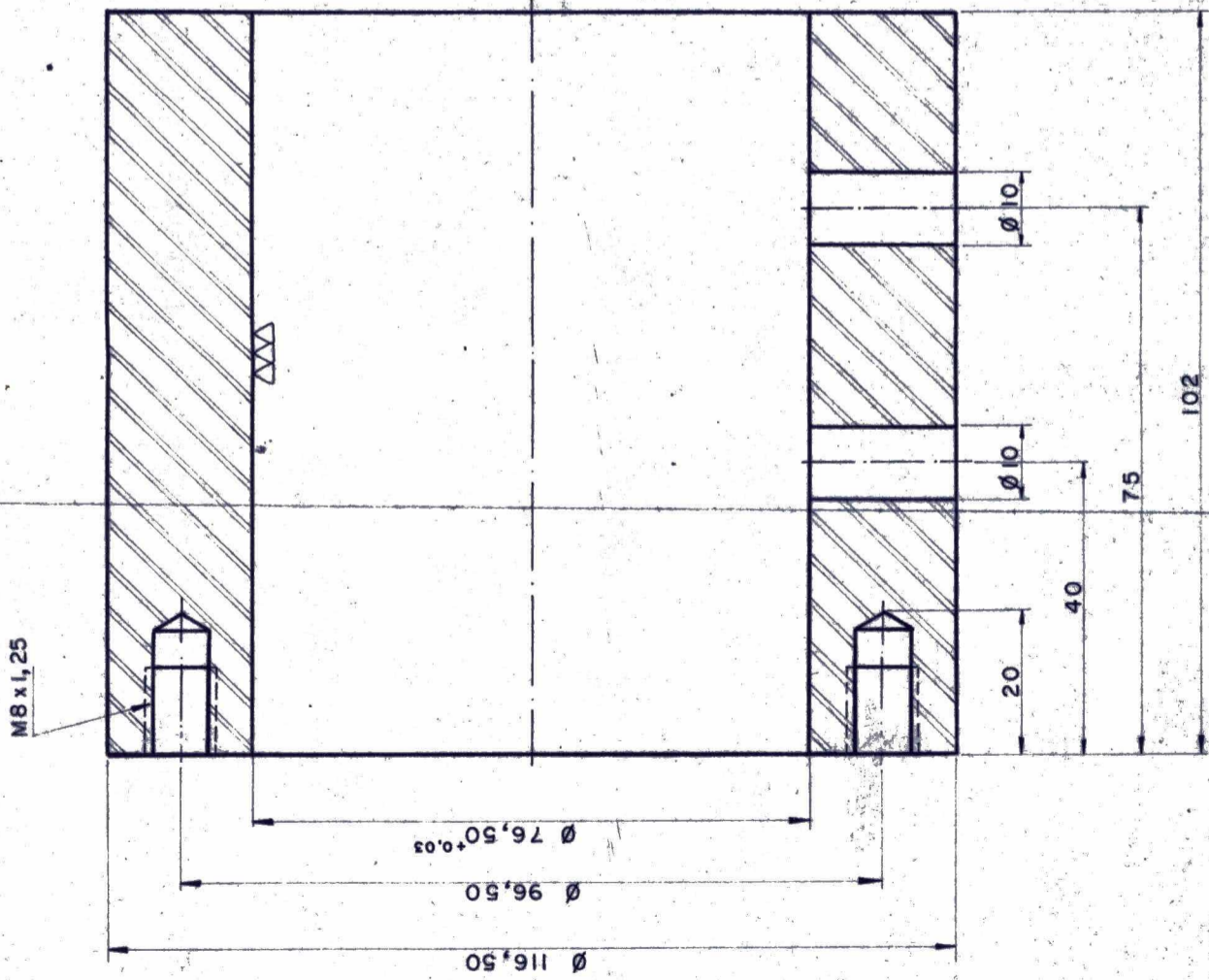
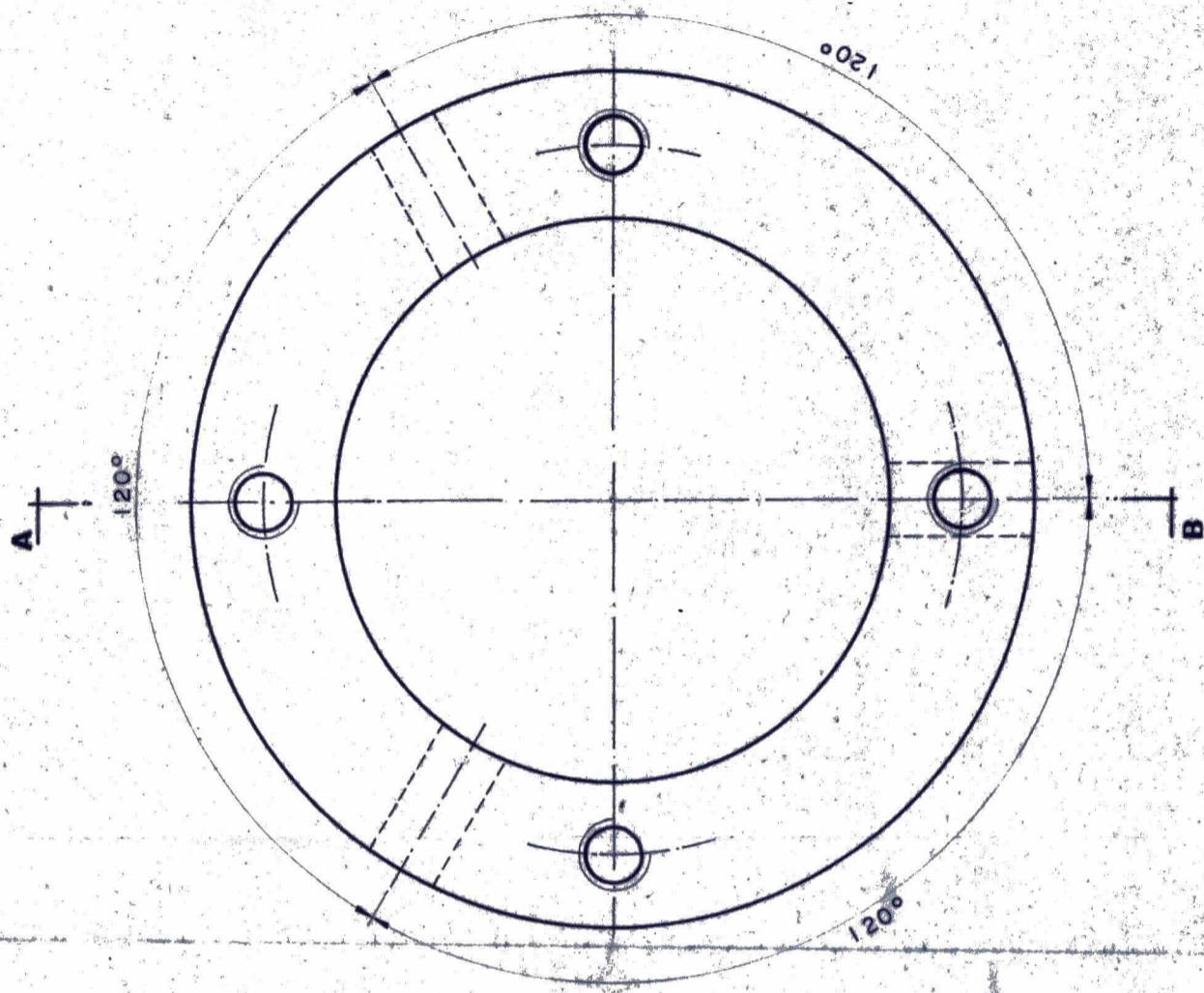


Detalhe C



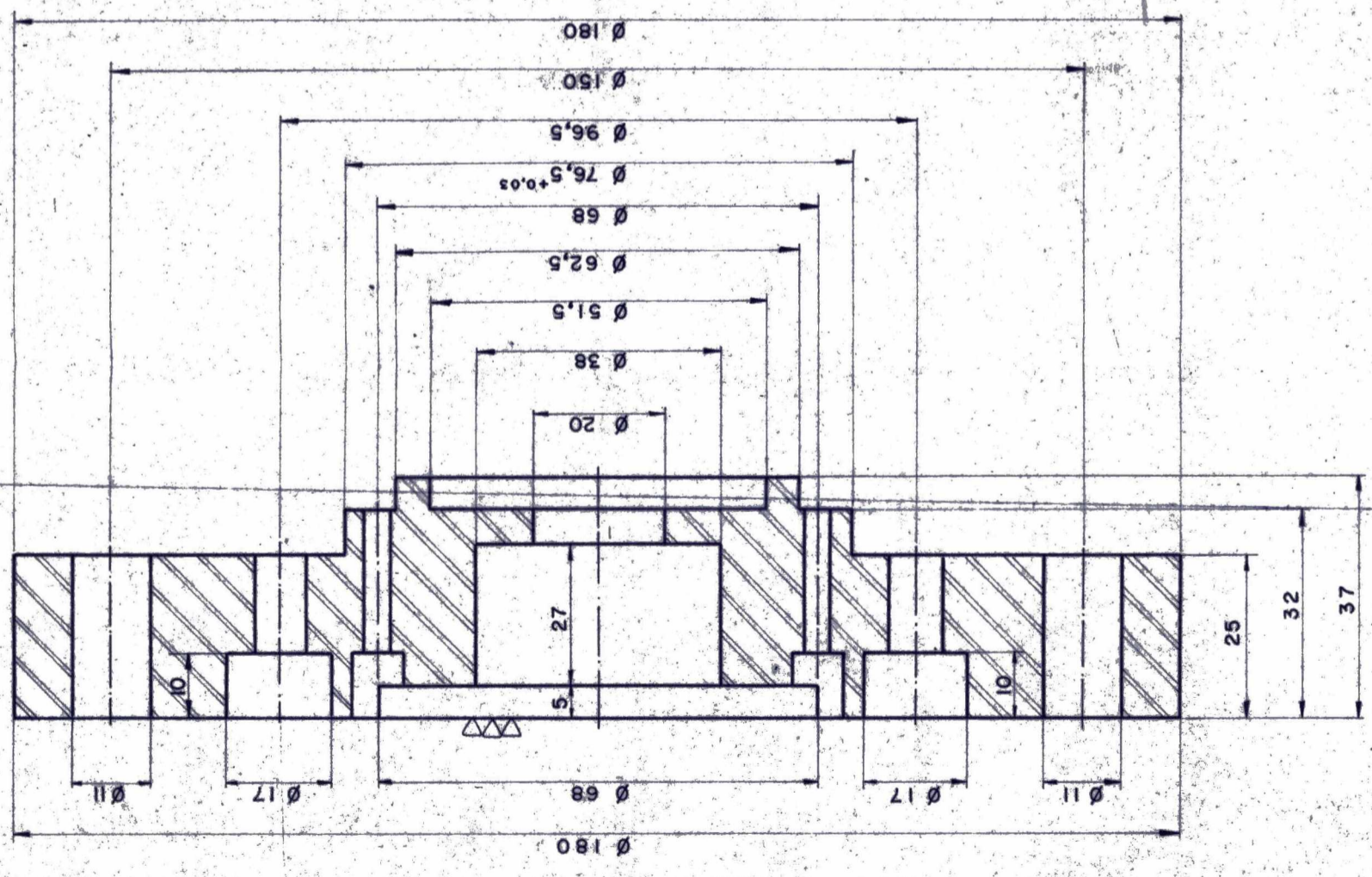
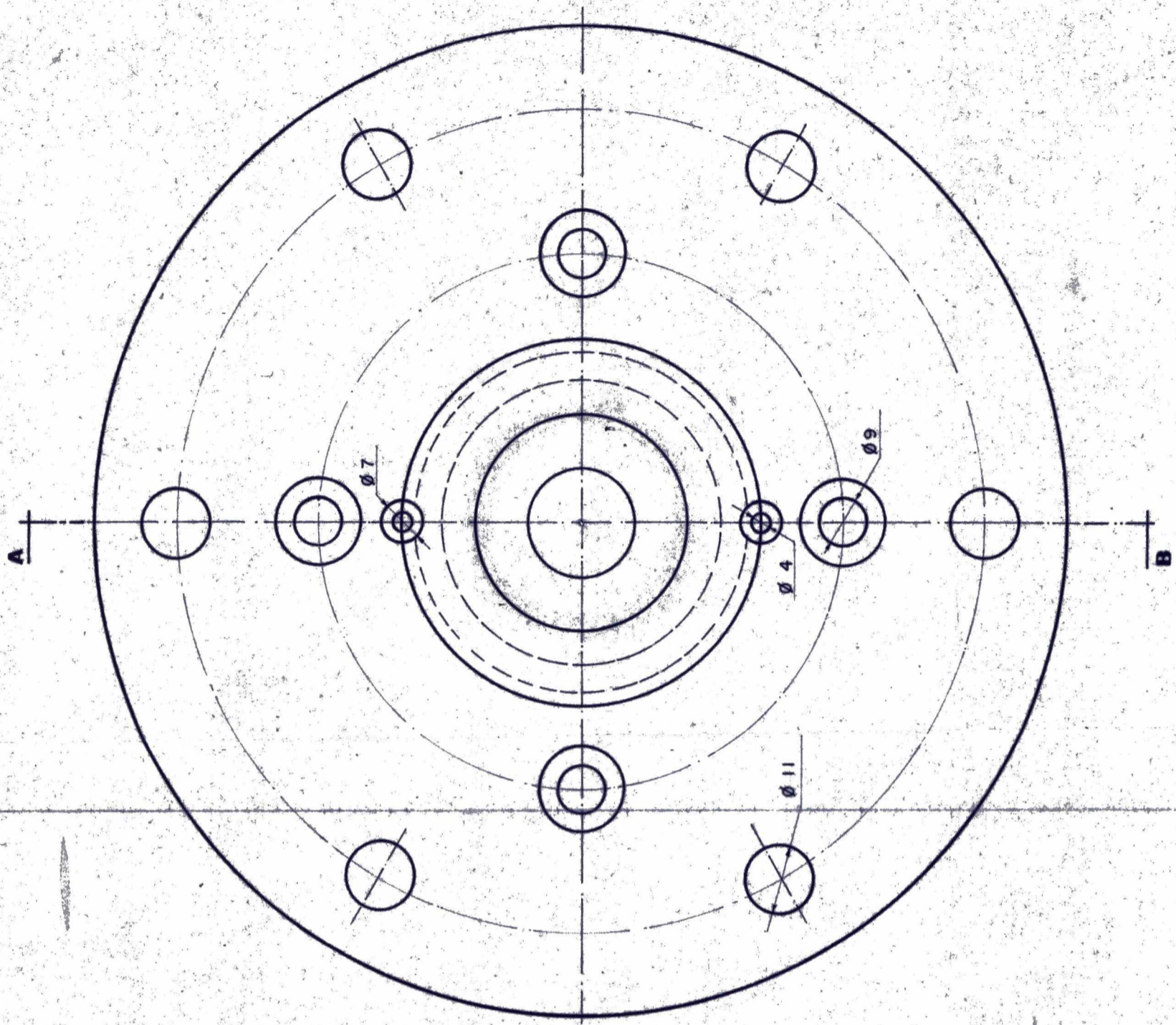
CORTE A-B

U F S C	PROJETO	ESPECIFICAÇÃO	PEÇA Nº
DATA	Roberval R. da S. Carvalho	Aço ABNT 1050 (temperado)	4
08/07/75	DENOMINAÇÃO	ANEL DINAMOMÉTRICO PARA MEDIÇÃO DA FORÇA DA REBARBA	ESCALA
			2 : 1
			QUANT.
			1

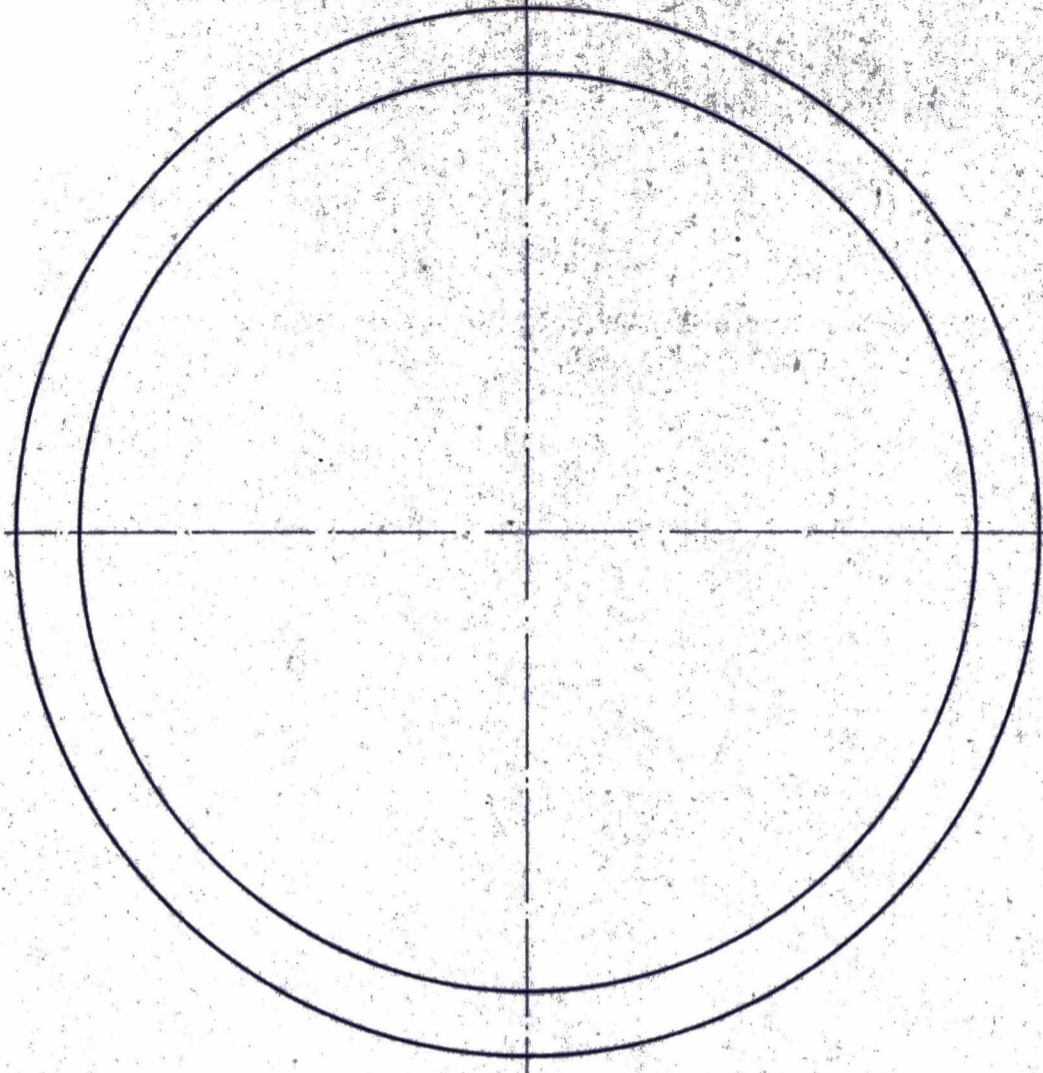
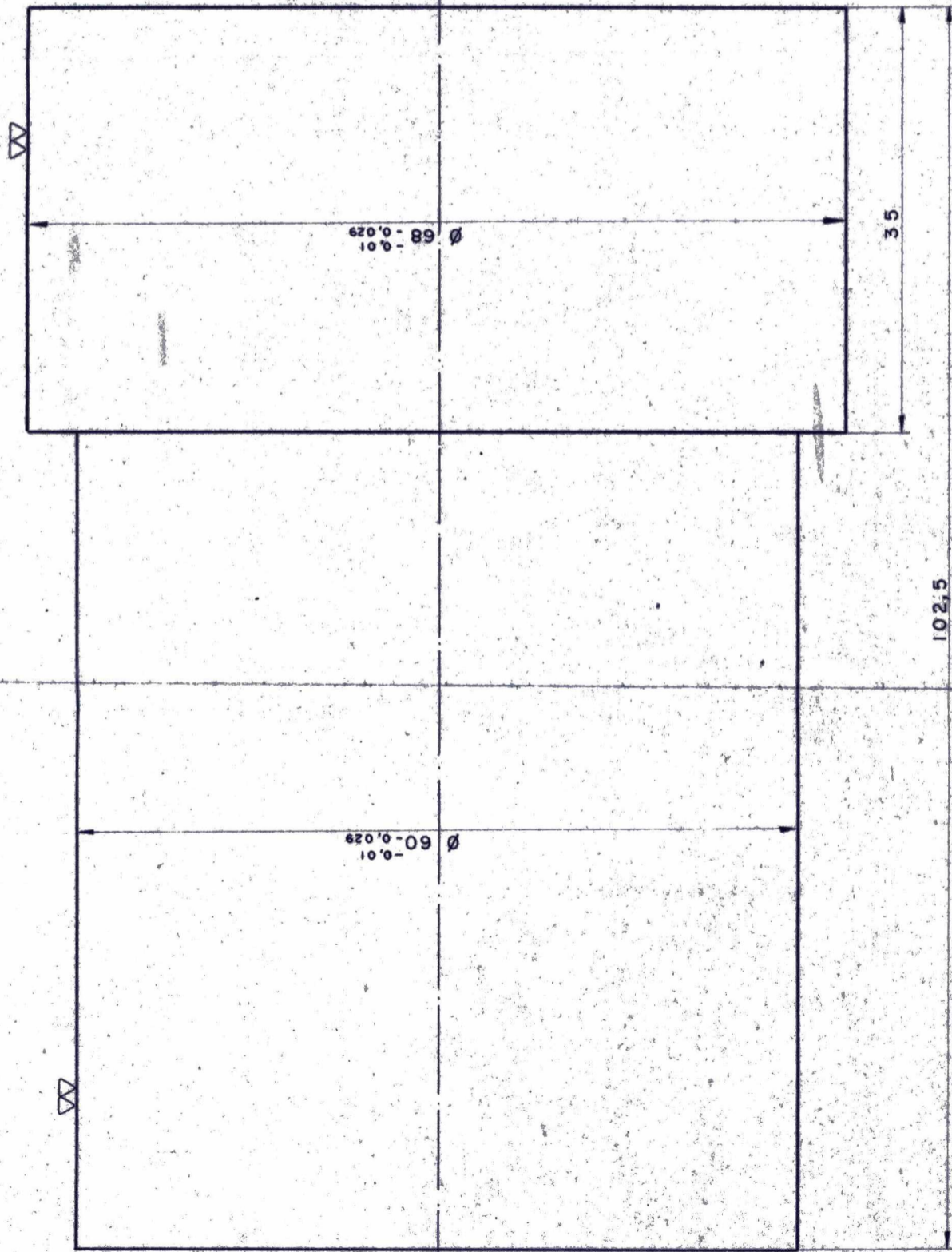


CORTE A-B

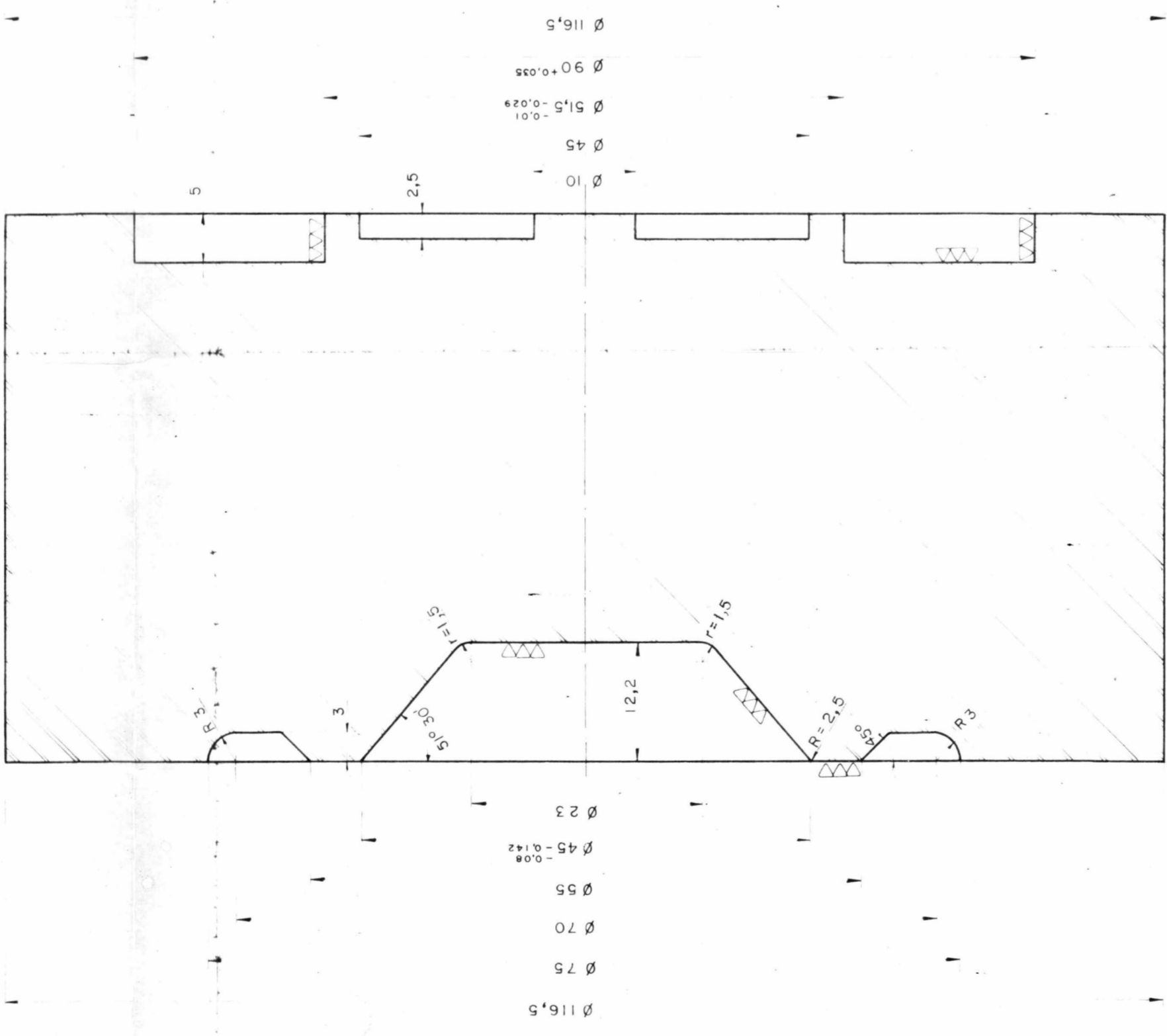
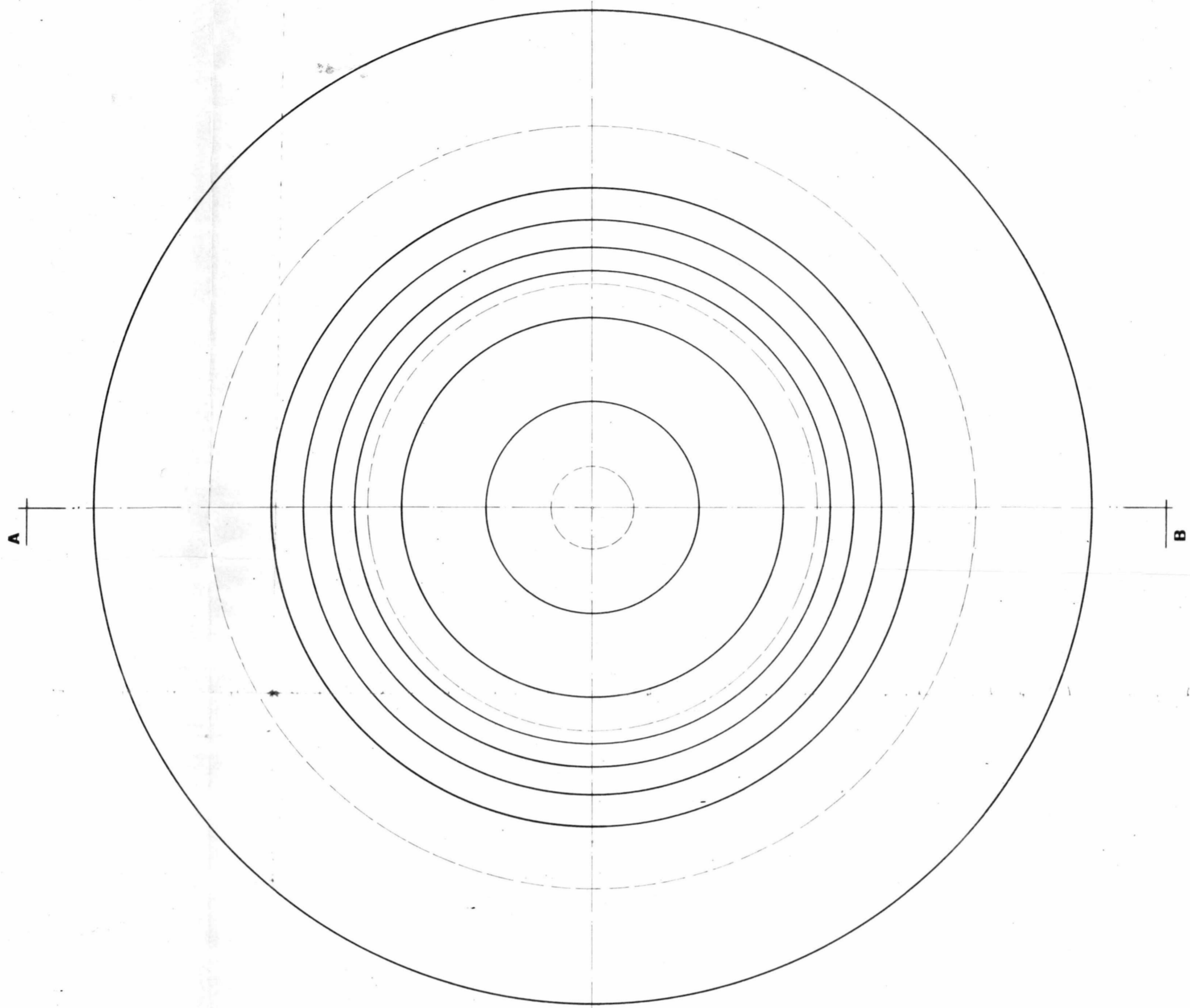
UFSC	PROJETO	ESPECIFICAÇÃO	PEÇA Nº
DATA	Roberval R. do S. Carvalho	Aço ABNT 1050	5
08/07/76	DENOMINAÇÃO	ESCALA	QUANT
	ANEL GUIA	1:1	1



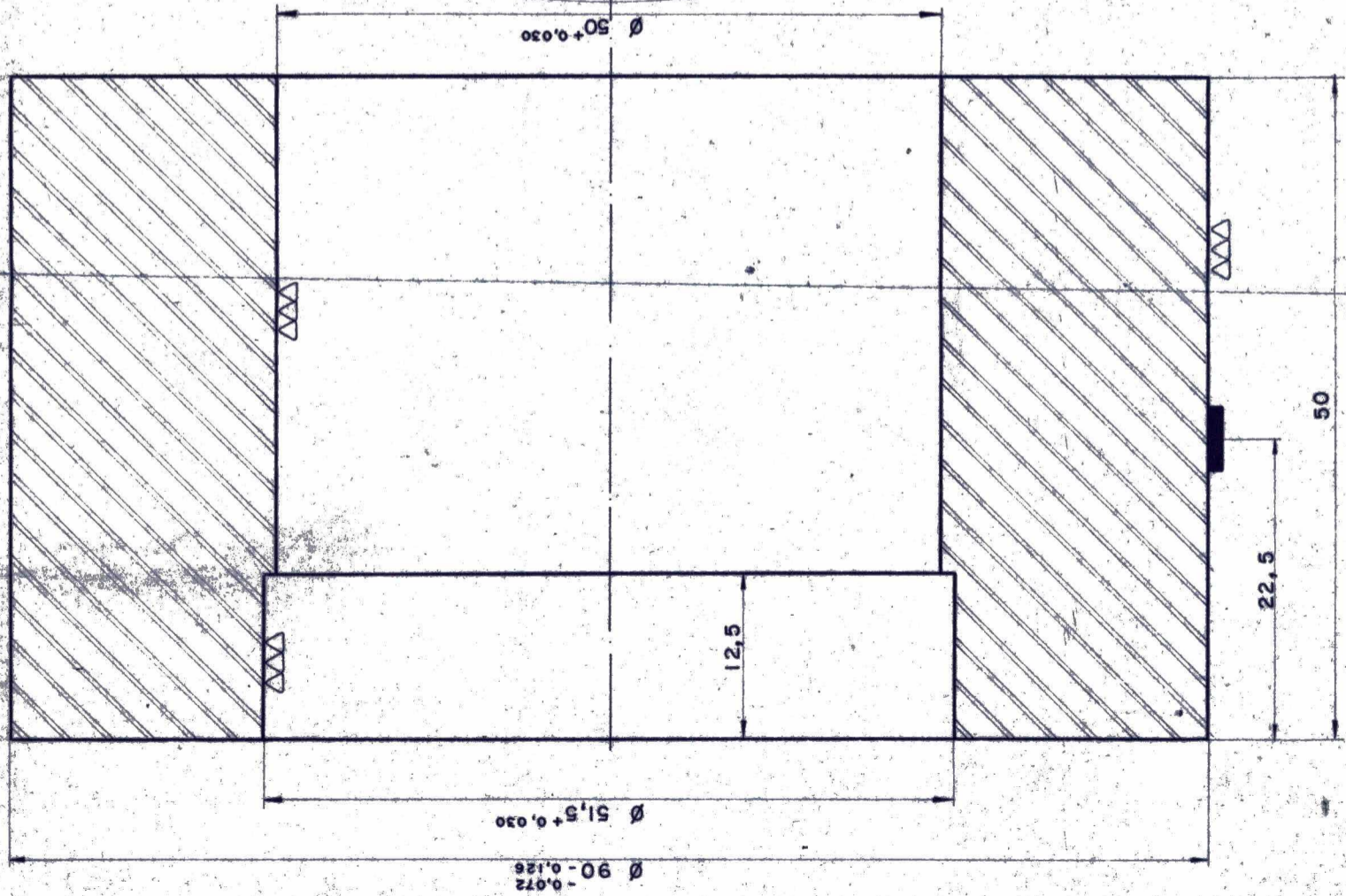
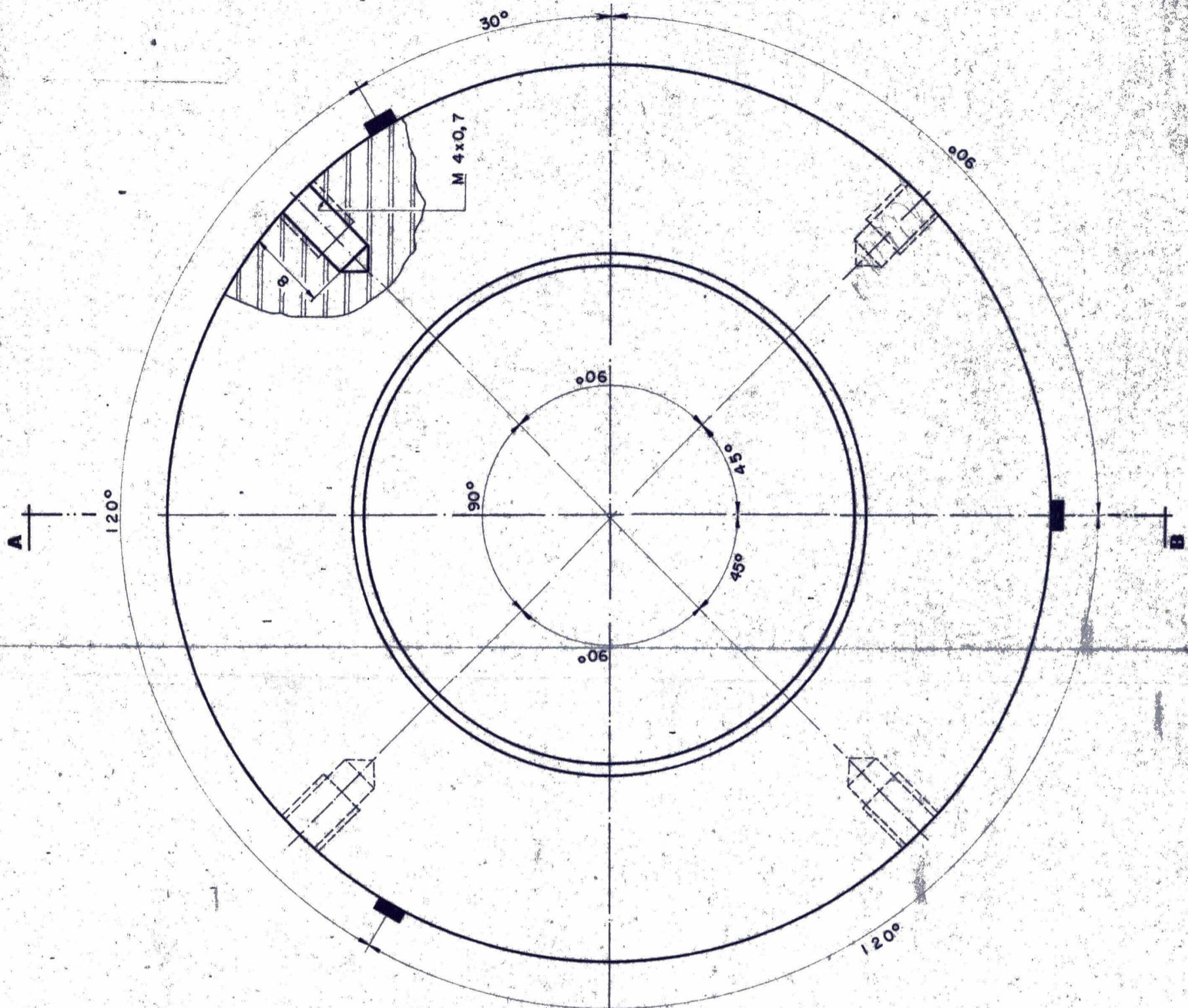
UFSC	PROJETO	ESPECIFICAÇÃO	PEÇA Nº
09/07/75	Roberval R. de S. Carvalho	Aço ABNT (Temperado)	6
	DENOMINAÇÃO	ESCALA	QUANT.
	DISCO GUIA	1:1	1



UFSC	PROJETO	ESPECIFICAÇÃO	PEÇA Nº
DATA	Roberval R. da S. Carvalho	A 90 ABNT 1020	7
09/07/75	DENOMINAÇÃO	ESCALA	QUANT.
	EIXO GUIA	2:1	1

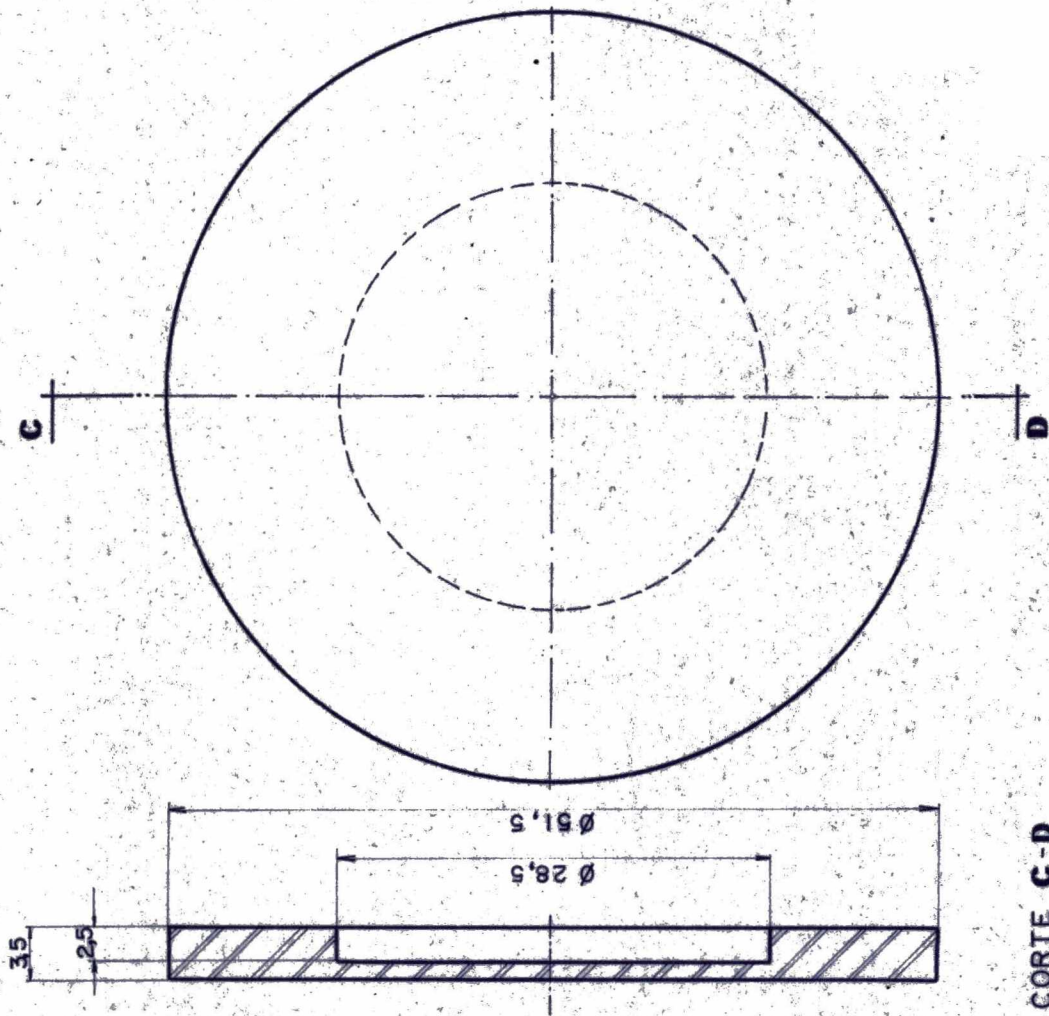
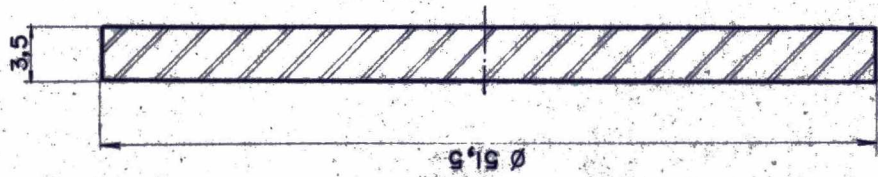
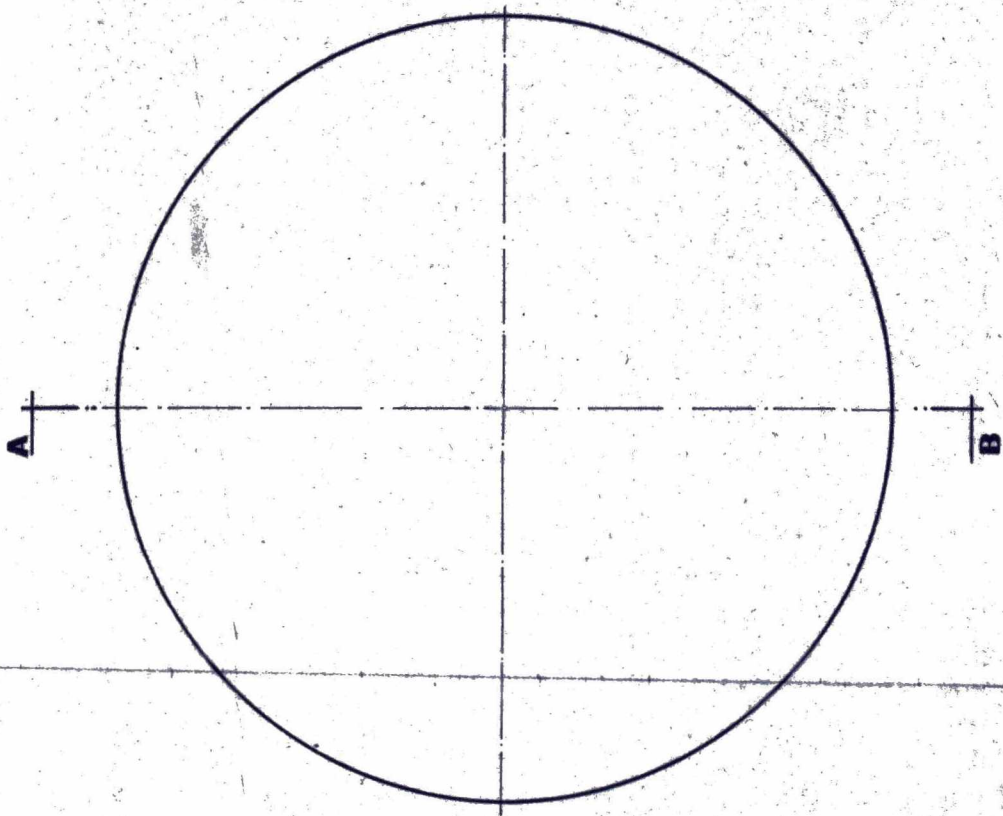


UFSC	PROJETO	ESPECIFICAÇÃO	PEÇA Nº.
08/07/75	Roberval R. da S. Carvalho	Aço VPCW (Temperado e Revenido)	B
DATA	DE NOMINAÇÃO	ESCALA	QUANT
08/07/75	MATRIZ PROPRIAMENTE DITA	2:1	1

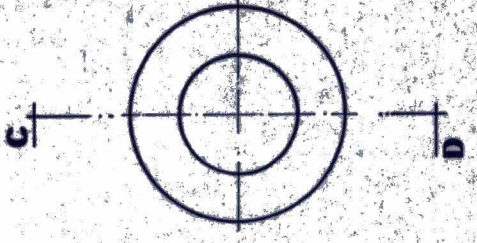
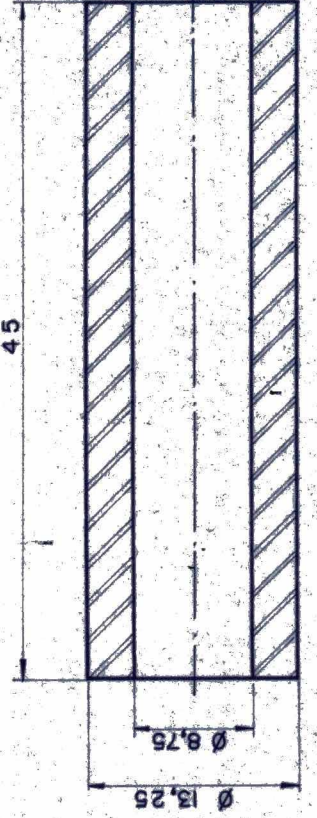
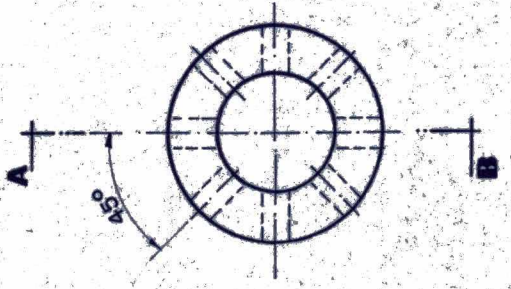
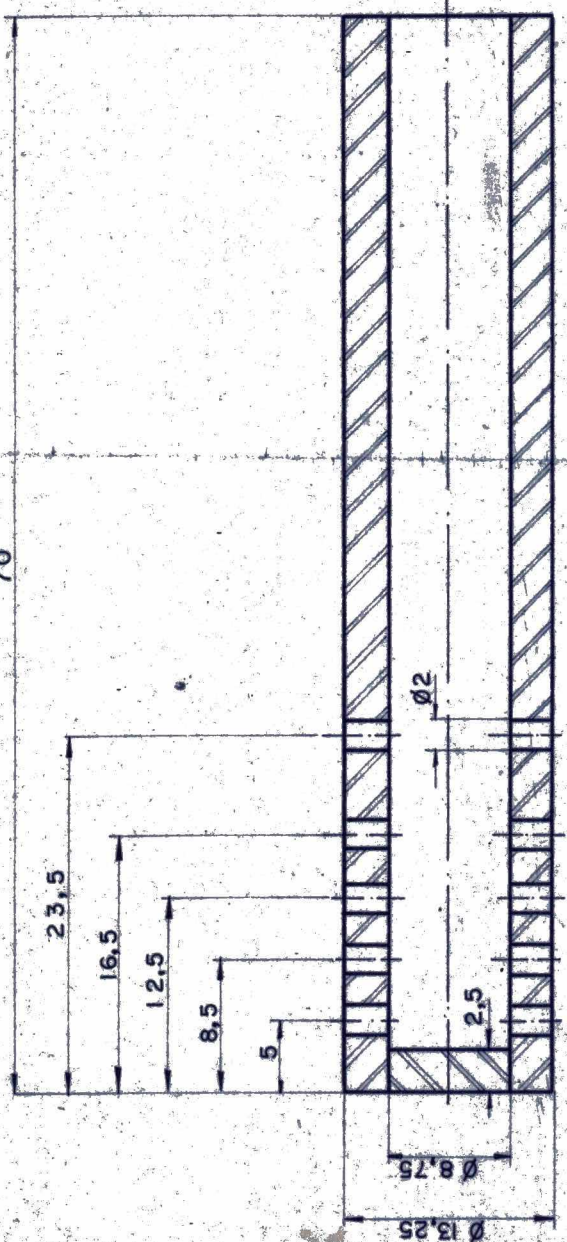


CORTE A-B

U.F.S.C.	PROJETO	ESPECIFICAÇÃO	PEÇA N.º
Roberval R. da S. Carvalho	ABNT 1050 (temperado e revenido)	Aço	9
08/07/75	DENOMINAÇÃO	ESCALA	QUANT
	ANEL DINAMOMÉTRICO PARA MEDIÇÃO DA FORÇA TOTAL	2:1	1



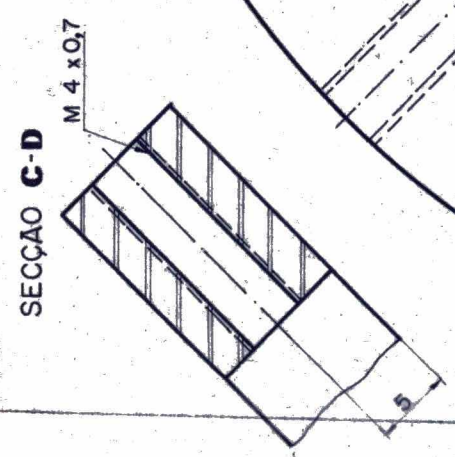
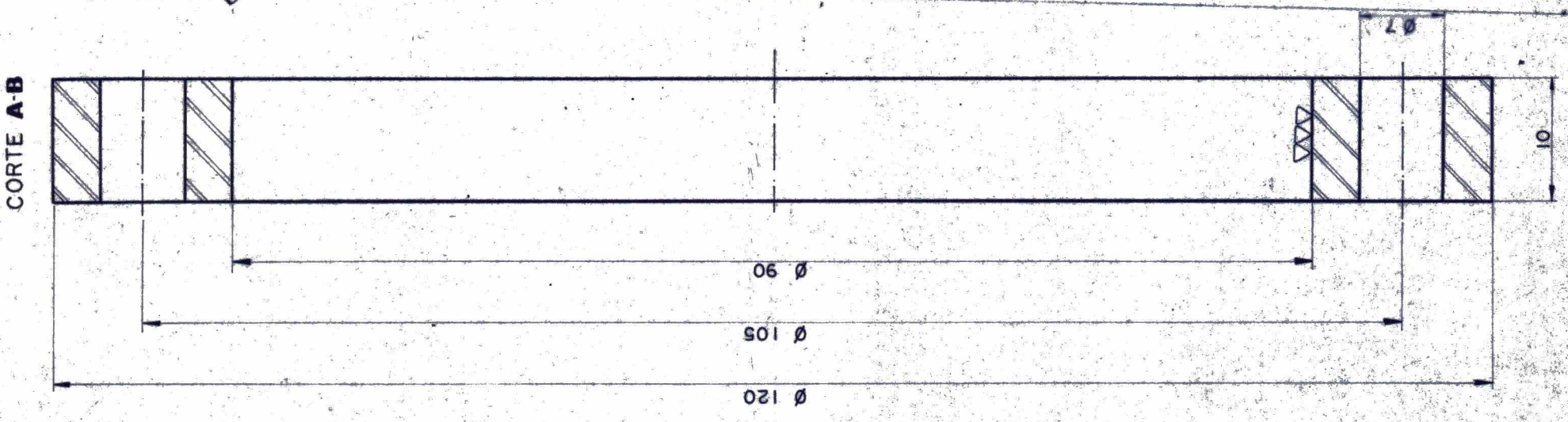
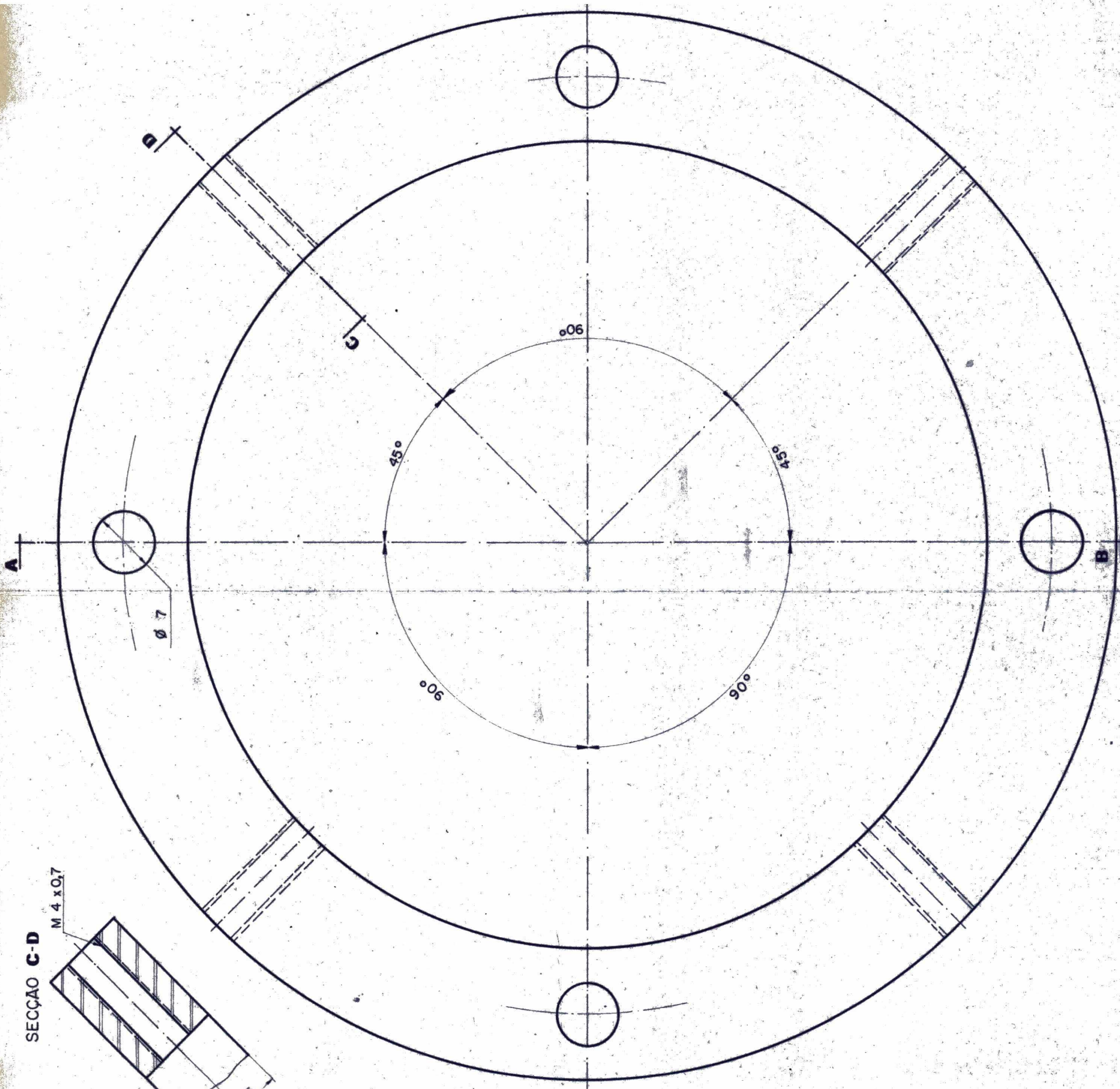
UFSC	PROJETO	ESPECIFICAÇÃO	PEÇA Nº
09/07/75	Roberval R. da S. Carvalho	Amianto / Aço ABNT 1020	10 e III
	DENOMINAÇÃO	ESCALA	QUANT.
	DISCO DE ISOLAMENTO TÉRMICO	2:1	1



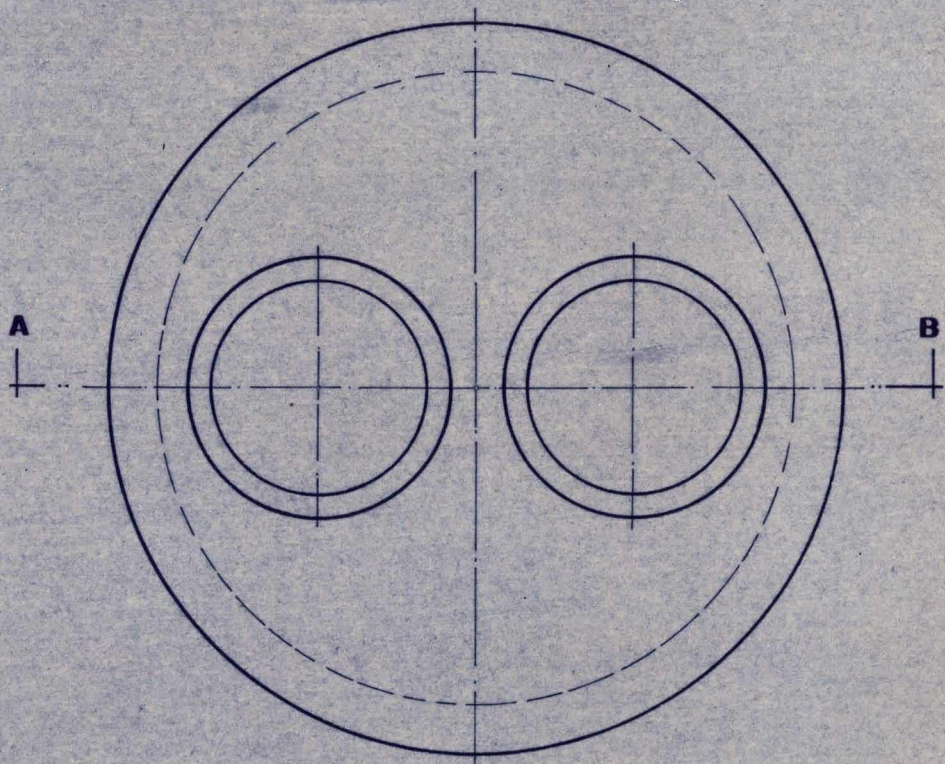
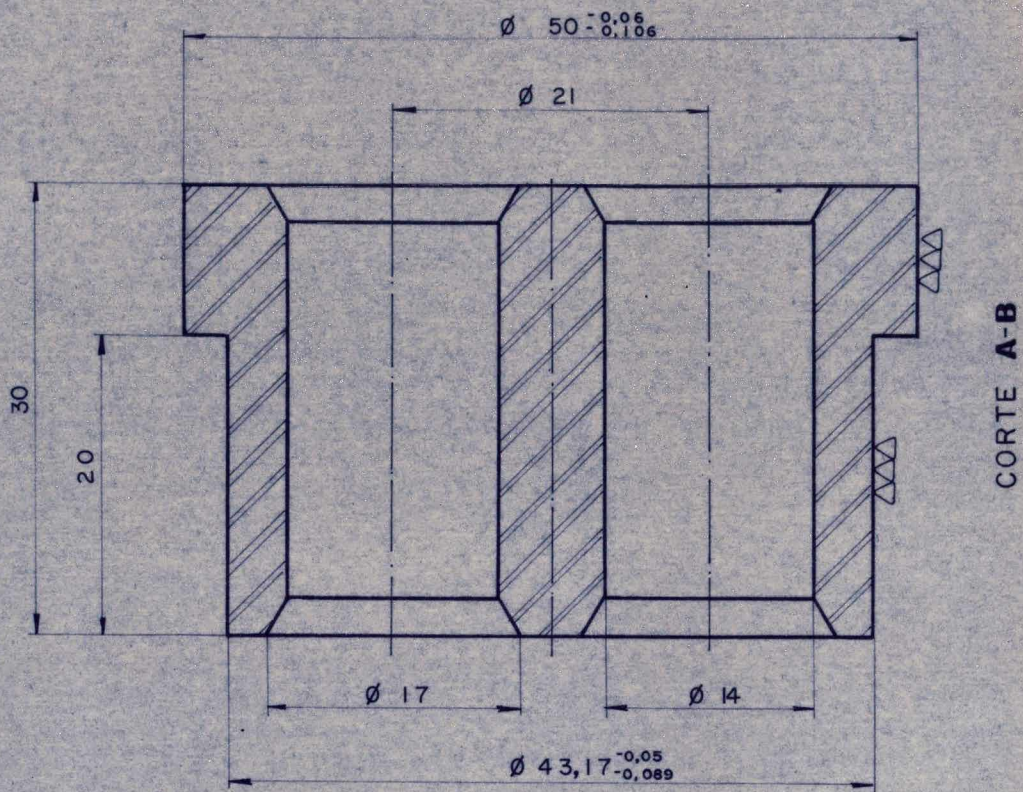
CORTE A-B

CORTE C-D

UFSC	PROJETO	ESPECIFICAÇÃO	PEÇA Nº
DATA	Roberval R. da S. Carvalho	Aço ABNT 1020	12 e 13
08/01/75	DE NOMINAÇÃO	ESCALA	QUANT
	CANO DE RETORNO DA ÁGUA	2 : 1	1
	CANO DE INJEÇÃO DA ÁGUA		

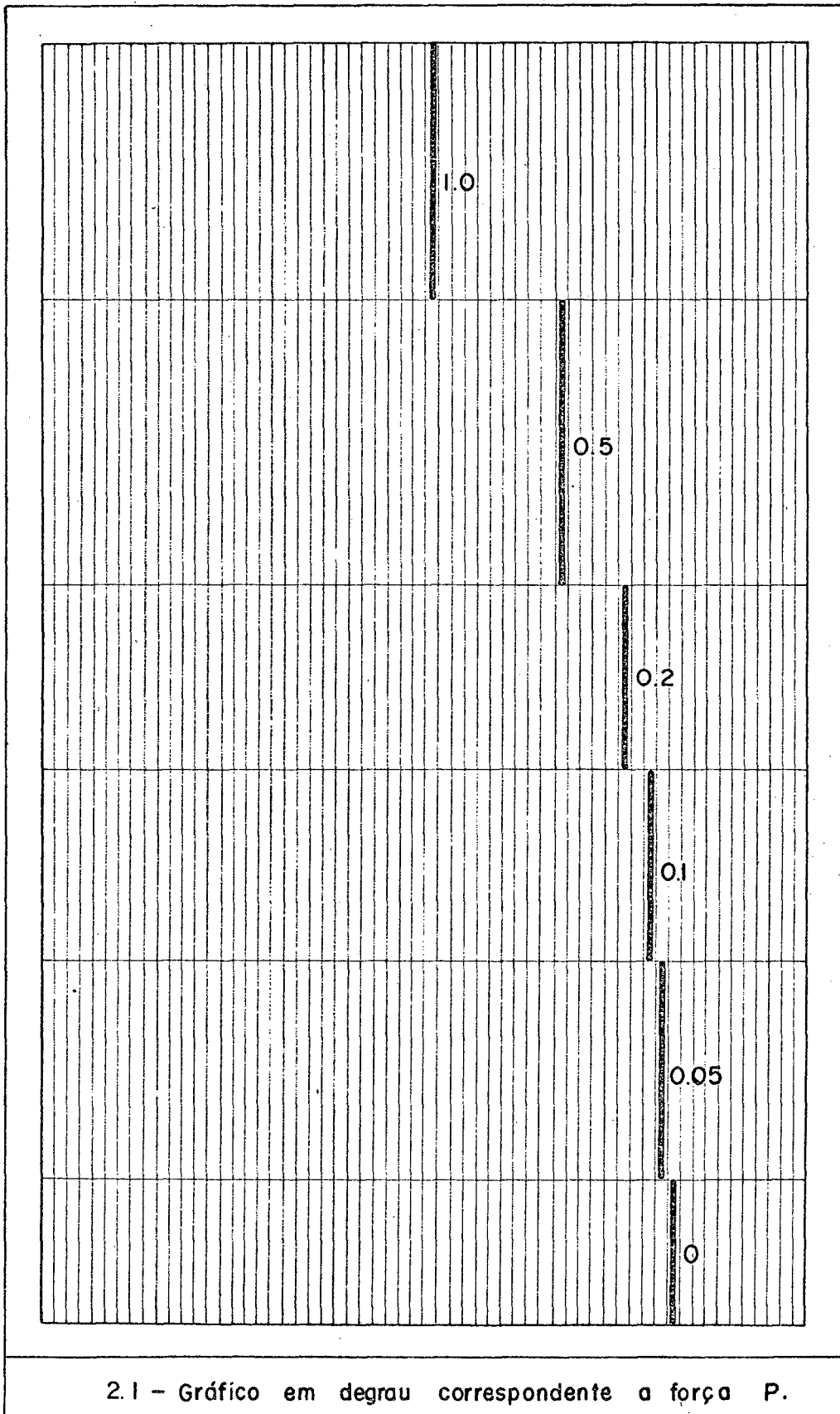


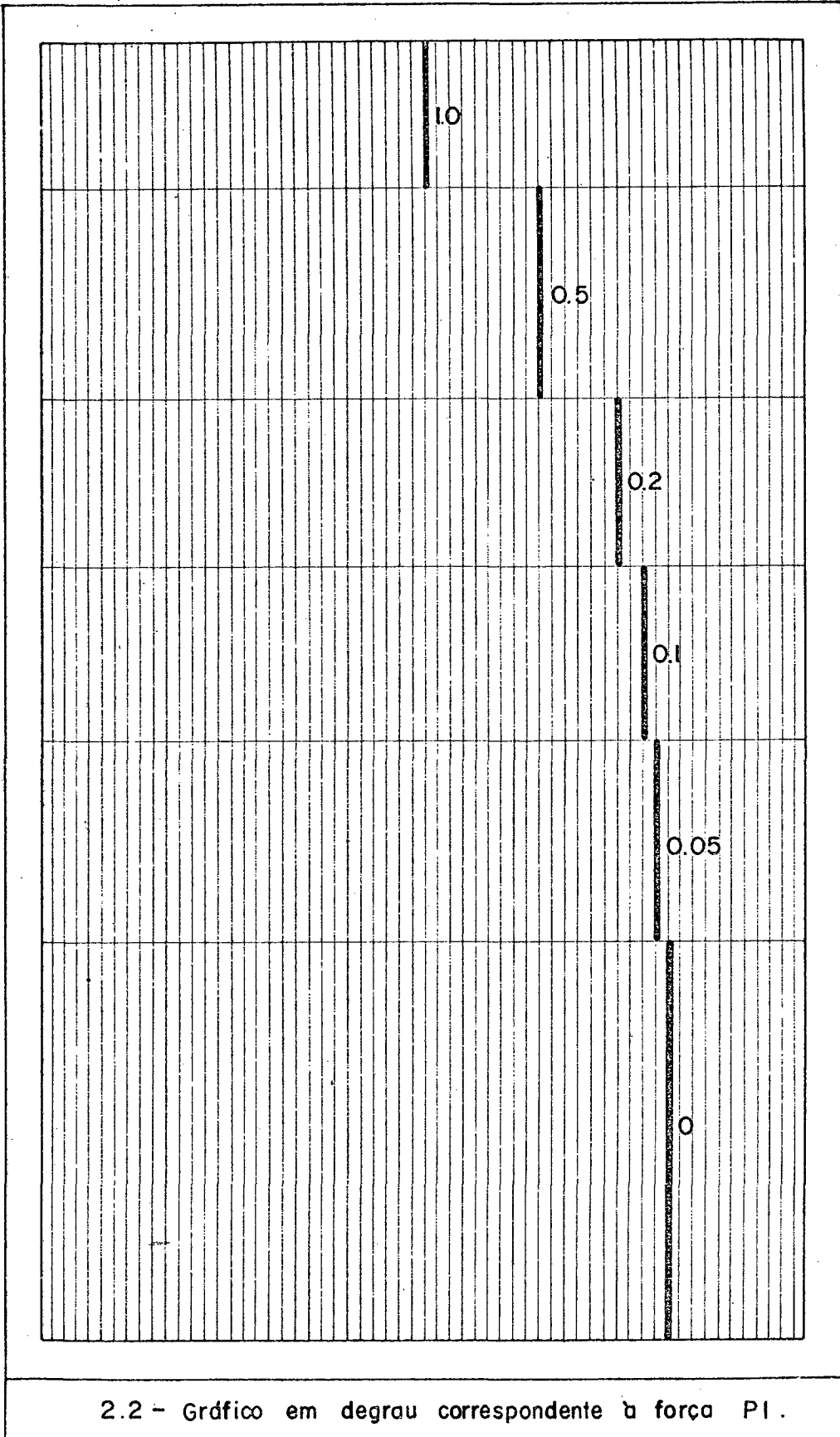
UFSC	PROJETO	ESPECIFICAÇÃO	PEÇA Nº
09/07/76	Roberval R. da S. Carvalho	Aço ABNT 1020	14
	DENOMINAÇÃO	ESCALA	QUANT
	ANEL DE FIXAÇÃO	2:1	1

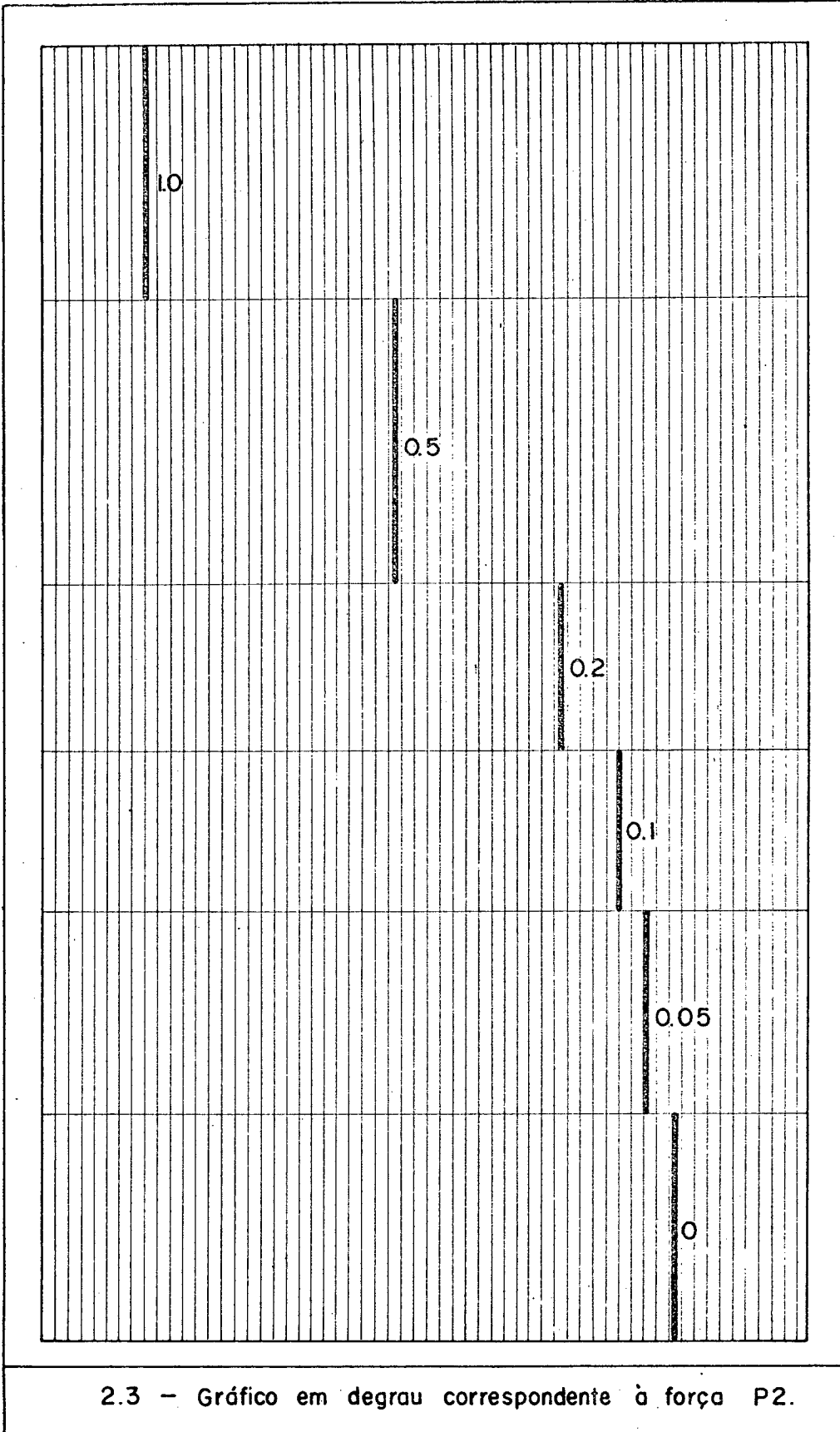


UFSC	PROJETO Roberval R. da S. Carvalho	ESPECIFICAÇÃO Aço ABNT 1020	PEÇA Nº 15
DATA 09/07/75	DENOMINAÇÃO GUIA DOS CANOS DE INJEÇÃO DA ÁGUA	ESCALA 2:1	QUANT. 1

A P E N D I C E II







2.3 - Gráfico em degrau correspondente à força P2.