

**CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO  
EM ENGENHARIA CIVIL**

**ESTUDO DA ERODIBILIDADE EM ENSAIO  
CILINDRO ROTATÓRIO**

**Alfredo Luis Mendes D'Ávila**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL**

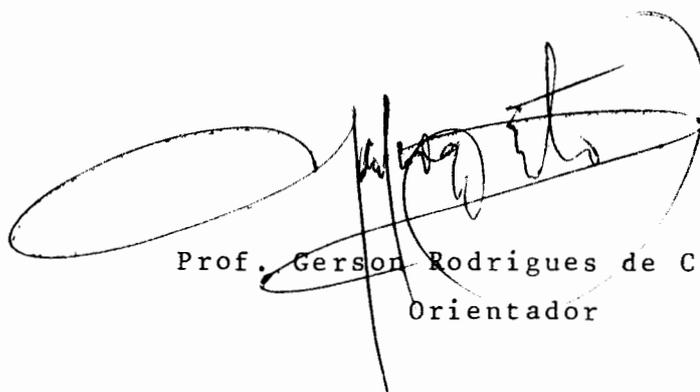
**ESTUDO DA ERODIBILIDADE EM ENSAIO  
CILINDRO ROTATÓRIO**

**Alfredo Luis Mendes D'Ávila**

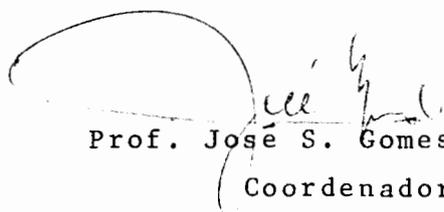
Dissertação apresentada ao corpo docente do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Porto Alegre/Abril de 1982.

Esta dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de **MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL** e aprovada em sua forma final pelo Orientador e pelo Curso de Pós-Graduação-



Prof. Gerson Rodrigues de Castro  
Orientador



Prof. José S. Gomes Franco  
Coordenador  
do Curso de Pós-Graduação em  
Eng. Civil.

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

Ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil pelo apoio recebido.

Ao professor orientador, Gerson Rodrigues de Castro pela sua contribuição neste trabalho e a todas as pessoas que estiveram direta ou indiretamente envolvidas na realização do mesmo.

---

Observação: Este trabalho teve o apoio financeiro do Conselho Nacional de Pesquisa - CNPq, pela concessão da bolsa.

## S U M Á R I O

	pág.
<b>Lista de Figuras</b> .....	VII
<b>Lista de Quadros</b> .....	X
<b>Lista de Gráficos</b> .....	XI
<b>Lista de Fotografias</b> .....	XII
<b>Resumo</b> .....	XIV
<b>Abstract</b> .....	XV
<b>1. Projeto de Canais - Aspectos Relativos a Erosão</b> .....	01
<b>2. Ensaio Cilindro Rotatório - Desenvolvimento do Equipamento</b> .....	12
2.1. Introdução .....	12
2.2. Descrição do equipamento .....	12
2.3. Estudo hidráulico do cilindro rotatório .....	15
<b>3. Metodologia para Realização dos Ensaios</b> .....	22
3.1. Corpos-de-prova .....	22
3.1.1. Molde para a confecção dos corpos-de-prova .....	22
3.1.2. Calibração do equipamento de compactação .....	23
3.1.3. Moldagem dos corpos-de-prova .....	24
3.2. Montagem dos ensaios .....	26
3.3. Execução dos ensaios .....	26
3.4. Cálculos .....	44
3.4.1. Tensão de cisalhamento aplicada no corpo-de-prova .....	44
3.4.2. Área lateral útil .....	45
3.5. Restrições ao uso do ensaio .....	46
<b>4. Características Geotécnicas dos Solos Estudados</b> .....	48
4.1. Descrição dos solos ensaiados .....	48
4.2. Programação seguida .....	48
4.3. Resultados .....	48
<b>5. Ensaios Realizados</b> .....	53
<b>6. Análise dos Resultados</b> .....	69
<b>7. Conclusões</b> .....	85
<b>8. Sugestões para Futuros Estudos</b> .....	86

	pág.
9. Anexo .....	87
10. Bibliografia .....	143
11. Apêndices .....	146

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA	pág.
01 - Perfil de velocidades sobre uma placa plana .....	03
02 - Diagrama das tensões de cisalhamento .....	03
03 - Máximas tensões de cisalhamento hidráulica nas paredes do canal em termos de $\gamma.h.tg\alpha$ .....	04
04 - Máxima velocidade permissível recomendada por FORTIER e SCOBAY e o correspondente valor de tensão de cisalhamento hidráulica crítica .....	05
05 - Dados da U.R.S.S. sobre velocidades admissíveis e tensões de cisalhamento hidráulica crítica em canais .....	06
06 - Típico Flume Test .....	10
07 - Gráfico de perda de peso por unidade de área vs. tempo .....	10
08 - Gráfico da taxa de erosão vs. tensão de cisalhamento .....	10
09 - Equipamento ensaio Cilindro Rotatório .....	88
10 - Molde para a confecção de corpos-de-prova .....	89
11 - Porca de fixação superior do eixo vertical .....	90
12 - Arruela de fixação do eixo vertical .....	91
13 - Calha suporte do eixo vertical .....	92
14 - Calha suporte do eixo vertical .....	93
15 - Calha suporte do eixo vertical .....	94
16 - Eixo vertical .....	95
17 - Suporte móvel ao eixo vertical .....	96
18 - Suporte móvel ao eixo vertical .....	97
19 - Suporte móvel ao eixo vertical .....	98
20 - Porca de fixação inferior do eixo vertical .....	99
21 - Estrutura de suporte .....	100
22 - Estrutura de suporte .....	101
23 - Polia transmissora de torques .....	102
24 - Tubo cilíndrico .....	103
25 - Eixo vertical - peça fixa superior a estrutura de suporte do aparelho .....	104
26 - Eixo vertical - peça fixa superior a estrutura de suporte do aparelho .....	105

	pág.
27 - Base do sistema de transmissão de torques .....	106
28 - Peça fixa inferior a estrutura de suporte do aparelho .....	107
29 - Tubo de fixação .....	108
30 - Tampa de retenção .....	109
31 - Arruela de proteção .....	110
32 - Tampa protetora .....	111
33 - Tampa do Cilindro Rotatório .....	112
34 - Tampa do Cilindro Rotatório .....	113
35 - Suporte superior do Cilindro Rotatório .....	114
36 - Suporte superior do Cilindro Rotatório .....	115
37 - Tubo de fixação do cilindro superior ao corpo-de-prova .....	116
38 - Cilindro superior ao corpo-de-prova .....	117
39 - Placa de apoio ao corpo-de-prova .....	118
40 - Eixo do corpo-de-prova .....	119
41 - Copo do Cilindro Rotatório .....	120
42 - Copo do Cilindro Rotatório .....	121
43 - Copo do Cilindro Rotatório .....	122
44 - Porca de fixação .....	123
45 - Cilindro inferior ao corpo-de-prova .....	124
46 - Suporte inferior do Cilindro Rotatório .....	125
47 - Suporte inferior do Cilindro Rotatório .....	126
48 - Porca de fixação .....	127
49 - Caixa de rolamentos .....	128
50 - Caixa de rolamentos .....	129
51 - Eixo vertical do Cilindro Rotatório .....	130
52 - Parte superior do pé .....	131
53 - Porca de fixação .....	132
54 - Parafuso nivelante .....	133
55 - Apoio de borracha .....	134
56 - Anel sobressalente .....	135
57 - Parede lateral do equipamento de moldagem .....	136
58 - Parede lateral do equipamento de moldagem .....	137
59 - Parte inferior do molde .....	138

	pág.
60 - Parafuso de fixação .....	139
61 - Parafuso de fixação .....	140
62 - Braçadeiras .....	141
63 - Braçadeiras .....	142

## LISTA DE QUADROS

### QUADRO

	pág.
1 - Transição entre o escoamento laminar e o turbulento entre dois cilindros concêntricos .....	16
2 - Densidades secas (g/cm <sup>3</sup> ) ao longo dos corpos-de-prova .....	24
3 - Calibração do dinamômetro .....	45
4 - Ensaio de expansão LNEC (LNEC - E 200 - 1967) .....	47
5 - Ensaio de expansão com pressão confinante aproximadamente igual a zero .....	47
6 - Resultado dos ensaios realizados no solo A .....	49
7 - Resultado dos ensaios realizados no raio B .....	50
8 - Resultado dos ensaios realizados no solo C .....	51
9 - Características da cal utilizada .....	52
10 - Solo A com 3% de cal - Ensaio nº 1 .....	54
11 - Solo A com 3% de cal - Ensaio nº 2 .....	55
12 - Solo A com 3% de cal - Ensaio nº 3 .....	56
13 - Solo A com 3% de cal - Ensaio nº 4 .....	57
14 - Solo A com 3% de cal - Ensaio nº 5 .....	58
15 - Solo B com 3% de cal - Ensaio nº 1 .....	59
16 - Solo B com 3% de cal - Ensaio nº 2 .....	60
17 - Solo B com 3% de cal - Ensaio nº 3 .....	61
18 - Solo B com 3% de cal - Ensaio nº 4 .....	62
19 - Solo B com 3% de cal - Ensaio nº 5 .....	63
20 - Solo C com 3% de cal - Ensaio nº 1 .....	64
21 - Solo C com 3% de cal - Ensaio nº 2 .....	65
22 - Solo C com 3% de cal - Ensaio nº 3 .....	66
23 - Solo C com 3% de cal - Ensaio nº 4 .....	67
24 - Solo C com 3% de cal - Ensaio nº 5 .....	68

## LISTA DE GRÁFICOS

### GRÁFICOS

	pág.
1 - Solo A com 3% de cal - Ensaio 1 - $\tau_{aplicada} = 0,054 \text{ g/cm}^2$ .....	70
2 - Solo A com 3% de cal - Ensaio 2 - $\tau_{aplicada} = 0,091 \text{ g/cm}^2$ .....	71
3 - Solo A com 3% de cal - Ensaio 3 - $\tau_{aplicada} = 0,113 \text{ g/cm}^2$ .....	72
4 - Solo A com 3% de cal - Ensaio 4 - $\tau_{aplicada} = 0,159 \text{ g/cm}^2$ .....	73
5 - Solo A com 3% de cal - Ensaio 5 - $\tau_{aplicada} = 0,195 \text{ g/cm}^2$ .....	74
6 - Solo B com 3% de cal - Ensaio 1 - $\tau_{aplicada} = 0,036 \text{ g/cm}^2$ .....	75
7 - Solo B com 3% de cal - Ensaio 2 - $\tau_{aplicada} = 0,072 \text{ g/cm}^2$ .....	76
8 - Solo B com 3% de cal - Ensaio 3 - $\tau_{aplicada} = 0,109 \text{ g/cm}^2$ .....	77
9 - Solo B com 3% de cal - Ensaio 4 - $\tau_{aplicada} = 0,145 \text{ g/cm}^2$ .....	78
10 - Solo B com 3% de cal - Ensaio 5 - $\tau_{aplicada} = 0,171 \text{ g/cm}^2$ .....	79
11 - Solo C com 3% de cal - Ensaio 1 - $\tau_{aplicada} = 0,045 \text{ g/cm}^2$ .....	80
12 - Solo C com 3% de cal - Ensaio 2 - $\tau_{aplicada} = 0,092 \text{ g/cm}^2$ .....	81
13 - Solo C com 3% de cal - Ensaio 3 - $\tau_{aplicada} = 0,136 \text{ g/cm}^2$ .....	82
14 - Solo C com 3% de cal - Ensaio 4 - $\tau_{aplicada} = 0,172 \text{ g/cm}^2$ .....	83
15 - Solo C com 3% de cal - Ensaio 5 - $\tau_{aplicada} = 0,218 \text{ g/cm}^2$ .....	84

## LISTA DE FOTOGRAFIAS

### FOTOGRAFIA

	pág.
1 - Protótipo cilindro rotatório .....	18
2 - Protótipo cilindro rotatório .....	18
3 - Protótipo cilindro rotatório .....	19
4 - Concepção final cilindro rotatório .....	19
5 - Concepção final cilindro rotatório .....	20
6 - Concepção final cilindro rotatório .....	20
7 - Corpo-de-prova ensaiado .....	21
8 - Equipamento de moldagem .....	28
9 - Equipamento de moldagem .....	28
10 - Fixação do eixo do corpo-de-prova ao cilindro maciço .....	29
11 - Colocação do papel alumínio nas duas telhas .....	29
12 - Colocação do papel alumínio nas duas telhas .....	30
13 - Colocação do papel alumínio nas duas telhas .....	30
14 - Colocação das duas telhas sobre o cilindro maciço .....	31
15 - Colocação das braçadeiras .....	31
16 - Aplicação de silicone aerosol sobre anel sobressalente .....	32
17 - Colocação de material no interior do molde .....	32
18 - Preparação da superfície a ser compactada .....	33
19 - Amostra sendo compactada .....	33
20 - Operação para extração do anel sobressalente .....	34
21 - Corpo-de-prova sendo arrazado .....	34
22 - Remoção das telhas .....	35
23 - Talhagem do corpo-de-prova .....	35
24 - Talhagem do corpo-de-prova .....	36
25 - Colocação do corpo-de-prova em estufa para ser procedida a cura .....	36
26 - Aspersão sobre o corpo-de-prova .....	37
27 - Imersão do corpo-de-prova .....	37
28 - Fixação do corpo-de-prova ao conjunto .....	38
29 - Detalhe de imperfeição da extremidade do corpo-de-prova preenchida com bentonita .....	38

30 - Colocação da membrana superior sobre o corpo-de-prova .....	39
31 - Desenvolvimento de aderência entre o corpo-de-prova e as placas de apoio .....	39
32 - Colocação da membrana inferior sobre o corpo-de-prova .....	40
33 - Colocação do cilindro inferior ao corpo-de-prova .....	40
34 - Deslocamento da parte superior do Cilindro Rotatório .....	41
35 - Fixação da tampa ao suporte superior do Cilindro Rotatório .....	41
36 - Remoção da fixação Cilindro Rotatório-Eixo .....	42
37 - Colocação em cápsulas do material erodido .....	42
38 - Colocação em cápsulas do material erodido .....	43
39 - Ensaio de expansão com pressão confinante aproximadamente igual a zero .....	149

## R E S U M O

Apresenta-se por meio deste trabalho o desenvolvimento do equipamento cilindro rotatório utilizado para ensaios de erosão em solos. Primeiramente, novas características foram introduzidas no protótipo desenvolvido por Castro, G.R. e Figueiredo, A. As quais melhoraram o desempenho do equipamento. Em segmento propõe-se uma metodologia para moldagem dos corpos-de-prova, montagem dos mesmos sobre o equipamento e realização dos ensaios. Usando esta metodologia três amostras de solo estabilizados com cal foram testadas no laboratório sob diferentes tensões de cisalhamento hidráulica. Os resultados obtidos foram analisados de acordo com a teoria de AKKY e SHEN<sup>2</sup>.

## A B S T R A C T

The present study reports the development of a rotating cylinder apparatus, for soil erosion laboratory tests. Basically, new features were introduced in the design proposed by Castro G.R. and Figueiredo, A., which improved the performance of the device. A new methodology for soil testing is also presented, including sample preparation. Using this methodology, three samples of limetreated soils were prepared and tests were performed in the lab, under different boundary shear stress conditions. The results obtained are analyzed according to the theory of Akky and Shen<sup>1</sup>.

## 1. PROJETO DE CANAIS - ASPECTOS RELATIVOS A EROSÃO

A estabilidade do canal face à erosão é um dos inúmeros problemas com que se defronta o engenheiro geotécnico e/ou hidráulico. Segundo LANE<sup>5</sup>, canal estável pode ser entendido como o canal que não apresenta deposição de sedimentos ou erosão em quantidades apreciáveis que possam vir a comprometer a sua operabilidade. É intenção deste trabalho, no entanto, unicamente a discussão de aspectos relacionados à erosão superficial.

Em matéria de erosão dois são os critérios utilizados para o dimensionamento de canais: o critério da tensão de cisalhamento hidráulica crítica e o critério da velocidade permissível. O primeiro critério se fundamenta na tensão imprimida a uma superfície pelo gradiente de velocidades junto a ela (Fig. 01). A essa região onde se verifica a variação da velocidade de escoamento desde zero, junto à superfície, até a um valor praticamente constante é dado o nome de camada limite. Suponhamos, por exemplo, um corpo livre em um canal de inclinação constante e vazão uniforme com a largura muito maior que a altura (Fig. 02). A fim de que este corpo livre possa estar em equilíbrio, a soma das forças atuantes sobre ele deve ser zero. Essas forças consistem do peso do corpo livre, das forças de pressão atuando sobre os lados do corpo livre e do cisalhamento de contorno ao movimento da água. Forças de pressão são meramente opostas por forças similares do lado oposto do corpo livre; a componente de peso normal ao fundo do canal  $\gamma \cdot h \cdot \cos \alpha$  é oposta pelo próprio fundo do canal, e a componente de peso paralela ao fundo do canal  $\gamma \cdot h \cdot \sin \alpha$  é oposta pela tensão de cisalhamento de contorno à água que se move, logo

$$\tau \text{ (tensão de cisalhamento)} = \gamma \cdot h \cdot \sin \alpha$$

Como os valores de  $\alpha$  usualmente utilizados em canais são pequenos  $\sin \alpha \approx \text{tg } \alpha$  logo,

$$\tau \approx \gamma \cdot h \cdot \text{tg } \alpha$$

Estudos feitos no U.S.B.R.<sup>5</sup> (United States Bureau Reclamation), usando a analogia da membrana para a determinação da distribuição

da tensão de cisalhamento hidráulica, mostraram que, para a maior parte dos canais usados para irrigação, a tensão de cisalhamento hidráulica máxima no canal se aproxima da hipótese de um canal de largura infinita. O padrão do diagrama de distribuição varia com a forma de secção, mas é praticamente inafetado pelo tamanho da secção. A Fig. 03 apresenta os resultados obtidos a partir de tais estudos para a tensão de cisalhamento máxima no fundo e nos lados do canal para vários tipos de secção.

O critério da tensão de cisalhamento hidráulica crítica dimensiona o canal a partir da comparação entre a máxima tensão de cisalhamento atuante e da tensão de cisalhamento a que o solo resiste (tensão de cisalhamento hidráulica crítica). Já o critério da velocidade permissível foi desenvolvido por observações de canais executados, fixando para cada tipo de solo, um limite superior para a velocidade média a fim de se garantir a estabilidade. Nas Figs. 04 e 05 são apresentadas as tabelas de velocidades admissíveis, normalmente citados na literatura técnica, para os diferentes tipos de solo. O primeiro critério é principalmente teórico, na medida em que ele oferece um modo para avaliar o cisalhamento na interface: água e material do revestimento do canal; enquanto o segundo critério é estritamente empírico. LANE<sup>5</sup> menciona a existência de evidências desabonadoras para os critérios baseados em velocidades permissíveis, sugerindo a adoção de critérios baseados em tensões de cisalhamento. Essa sugestão se fundamenta no fato de que diversas tabelas de velocidade permissível incluem uma correção que leva em conta a profundidade. Cálculos feitos, utilizando-se esses valores, apresentaram mesmas tensões de cisalhamento hidráulica crítica para um mesmo tipo de solo, em diferentes profundidades. A reunião dessas evidências reforçou a idéia da utilização de tensões de cisalhamento como critério para o dimensionamento de canais. No entanto, até hoje, as tabelas disponíveis fornecem velocidades admissíveis, sendo que, as poucas tabelas que existem de tensões de cisalhamento hidráulica crítica (Figs. 04 e 05) foram obtidas pela conversão dos valores limite de velocidade tabelados, pressupondo uma série de hipóteses sob as condições em que se dá o fluxo (tamanho e forma do canal, distribuição de tensões de cisalhamento, inclinação do fundo do canal, etc...).

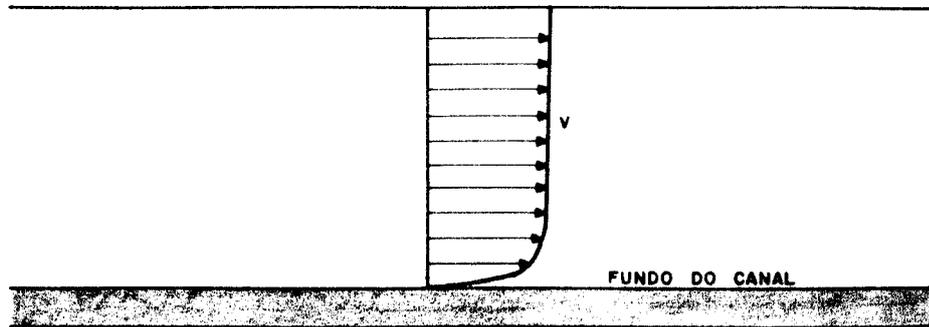


FIGURA - 01

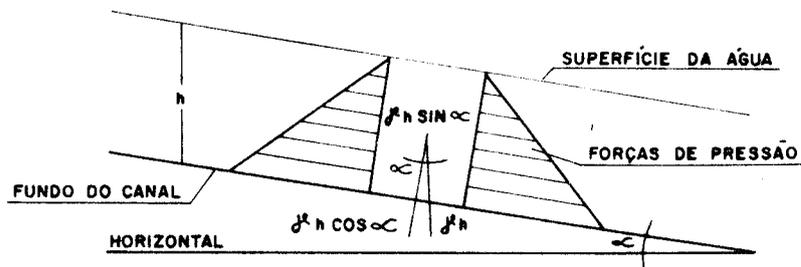
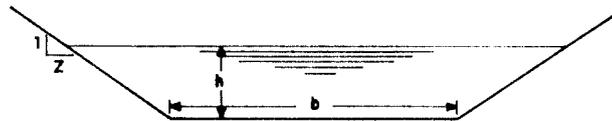
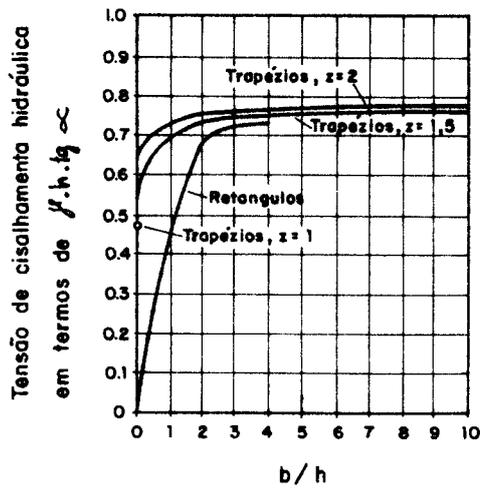


FIGURA - 02

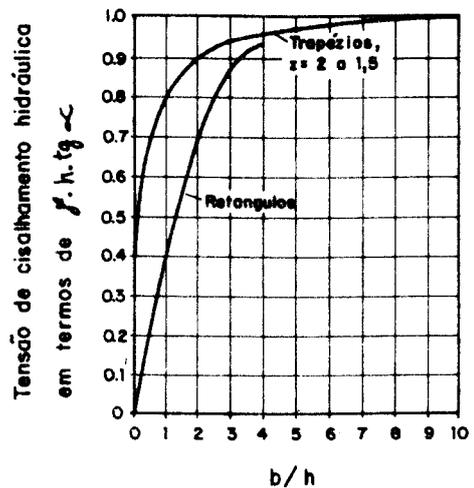
PERFIL DE VELOCIDADES SOBRE UMA PLACA PLANA	FIGURA - 01
DIAGRAMA DAS TENSÕES DE CISALHAMENTO	FIGURA - 02



$\alpha$  - Declividade do canal



Sobre os lados do canal



Sobre o fundo do canal

Fonte : CHOW, Wen Te. Open-channel hydraulics.

Tokyo, McGraw-Hill Kogakusha, 1959. p.165

MÁXIMAS TENSÕES DE CISALHAMENTO HIDRÁULICA NAS PAREDES DO CANAL EM TERMOS DE  $f \cdot h \cdot \text{tg } \alpha$

FIGURA - 03

## PARA CANAIS DE PEQUENA INCLINAÇÃO DEPOIS DE ENVELHECIDOS

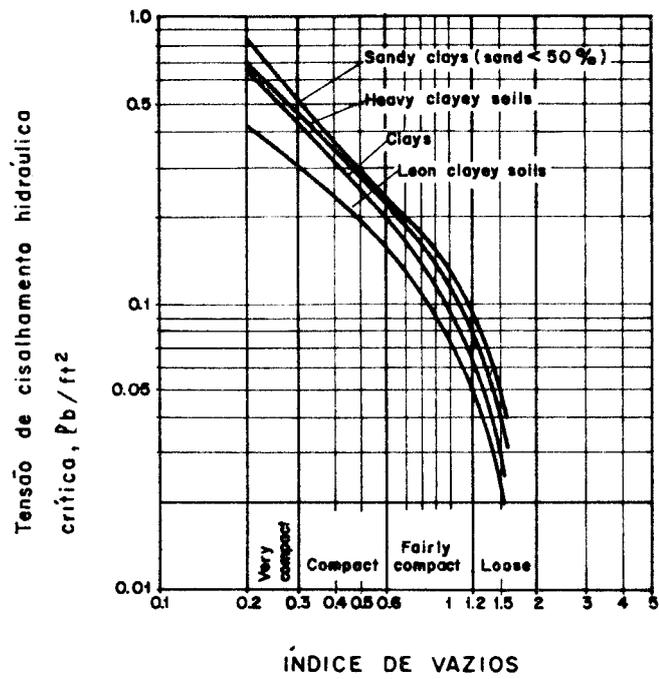
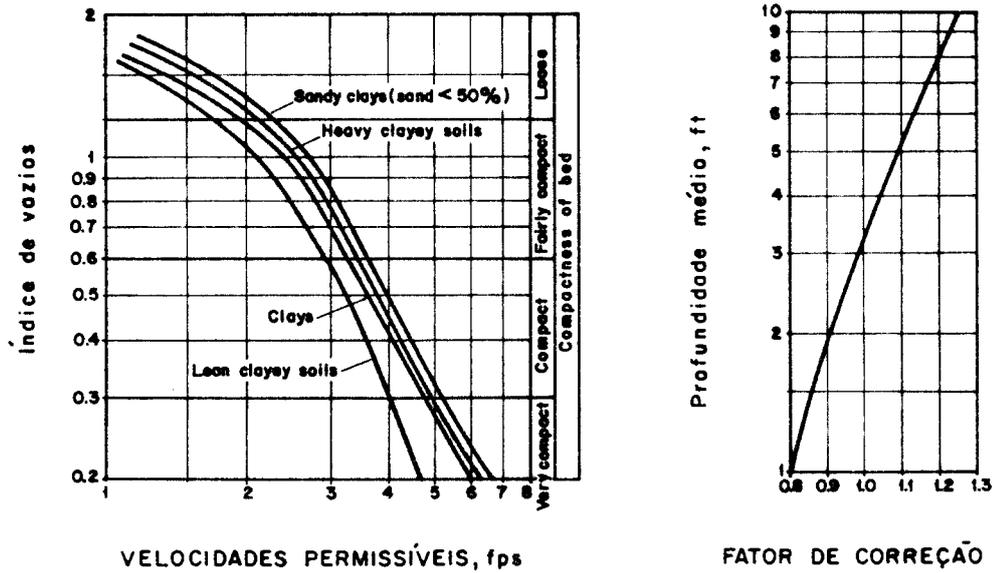
Material	n	Clear water		Water transporting colloidal silts	
		V, fps	re, lb/ft <sup>2</sup>	V, fps	re, lb/ft <sup>2</sup>
Fine sand, colloidal _____	0.020	1.50	0.027	2.50	0.075
Sandy loam, noncolloidal _____	0.020	1.75	0.037	2.50	0.075
Silt loam, noncolloidal _____	0.020	2.00	0.048	3.00	0.11
Alluvial silts, noncolloidal _____	0.020	2.00	0.048	3.50	0.15
Ordinary firm loam _____	0.020	2.50	0.075	3.50	0.15
Volcanic ash _____	0.020	2.50	0.075	3.50	0.15
Stiff clay, very colloidal _____	0.025	3.75	0.26	5.00	0.46
Alluvial silts, colloidal _____	0.025	3.75	0.26	5.00	0.46
Shales and hardpans _____	0.025	6.00	0.67	6.00	0.67
Fine gravel _____	0.020	2.50	0.075	5.00	0.32
Graded loam to cobbles when noncolloidal _____	0.030	3.75	0.38	5.00	0.66
Graded silts to cobbles when colloidal _____	0.030	4.00	0.43	5.50	0.80
Coarse gravel, noncolloidal _____	0.025	4.00	0.30	6.00	0.67
Cobbles and shingles _____	0.035	5.00	0.91	5.50	1.10

Fonte: CHOW, Wen Te. Open-channel hydraulics.

Tokyo, McGraw-Hill Kogakusha, 1959. p.165

MÁXIMA VELOCIDADE PERMISSÍVEL RECOMENDADA POR FORTIER E SCOBEEY E O  
CORRESPONDENTE VALOR DE TENSÃO DE CISCALHAMENTO  
HIDRÁULICA CRÍTICA.

FIGURA - 04



FONTE: CHOW, Wen-Te. Open-channel hydraulics. Tokio, McGraw-Hill Kogakusha, 1959. p.167,174

DADOS DA U.R.S.S. SOBRE VELOCIDADES ADMISSÍVEIS E TENSÕES DE  
CISALHAMENTO HIDRÁULICA CRÍTICA EM CANAIS.

**FIGURA - 05**

Mais recentemente ocorreram tentativas de desenvolvimento de ensaios de laboratório para a determinação da tensão de cisalhamento hidráulica crítica de um solo que incluísse em seu resultado as inúmeras variáveis significativas que nela influenciavam, permitindo, ainda, que se transmitisse a experiência de uma obra para outra. Entre os inúmeros testes desenvolvidos, os principais são: Flume Test e o Cilindro Rotatório. Um típico Flume Test, o utilizado por BERGAGHER & LADD<sup>2</sup>, pode ser observado na Fig. 06. Trata-se de um canal de laboratório sobre o qual a água escorre encontrando a amostra de solo em uma determinada seção. Normalmente o critério para a determinação da tensão de cisalhamento hidráulica crítica é o da movimentação geral do solo, o que pode ser visualizado através de um visor. Dois são os principais inconvenientes desse tipo de ensaio, devidos ao pequeno tamanho das amostras: a dificuldade em medir a quantidade de solo erodido pela sua pouca quantidade e a distribuição irregular das tensões de cisalhamento sobre a amostra, pois o fluxo subitamente encontra a amostra de solo, ocorrendo uma abrupta mudança na rugosidade da cama e na distribuição de velocidades (BERGAGHER & LADD<sup>2</sup>). Sob estas condições a tensão de cisalhamento hidráulica crítica não é necessariamente a tensão de cisalhamento hidráulica média medida. Além das restrições de ordem técnica, o Flume Test apresenta o inconveniente de seu alto custo, o que dificulta a maior generalização de sua utilização.

Um outro tipo de aparelho usado em testes de erosão é o Cilindro Rotatório, inicialmente desenvolvido por MASCH; ESPEY; MOORE<sup>7</sup>.

Esse aparelho opera sob um princípio similar ao de alguns viscosímetros; dois cilindros concêntricos são separados por um espaço anular preenchido com água: o cilindro interno é a amostra de solo (corpo-de-prova) e o cilindro externo é feito de algum material translúcido (lucite, acrílico, resina de poliéster, etc...). É imprimida rotação ao cilindro externo, permanecendo o cilindro interno (amostra de solo) estacionada. Este tipo de movimento causa um gradiente de velocidades no fluido mantido entre os dois cilindros, sendo a velocidade igual a da rotação junto ao cilindro externo e igual a zero junto ao cilindro interno; tal gradiente de velocidades é o responsável pela transmissão de

tensões de cisalhamento hidráulico sobre o corpo-de-prova. Basicamente duas maneiras de realizar o ensaio e dois critérios para a determinação da tensão de cisalhamento hidráulica crítica são citados na bibliografia disponível: o proposto por REKTORIK & SMERDON<sup>10</sup>, transcrito logo a seguir, e o de AKKY & SHEN<sup>1</sup>:

"Com a amostra colocada no aparelho, rotação ao cilindro exterior é lentamente imprimida em um período de um a dois minutos. Tanto o ponteiro registrador de torques quanto a amostra são observadas. Se o ponteiro tiver uma movimentação brusca, o aparelho tem sua velocidade reduzida lentamente e a amostra de solo é removida, sendo examinada a erosão superficial, a existência de lascas ou de quebras. Se qualquer desses sinais estiver presente, a tensão de cisalhamento hidráulica crítica é considerada ter sido alcançada. Se nenhuma movimentação brusca tiver ocorrido, a amostra é observada através do cilindro exterior transparente até que a água torne-se relativamente turva. O aparelho é então lentamente parado, a amostra removida e examinada a erosão. Se nenhuma erosão significativa é notada, a amostra é novamente colocada no aparelho e a velocidade aumentada até que o ponteiro indique um maior torque do que o aplicado no teste anterior. Esse torque é mantido por um período de 50 segundos. O aparelho é então parado, a amostra de solo removida é examinada. Este procedimento é repetido até que a superfície da amostra tenha perdido o polimento desenvolvido pelo molde e mostre sinais de erosão. A tensão na qual esta condição é produzida é considerada a tensão de cisalhamento hidráulica crítica". (Tradução do texto original).

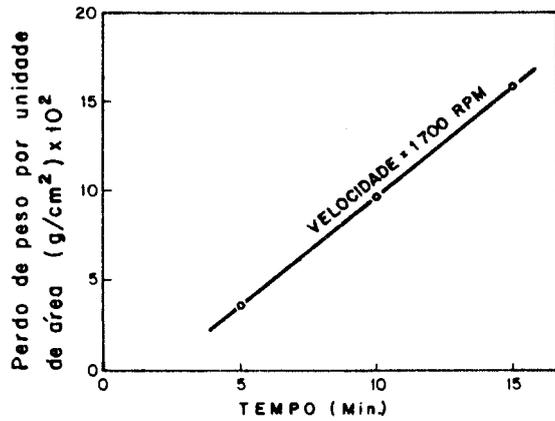
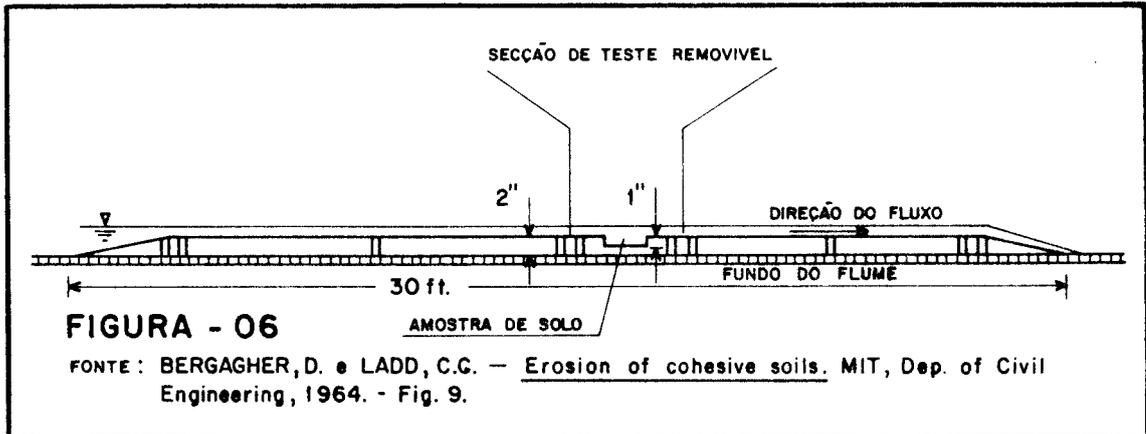
Já o proposto por AKKY & SHEN<sup>1</sup> consiste basicamente do seguinte: os testes são iniciados girando o cilindro exterior em baixa velocidade pré-selecionada. Dependendo da erodibilidade da amostra o tempo de ensaio varia de uns poucos minutos a uma hora. Durante este período o teste é interrompido pelo menos três vezes para registrar a perda de peso para um dado espaço de tempo. A velocidade é então aumentada e o mesmo processo repetido, até que uma considerável quantia de erosão sobre a superfície da amostra seja observada. Deste modo o relacionamento entre a perda de peso e o tempo de ensaio pode ser estabelecido em pelo menos três pontos para várias velocidades de rotação. Com estes re

sultados é proposta uma metodologia para a determinação da tensão de cisalhamento hidráulica crítica. Um gráfico típico de erosão vs. tempo, então obtido, é mostrado na Fig. 07. A inclinação dessa linha é chamada Índice de erosão de uma dada amostra em uma determinada velocidade de rotação. A amostra é então sucessivamente testada em mais altas velocidades, até que uma considerável quantia de erosão sobre a superfície da amostra seja observada. Os índices de erosão obtidos são então plotadas em função da tensão cisalhante como apresentadas na Fig. 08. O intercepto da reta no eixo das abscissas, correspondendo ao índice de erosão zero é definido como a tensão de cisalhamento hidráulica crítica do solo ( $\tau_c$ ), que seria a mínima tensão capaz de iniciar o processo erosivo.

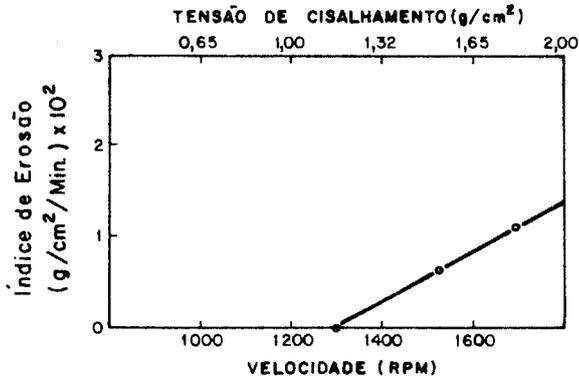
Ambos os métodos propostos para a determinação da tensão de cisalhamento crítica, o de REKTORIK & SMERDON<sup>10</sup> e o de AKKY & SHEN<sup>2</sup>, tem em comum a pequena relação estabelecida entre o laboratório e o campo quando da sua elaboração. Pelo menos é isto que fica visualizado da leitura atenta desses trabalhos, já que em nenhum momento são citadas comprovações experimentais que tenham sido realizadas.

É indiscutível que o Cilindro Rotatório, independente de dúvidas a cerca da metodologia a ser seguida na realização dos ensaios e na interpretação dos resultados, as quais ocorrem em um mesmo grau no Flume Test, leva sobre este a vantagem de seu muito mais baixo preço; em consequência, deveriam se concentrar as pesquisas sobre ele.

A tentativa de estabelecer correlações entre a tensão de cisalhamento hidráulica crítica e ensaios de solos de rotina (limite de liquidez, limite de plasticidade, Vane Test, percentagem em peso de partículas tamanho argila, etc...), que medem propriedades ligadas ao tipo de solo e ao estado em que se encontra, foi um outro tipo de abordagem visualizada. Isso seria de grande importância prática, uma vez que facilitaria o pré-dimensionamento de canais utilizando correlações simples. No entanto, os resultados até hoje obtidos não são conclusivos nem animadores, o que poderia ser esperado, considerando que cada um desses ensaios leva em conta um número muito pequeno de variáveis perante um fenômeno de extrema complexidade, como o da erosão. Tentativas feitas por



**FIGURA - 07**



**FIGURA - 08**

TÍPICO FLUME TEST	FIGURA - 06
GRÁFICO DE PERDA DE PESO POR UNIDADE DE ÁREA vs. TEMPO	FIGURA - 07
GRÁFICO ÍNDICE DE EROSIÃO vs. TENSÃO DE CISLHAMENTO	FIGURA - 08

BERGAGHER & LADD<sup>2</sup> para estimar a tensão de cisalhamento hidráulica crítica em uma amostra da Boston Blue Clay, pré-consolidada a  $1 \text{ kg/cm}^2$ , usando correlações apresentadas em diferentes trabalhos, deram resultados de tensões de cisalhamento hidráulica crítica variando entre  $0,05 \text{ g/cm}^2$  e  $0,2 \text{ g/cm}^2$ , permitindo perceber com clareza a dispersão dessas correlações.

Espera-se, então, ter no Cilindro Rotatório, um caminho promissor para a determinação da tensão de cisalhamento hidráulica crítica a baixo custo e melhor grau de confiabilidade.

## 2. ENSAIO CILINDRO ROTATÓRIO - DESENVOLVIMENTO DO EQUIPAMENTO

### 2.1. Introdução

O equipamento em questão foi primeiramente proposto no Brasil pelos engenheiros CASTRO & FIGUEIREDO<sup>3</sup>. Nas fotografias 1, 2 e 3, pode ser visualizado o protótipo então desenvolvido, primeira referência no desenvolvimento deste trabalho. Tal protótipo, entretanto, apresentava inúmeros problemas que mereceriam ser aperfeiçoados, tais como: sistema de vedação, sistema de medida de torque, fixações e centralização para reduzir vibrações excessivas durante a realização do ensaio. Utilizando-se a mesma concepção de funcionamento do protótipo, assim como o mesmo sistema de comando eletrônico com pequenas alterações, foram re-projetadas as demais partes do novo equipamento cuja concepção final pode ser visualizada nas fotografias 4, 5 e 6.

### 2.2. Descrição do equipamento\*

O equipamento (Fig. 09) é constituído por uma estrutura de suporte (Peça 07) confeccionada com chapas de ferro. O eixo vertical (Peça 04) que serve como guia para o deslocamento da parte superior do Cilindro Rotatório - tampa, sistema de medida de torque, corpo-de-prova, etc... - é formado por uma barra de aço de diâmetro  $\phi = 19.9$  mm, a qual está solidariamente ligada a uma calha suporte (Peça 03) que lhe confere maior rigidez. Anteriormente à estrutura de suporte está colocado o motor de marca KUPER, apresentando as seguintes características técnicas: eixo vertical, HP = 0,75, RPM = 3000, Campo = 190, Motor = 160, Volts = 0,4 AMP, Volts = 4 AMP. O motor imprime movimento ao Cilindro Rotatório através de uma polia colocada inferiormente. Junto à calha suporte foi colocado um nível de bolha que servisse como referência para colocar o Cilindro Rotatório na vertical, utilizando-se dos pés colocados na base da estrutura de suporte.

---

\* Veja as figuras ilustrativas da descrição do equipamento em ANEXO.

O Cilindro Rotatório apresenta na sua porção inferior uma polia, através da qual ele é acionado pelo motor. Essa polia é fixada ao eixo vertical do cilindro por um sistema porca-parafuso com sextavado interno, apresentando uma chaveta que imprime rotação simultânea: eixo vertical - polia. O eixo vertical (Peça 29) é apoiada sobre dois rolamentos rígidos de esferas com placas de proteção tipo SKF 6202 colocados no interior de uma caixa de rolamentos (Peça 28) a qual é fixada à estrutura de suporte por meio de quatro parafusos com sextavado interno. Na parte superior do eixo vertical foi projetado um cone macho e fêmea utilizando-se do sistema inglês. Tal sistema de fixação permite antever a ocorrência de baixas vibrações, uma vez prevista a sua confecção com padrões bastante rígidos, utilizando-se inclusive retificação cilíndrica. O eixo vertical apresenta uma saliência que retém a porca de fixação (Peça 27) e um anel elástico (RHENO - tipo E DIN 471) para que a porca de fixação funcione como porca extratora entre o macho e a fêmea.

O suporte inferior do Cilindro Rotatório (Peça 26), além do sistema de fixação cone macho e fêmea, apresenta superfícies de centragem que garantem a colocação adequada do copo. Tanto o suporte inferior quanto a porca de fixação apresentam ranhuras hexagonais que permitem a utilização de chave gancho nas operações de fixação e separação Cilindro Rotatório - eixo. O eixo vertical, foi confeccionado em aço 1020, sofrendo posteriormente tratamento em níquel-cromo. O copo do Cilindro Rotatório (Peça 23), a princípio projetado em acrílico, devido ao alto custo desse material, passou a ser confeccionado com resina de poliéster, curada usando uma quantidade de catalisador adequada em um cilindro com dimensões convenientes, sendo posteriormente usinada com os cuidados que esse tipo de material exige. A fixação do copo ao suporte superior e inferior é feita por meio de quatro parafusos com sextavado interno em cada secção, sendo a centragem garantida pela confecção de duas superfícies de centragem junto ao copo. O suporte superior (Peça 18) foi confeccionada em latão, sofredendo posteriormente um banho de níquel-cromo. Esta peça também apresenta duas superfícies de centragem, uma em relação ao copo outra em relação à tampa. Não havia sido previs

ta vedação entre o copo e o suporte superior, no entanto, logo nos primeiros ensaios, ocorreram problemas que levaram à utilização de um adesivo para juntas. A vedação entre a tampa e o suporte superior é feita utilizando-se de  $\bar{o}$ -ring OR1-238 disposto em rasgo de dimensões apropriadas. A tampa (Peça 17) apresenta superfície de centragem em relação ao suporte superior e é fixada ao mesmo por meio de quatro parafusos borboleta. Devido à dificuldade em separar a tampa do suporte superior, uma vez que a superfície de centragem é feita com muita precisão, foram projetadas duas roscas dispostas diametralmente na tampa, que permitem a introdução de dois desses parafusos borboleta, para que funcionassem como extratores. A tampa apresenta ainda um encaixe para um rolamento rígido de esferas com placa de proteção tipo SKF 6004 que lhe permite giro em relação às partes fixas do sistema, quando colocado em funcionamento o Cilindro Rotatório. O rolamento é protegido por meio de uma arruela (Peça 15) a ele justaposta. Subjacente ao corpo-de-prova foi projetado um cilindro (Peça 25), com o intuito de abrandar o efeito da superfície inferior do copo sobre a distribuição das tensões de cisalhamento atuantes no corpo-de-prova. Tal cilindro é preso por meio de uma rosca interna a um eixo vertical torneado solidariamente à peça fixa superior à estrutura de suporte (Peça 10). O conjunto ao qual pertence o corpo-de-prova é fixado por meio de uma rosca a um tubo (Peça 13) preso por um parafuso com sextavado interno ao sistema de transmissão de torque. Tal tubo passa através da peça fixa inferior à estrutura de suporte do aparelho (Peça 12), utilizando-se de dois rolamentos rígidos de esferas com placas de proteção tipo SKF 6202. O corpo-de-prova é revestido em suas extremidades superior e inferior por duas membranas do tipo usado em equipamentos triaxiais, com altura da ordem de 2cm. O objetivo de tais membranas é evitar a erosão concentrada, existente nas extremidades do corpo-de-prova, o que influenciaria nos resultados obtidos. Acima do corpo-de-prova se encontra um cilindro (Peça 20), de mesma finalidade que o inferior, preso por meio de um tubo (peça 19) colocado internamente à tampa de retenção (Peça 14), a qual se encontra solidária a peça fixa inferior à estrutura de suporte do aparelho. A peça fixa inferior à estrutura de suporte (Peça 12) é constituída de um cilindro feito em

aço inoxidável com encaixe superior e inferior para dois rolamentos blindados tipo SKF 6202. Imediatamente acima se encontra o sistema de transmissão de torque constituído pela base (Peça 11), o tubo cilíndrico (Peça 09) e a polia transmissora de torques (Peça 08) unidos entre si por meio de parafusos. A polia transmissora de torques encontra-se ligada por uma fina corda de nylon a um dinamômetro Correx 0-100g que se encontra preso ao suporte móvel ao eixo vertical (Peça 05). A medida de torques, realizada dessa maneira, apresenta uma vantagem de ordem prática muito grande em relação ao sistema de medida desenvolvido para o protótipo (Fotografia 2), pois durante a realização dos ensaios só ocorre a variação de um dos braços. O suporte móvel ao eixo vertical tem facultado seu deslocamento, porém, uma vez iniciado o ensaio, ele é fixado ao eixo por meio de um parafuso (Peça 38).

### 2.3. Estudo hidráulico do Cilindro Rotatório

Para que se pudesse fazer uma primeira avaliação da eficiência do ensaio Cilindro Rotatório em representar o fenômeno de erosão que ocorre em canais, foi realizado um estudo acerca de suas condições de escoamento hidráulico, estabelecendo paralelo, na medida do possível, com as existentes em canais. Um estudo das condições de escoamento hidráulico entre dois cilindros concêntricos já havia sido feito buscando basicamente avaliar o efeito da força centrífuga sobre a turbulência<sup>11</sup>. Em tal estudo foi determinado o número de rotações crítico ( $N_{crit}$ ) que estabelecea transição entre o escoamento laminar e o escoamento turbulento com diferentes relações entre o raio externo ( $r_e$ ) e o raio interno ( $r_i$ ). A transição é determinada pela perda da linearidade da relação entre o  $\log(G/\rho N^2)$  e o  $\log(N\rho/\mu)$  ( $N$  = número de revoluções por segundo,  $G$  = torque,  $\rho$  = massa específica,  $\mu$  = viscosidade dinâmica) quando se passa do regime laminar, onde se obedece a equação de Navier-Stokes, para o regime turbulento. Os resultados encontram-se no quadro 1.

**QUADRO 1 - Transição entre o escoamento laminar e o turbulento entre dois cilindros concêntricos.**

$X = \frac{r_i}{r_e}$	$N_{\text{crít}}$ (rotações p/minuto)
0,973 .....	431
0,960 .....	294
0,946 .....	274
0,923 .....	308
0,909 .....	352
0,886 .....	383
0,851 .....	410
0,790 .....	582

O equipamento desenvolvido nesse trabalho possui:

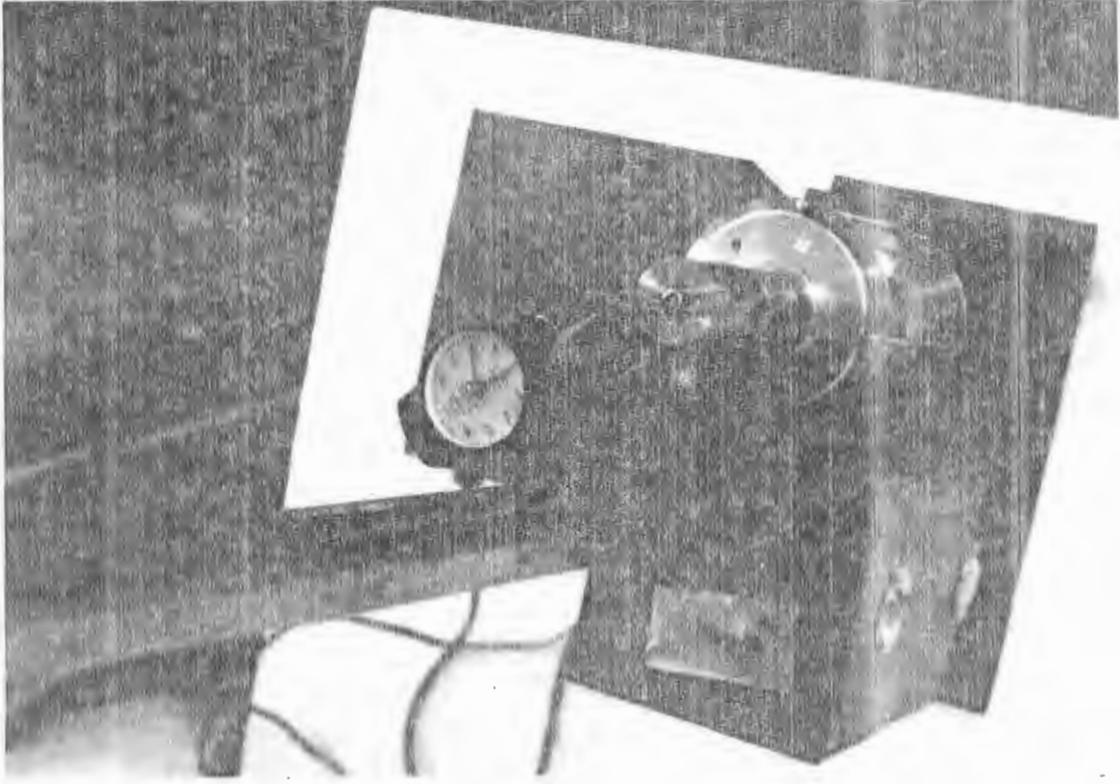
$$r_e = 4,7 \text{ cm} \quad \text{e} \quad r_i = 3,85 \text{ cm};$$

em consequência o valor de  $x$  é aproximadamente igual a 0,82. Tomando os valores da tabela acima para  $x = 0,851$  e  $x = 0,790$ , interpolando linearmente, teremos para  $x = 0,82$ ,  $N_{\text{crít}} = 496$  rotações por minuto.

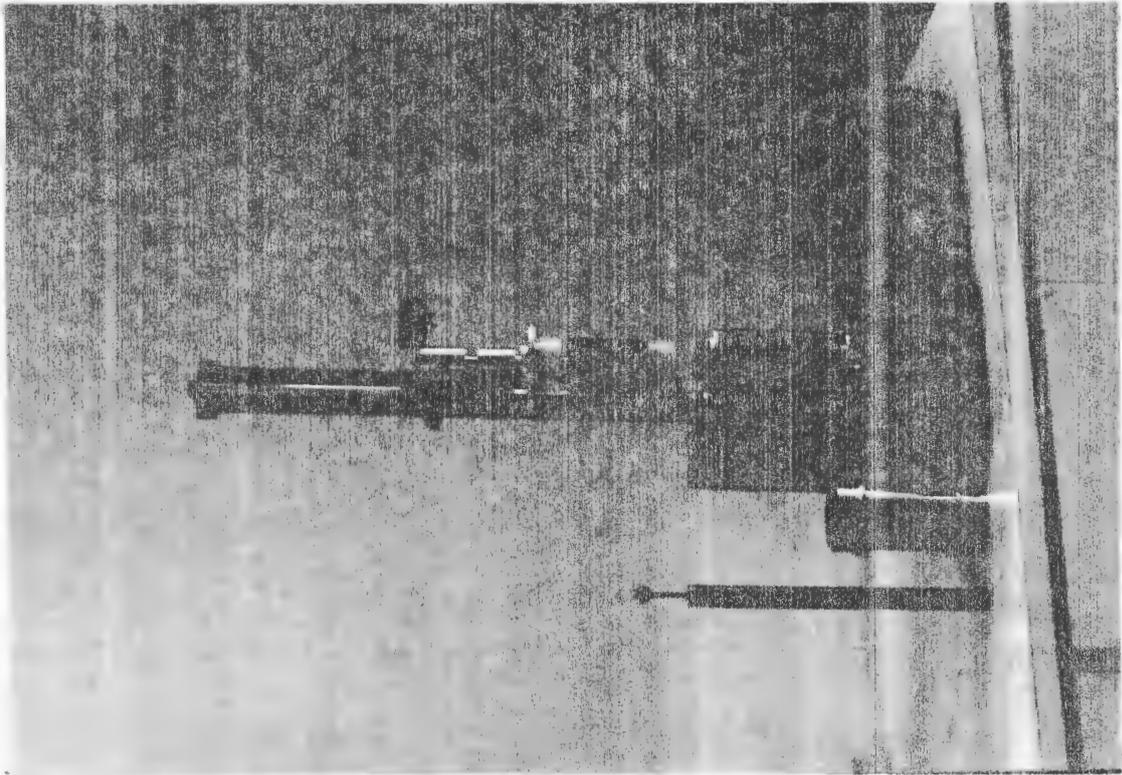
As velocidades de rotação utilizadas no ensaio, mesmo as que imprimem tensões de cisalhamento mais baixas, correspondem a canais de menor altura de lâmina d'água e mais baixa declividade, são bastante superiores a esse valor. Logo, o regime turbulento se encontra presente em todos os ensaios. Tal situação não é diferente em canais usados para irrigação, onde o número de Reynolds ( $R_e = UR/\nu$  para escoamentos com superfície livre, onde  $U$  é a velocidade média,  $R$  o raio hidráulico e  $\nu$  o coeficiente de viscosidade cinemática) assume valor muito maior que 500, limite este superior para que ocorra regime laminar em canais<sup>6</sup>. Medida igualmente importante seria a identificação do tipo de regime turbulento (liso ou rugoso) existente tanto em canais como no ensaio. No entanto, as informações coletadas não permitem que se chegue a

conclusão do assunto, por enquanto, por não fornecerem elementos suficientes.

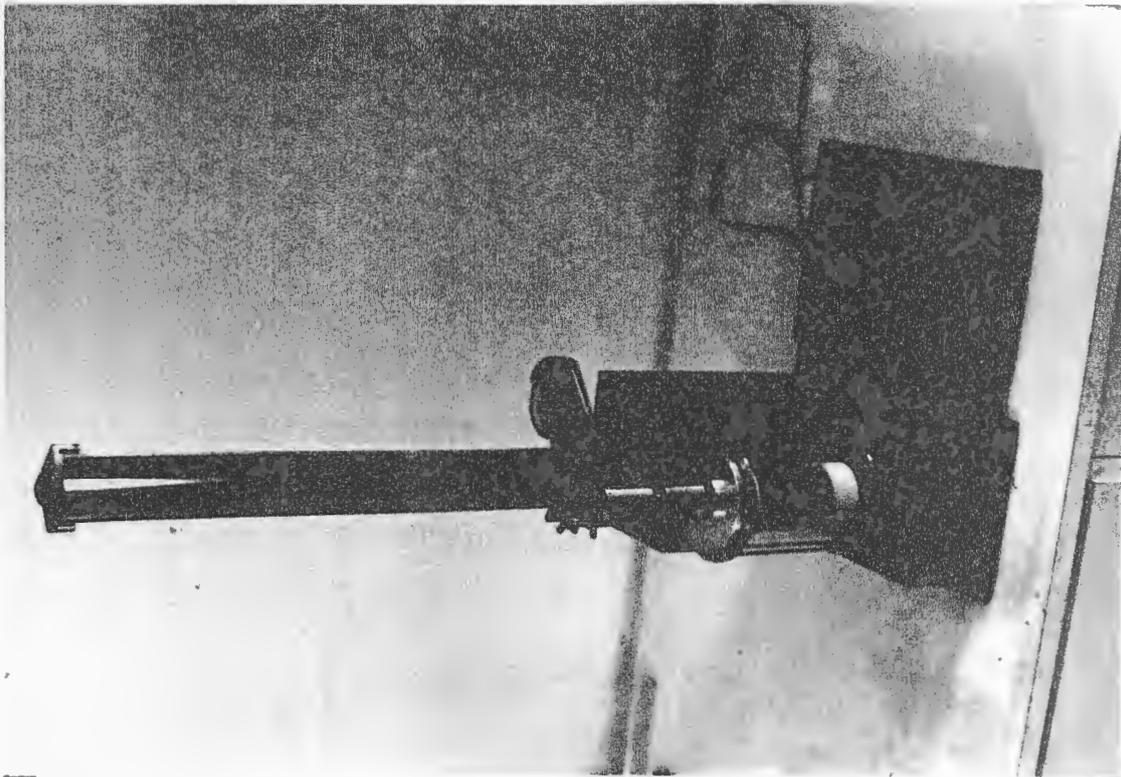
Ainda acerca das condições de escoamento, seria interessante observar a distribuição das tensões de cisalhamento hidráulica ao longo do cilindro. A inspeção visual de corpos-de-prova indicava erosões localizadas nos extremos, sugerindo a existência de uma concentração de tensões nas bordas. Diferentes alternativas foram estudadas: por exemplo a instrumentação com tubos de Pitot, inviabilizada devido as dimensões reduzidas do aparelho. A única alternativa que mostrava possibilidades promissoras, a utilização de Raio Laser, por exigir tecnologia muito avançada, ainda de difícil acesso no Brasil, impossibilitaria tornar efetivo qualquer estudo acerca da questão. Na ausência desses resultados, uma opção encontrada foi a colocação de membranas na parte superior e inferior dos corpos-de-prova, permitindo que se trabalhasse com um trecho central do corpo-de-prova, onde presumivelmente a distribuição de tensões seria mais uniforme. O exame atento dos corpos-de-prova ensaiados (Fotografia 7) mostra um padrão de erosão bastante uniforme ao longo de sua altura, sugerindo a validade do acima exposto.



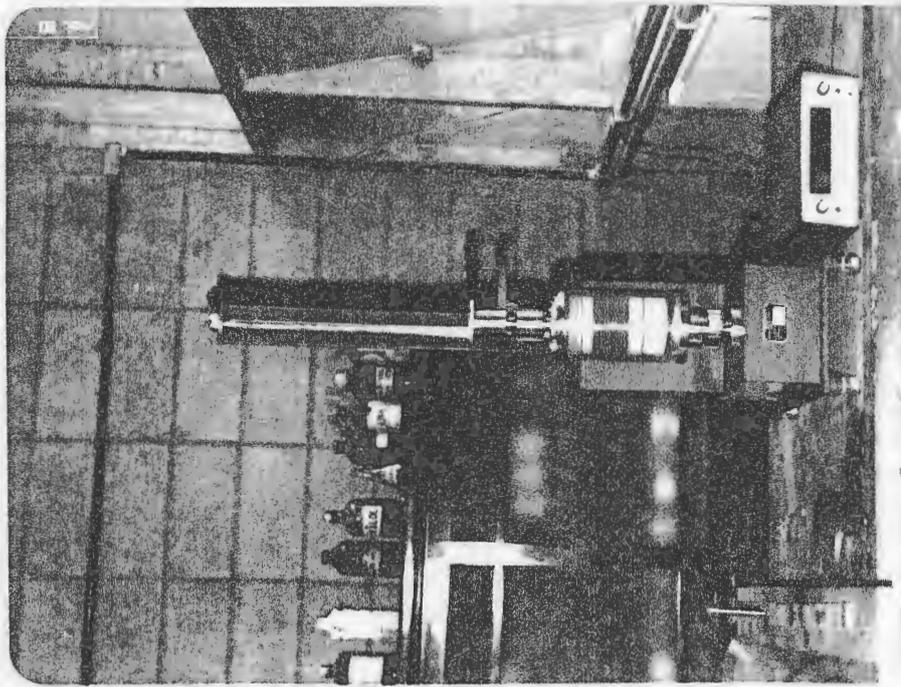
Fotografia 02  
Protótipo Cilindro Rotatório



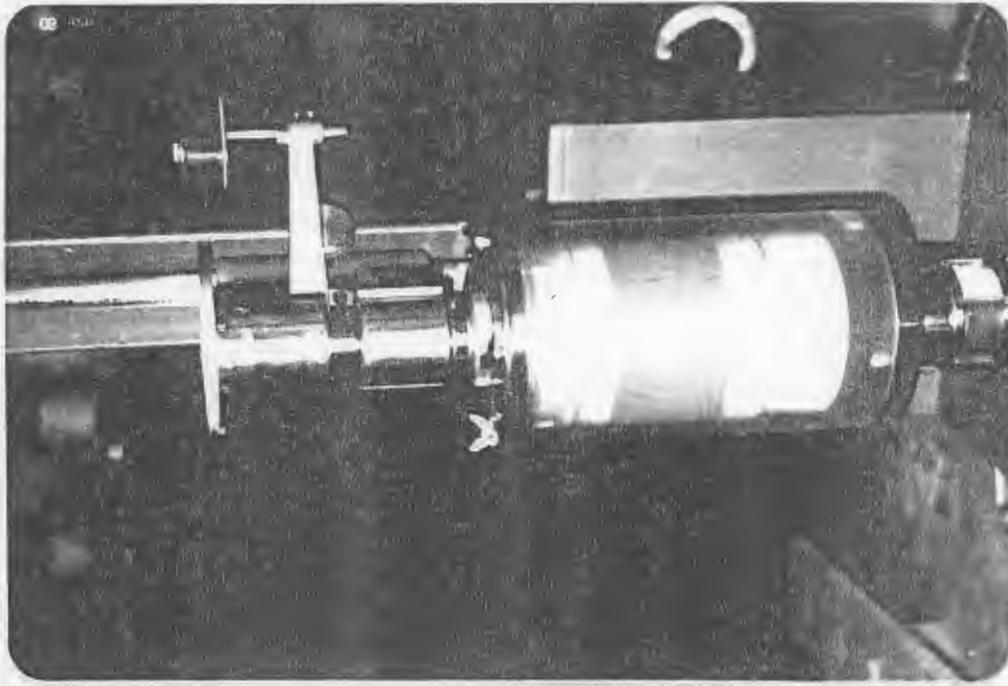
Fotografia 01  
Protótipo Cilindro Rotatório



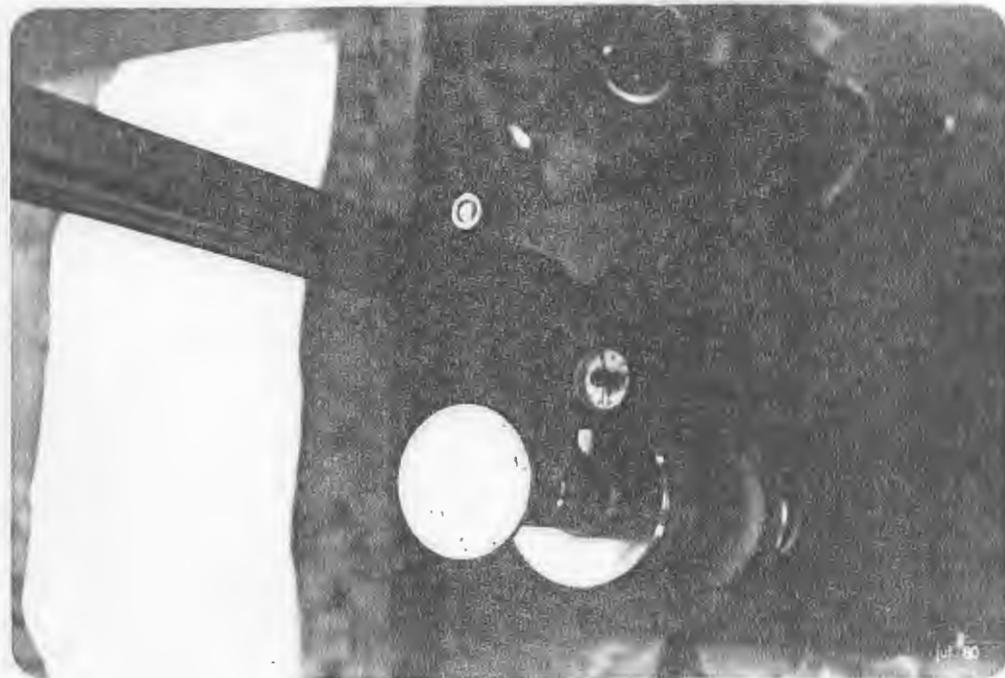
Fotografia 03  
Protótipo Cilindro Rotatório



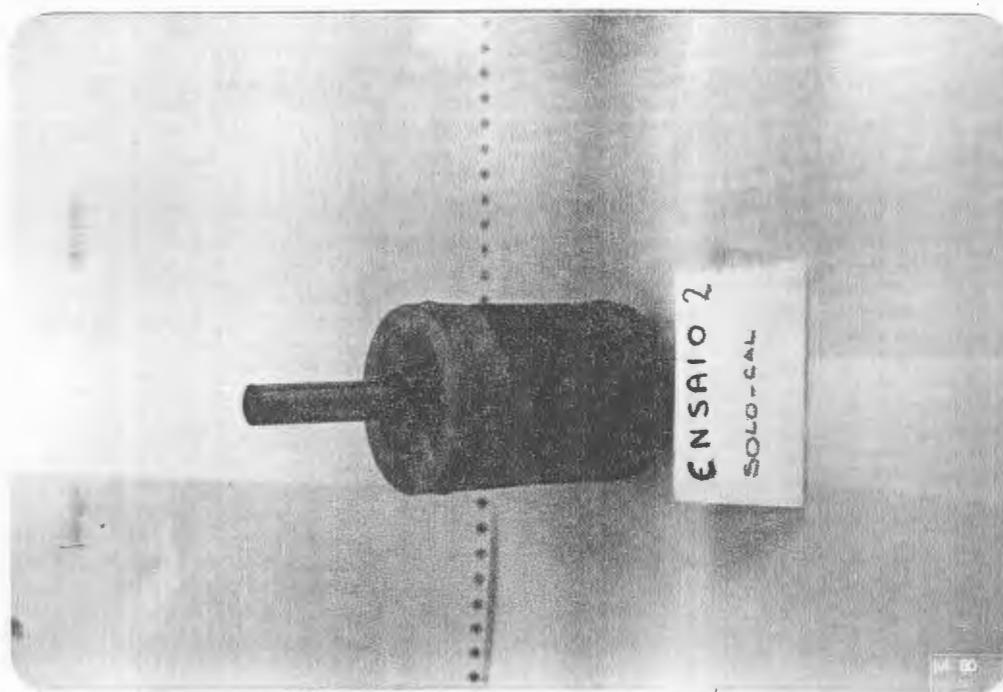
Fotografia 04  
Concepção Final Cilindro Rotatório



Fotografia 06  
Concepção Final Cilindro Rotatório



Fotografia 05  
Concepção Final Cilindro Rotatório



Fotografia 07  
Corpo-de-Prova Ensaiado

ESCOLA DE ENGENHARIA  
RIO DE JANEIRO

### 3. METODOLOGIA PARA REALIZAÇÃO DOS ENSAIOS

#### 3.1. Corpos-de-prova

##### 3.1.1. Molde para a confecção dos corpos-de-prova\*

Uma vez que o corpo-de-prova apresenta dimensões diferentes dos utilizados em ensaios de rotina, se tornou necessário o desenvolvimento de um molde adequado. Além de apresentar dimensões não usuais, tal molde deveria incluir em seu interior o eixo do corpo-de-prova para que se desenvolvesse a necessária aderência corpo-de-prova/eixo durante a moldagem, visto que a mesma seria insuficiente, prejudicando o desenvolvimento dos ensaios, se o corpo-de-prova fosse moldado inteiro e posteriormente vazado. O equipamento de moldagem pode ser visualizado na Figura 10 e nas fotografias 8 e 9, em perspectiva explodida. A sua parte inferior consiste de um cilindro (Peça 36), confeccionado em aço inoxidável, de considerável peso, de modo a conferir estabilidade ao conjunto. Tal cilindro é vazado no seu interior, permitindo a introdução de parte do eixo o qual fica preso inferiormente através de um parafuso de fixação (Peça 38). Tal sistema de fixação evita que o eixo oscile durante a compactação, o que acarretaria prejuízo para o desenvolvimento da aderência corpo-de-prova/eixo. O eixo (Peça 22) é constituído de um tubo com rosca interna em uma face e rosca externa na outra. A rosca interna serve para fixá-lo à parte inferior do equipamento de moldagem durante a confecção do corpo-de-prova e ao Cilindro Rotatório durante a realização dos ensaios. A rosca externa é utilizada para colocar-se uma porca (Peça 24) após a realização da moldagem, que é cuidadosamente girada, desenvolvendo maior aderência entre o corpo-de-prova e as placas de apoio superior e inferior (Peça 21). Apresenta ainda o eixo um cordão de solda que restringe o seu deslocamento para o interior do cilindro maciço. A parede la

---

\* Veja as figuras ilustrativas da descrição do molde em ANEXO.

teral do equipamento de moldagem (Peça 35) trata-se de um tubo dividido em duas geratrizes diametralmente opostas, constituindo o que se costuma designar por duas telhas. Para facilitar a desmoldagem não seria recomendável o uso de óleo tipo WD 40 ou lubrificante silicone aerosol, prática usual em laboratórios, pois esses produtos poderiam afetar a superfície dos corpos-de-prova, gerando incertezas acerca da validade dos resultados obtidos. Para contornar esse problema foi utilizado com sucesso papel-alumínio, embora não se tivesse notícia de seu emprego, para fim semelhante, em outros laboratórios. Para dar maior rigidez ao conjunto constituído pelas duas telhas foram projetadas braçadeiras (duas) (Peça 39), que evitam o deslocamento das paredes laterais durante a compactação. Na parte superior do molde é justaposto um anel sobressalente (Peça 34), desempenhando mesma função que o existente no ensaio de compactação Proctor Normal. Para facilitar a sua retirada, após a compactação, a superfície de contato com as telhas é convenientemente lubrificada com silicone aerosol. Ainda no equipamento de moldagem, é utilizada uma rolha junto ao eixo na sua porção superior, que evita a entrada de material para o seu interior durante a compactação. O soquete utilizado para a moldagem pesa 1,510 kg e tem 20,1 cm de altura de queda.

### 3.1.2. Calibração do equipamento de compactação

Com os solos a serem utilizados nos ensaios de erosão, preparados em umidades próximas às especificadas, foram moldados corpos-de-prova, utilizando-se do molde e soquete anteriormente descritos, variando o número de golpes e o número de camadas. Procurou-se, desse modo, determinar o número de camadas em que era obtida maior homogeneidade de densidades ao longo do corpo-de-prova e o número de golpes necessários para alcançar a densidade seca máxima obtida no ensaio Proctor Normal. Para os diversos solos ensaiados pode ser observado que a utilização de 5 camadas com aplicação de 26 golpes em cada, permitia a obtenção de corpos-de-prova com densidade na faixa requerida a um grau de uniformidade no que diz respeito a densidade seca ao longo do corpo-de-prova (Quadro 2), usual em moldagens de corpos-de-prova por

impacto (PINTO & YAMAMOTO<sup>9</sup>).

**QUADRO 2 - Densidades secas (g/cm<sup>3</sup>) ao longo dos corpos-de-prova**  
**(5 camadas - 26 golpes por camada)**

	corpo-de -prova 1	corpo-de -prova 2	corpo-de -prova 3	corpo-de -prova 4	corpo-de -prova 5
1 <sup>a</sup> camada	1,507	1,546	1,540	1,498	1,537
2 <sup>a</sup> camada	1,564	1,573	1,509	1,510	1,533
3 <sup>a</sup> camada	1,539	1,552	1,580	1,506	1,484

### 3.1.3. Moldagem dos corpos-de-prova

A seguir são listados todas as fases de moldagem dos corpos-de-prova:

- fixação do eixo do corpo-de-prova ao cilindro maciço (Fotografia 10);
- colocação do papel alumínio nas duas telhas (Fotografias 11, 12 e 13);
- colocação das duas telhas sobre o cilindro maciço (Fotografia 14);
- anteriormente à colocação das braçadeiras e do anel sobressalente, pesa-se o conjunto que se constitui em tara de referência;
- colocação das braçadeiras (Fotografia 15);
- anel sobressalente é colocado sobre o molde, aplicando-se silicone aerosol na superfície de contato anel sobressalente-molde (Fotografia 16);
- coloca-se uma rolha sobre o eixo;
- pesa-se a quantia de amostra necessária para a moldagem do

- corpo-de-prova (função da densidade seca especificada e da diferença de umidade entre a natural e a que se quer efetuar a compactação, geralmente entre 900 - 1000 g);
- acrescenta-se a quantia de cal desejada (3% no nosso caso), homogeneizando a amostra com auxílio da peneira nº 4;
  - acrescenta-se a água necessária, homogeneizando a amostra posteriormente;
  - sobre a amostra coloca-se um pano úmido na sua porção superior, evitando a perda de umidade durante a realização do ensaio;
  - pesa-se o material necessário para uma camada 202 - 217 g, dependendo do tipo de solo;
  - colocação do material no interior do molde e aplicação de leve esforço com o cabo da espátula em toda a superfície da camada (Fotografias 17 e 18);
  - aplicação de 26 golpes p/ camada, 13 por volta (Fotografia 19);
  - antes da colocação da próxima camada, a superfície é esca-rificada, utilizando-se da espátula;
  - repete-se o mesmo procedimento nas 4 camadas subsequentes;
  - a determinação da umidade de moldagem é feita com amostra coletada antes da pesagem do material a ser colocado na 3<sup>a</sup> camada;
  - para facilitar a remoção do anel sobressalente é introduzi-da espátula entre ele e o corpo-de-prova (Fotografia 20);
  - arraza-se a parte superior do corpo-de-prova (Fotografia 21);
  - retiram-se as telhas utilizando a espátula (Fotografia 22);
  - coloca-se a placa de apoio superior do corpo-de-prova jun-to com a porca de fixação;
  - destaca-se o conjunto constituído pelo corpo-de-prova do cilindro maciço, desatarraxando-se o parafuso que os mantém solidários;
  - o corpo-de-prova assim obtido é colocado no moldador do tri-axial onde é talhado cerca de 2 mm em seu diâmetro, adqui-rindo uma maior rugosidade (Fotografias 23 e 24);
  - corpo-de-prova é colocado em saco plástico e procedida a cu-ra em estufa a 50°C durante vinte e quatro horas (Fotogra-

fia 25);

- extraídos da cura os corpos-de-prova, sofrem aspensão cuidadosa e posterior imersão em água para saturação (24 hs) (Fotografias 26 e 27);

### 3.2. Montagem dos ensaios

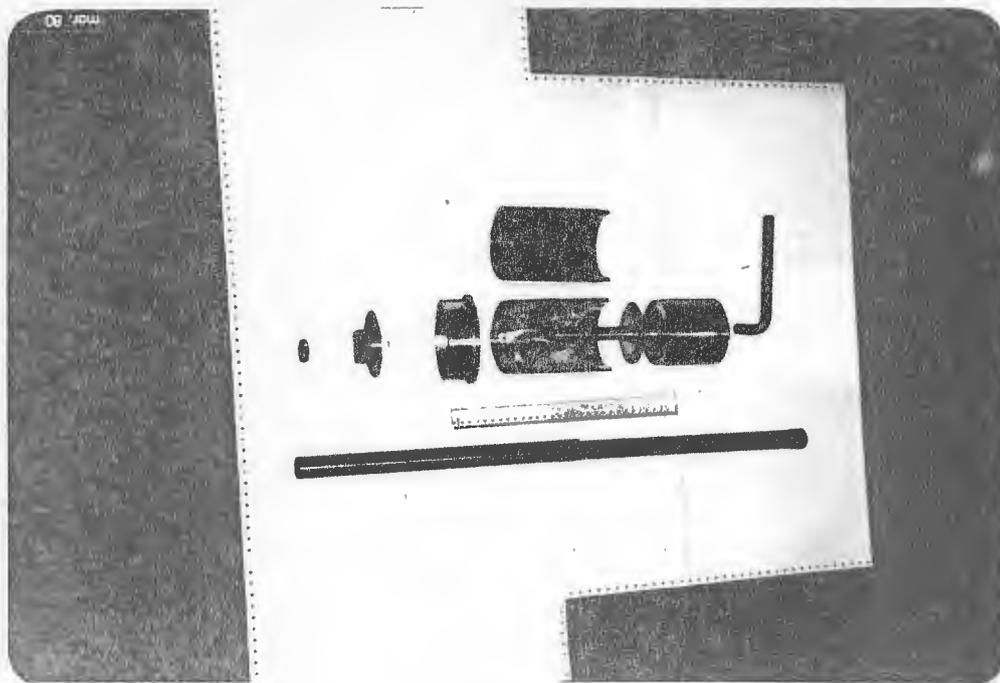
- retira-se o corpo-de-prova do tanque de imersão;
- coloca-se a membrana de borracha no cilindro situado acima do corpo-de-prova;
- fixa-se o corpo-de-prova ao conjunto (Fotografia 28);
- eventuais imperfeições no corpo-de-prova nas zonas em que se apresenta coberto pelas membranas são preenchidas com bentonita (Fotografia 29). A presença de tais descontinuidades no corpo-de-prova afetaria muito as condições de fluxo da água;
- coloca-se a membrana superior sobre o corpo-de-prova, tomando o cuidado de que ela apresente mesma altura nos diferentes pontos (Fotografia 30);
- aperta-se a porca inferior, desenvolvendo aderência entre o corpo-de-prova e as placas de apoio inferior e superior. Esta operação deve ser feita com todo cuidado para o corpo-de-prova não fissurar (Fotografia 31);
- coloca-se a membrana na porção inferior do corpo-de-prova (Fotografia 32);
- dispõe-se os anéis elásticos de fixação das membranas;
- coloca-se o cilindro situado abaixo do corpo-de-prova (Fotografia 33);
- coloca-se entre 495-500 ml de água no Cilindro Rotatório;
- desloca-se para baixo segundo o eixo vertical a parte superior do Cilindro Rotatório (Fotografia 34);
- fixa-se a tampa ao suporte superior do Cilindro Rotatório por meio de 4 parafusos borboleta (Fotografia 35);

### 3.3. Execução dos ensaios

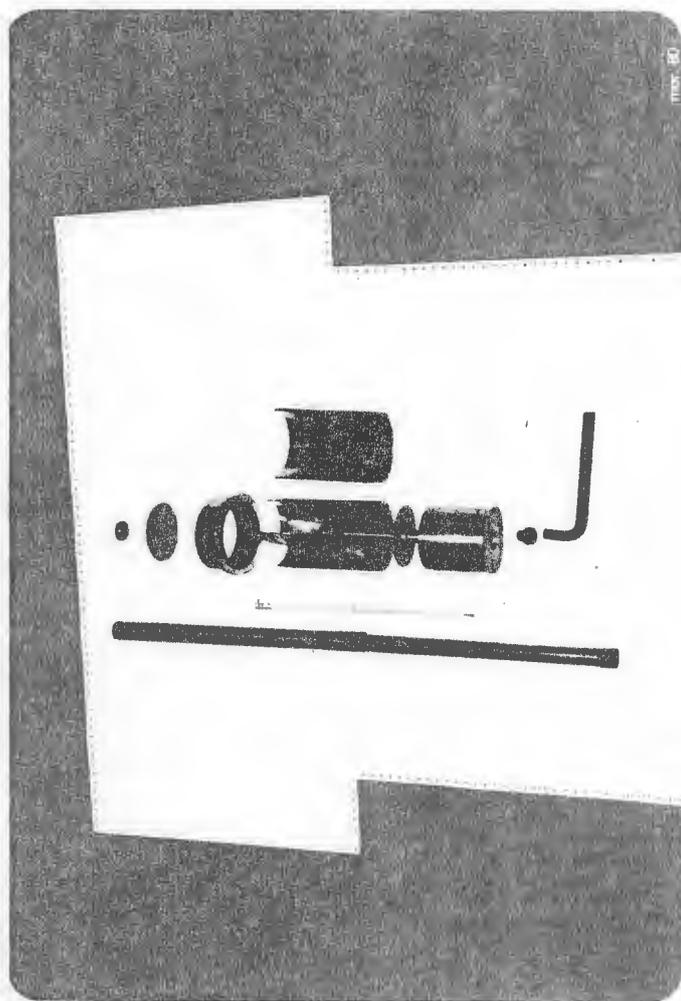
- aciona-se o motor através do comando eletrônico pelo período de 2 minutos, procurando-se, nesse interim, aplicar, fa

zendo variar a velocidade de rotação, a tensão de cisalhamento hidráulica de trabalho. O controle dessa tensão é feito visualmente no sistema de medida de torque (torquímetro);

- para determinar os atritos possíveis no sistema de transmissão corpo-de-prova/torquímetro, a leitura é deslocada manualmente um pouco acima da registrada. Logo a seguir libera-se o torquímetro, observando a leitura  $L_1$  no qual ele estabiliza. Procede-se da mesma forma, deslocando a leitura um pouco abaixo da que está sendo lida e liberando o torquímetro. Desse modo obtém-se o valor de  $L_2$ . A diferença entre as leituras  $L_1$  e  $L_2$  dividido por 2 indica o valor do atrito (A). O torque aplicado ao corpo-de-prova será igual a  $(L_1 + L_2)/2$ . Na maior parte dos ensaios executados durante o desenvolvimento de tese,  $L_1$  apresentou valor idêntico a  $L_2$ , ou seja, o atrito no sistema de transmissão de torque é praticamente nulo. Em realidade, esse sistema apresentando rolamentos em bom estado, o atrito se torna praticamente nulo, servindo o teste, isto sim, para a identificação de rolamentos que apresentem desempenho deficiente e que necessitem ser trocados;
- passados dois minutos o ensaio é interrompido;
- extraem-se os quatro parafusos borboleta colocando dois deles para que funcionem como parafusos extratores;
- levanta-se a parte superior do Cilindro Rotatório após a remoção da fixação Cilindro Rotatório-eixo (Fotografia 36);
- começa-se o ensaio propriamente dito, liga-se o aparelho por dois minutos, controlando a tensão cisalhante aplicada ao corpo-de-prova. Terminado o período de tempo recolhe-se em cápsulas a água mais material erodido (Fotografias 37 e 38);
- as cápsulas são colocadas em estufa 105 - 110°C no período de 24 horas;
- a cápsula mais solo erodido é pesada em balança com precisão de 0,0001 g;
- repetem-se novos períodos (2, 4, 7, 15, 30, 60, 120, 1200 min) de tal modo que se obtenha períodos acumulados de realização do ensaio a 2, 4, 8, 15, 30, 60, 120, 240 e 1440 min.



Fotografia 09  
Equipamento de Moldagem



Fotografia 08  
Equipamento de Moldagem



Fotografia 10  
Fixação do Eixo do Corpo-de-Prova ao  
Cilindro Maciço



Fotografia 11  
Colocação do Papel Alumínio nas  
duas Telhas



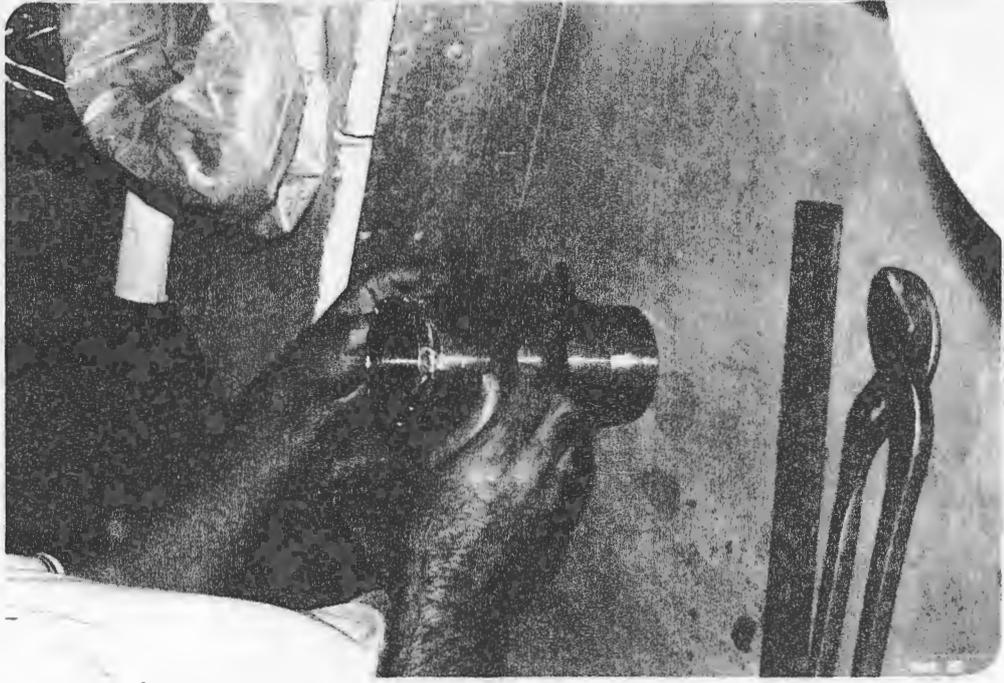
Fotografia 12  
Colocação do Papel Alumínio nas duas Telhas



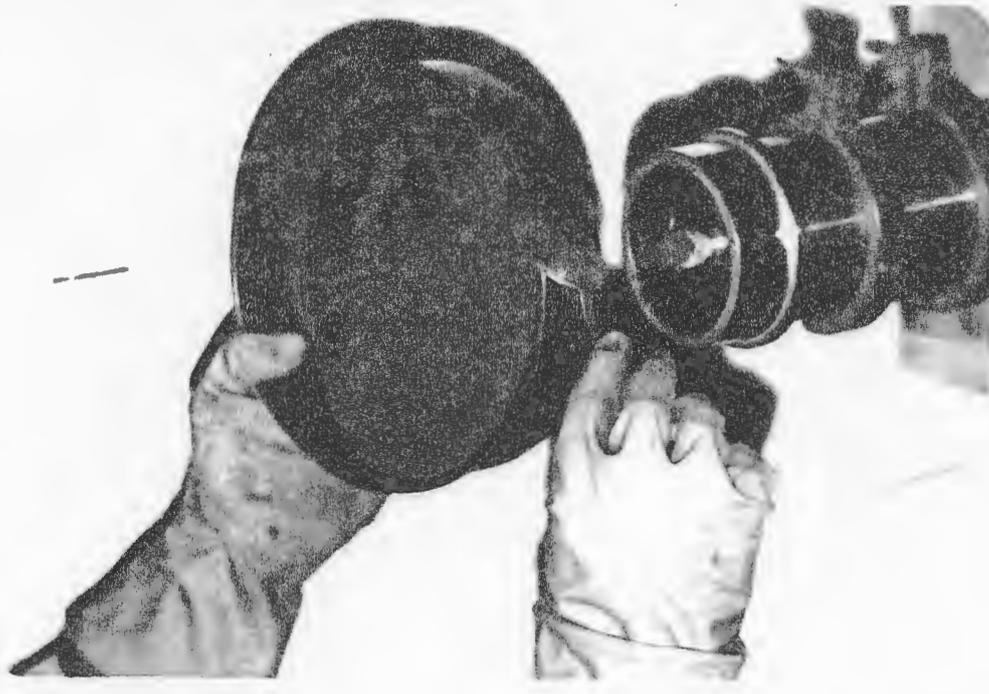
Fotografia 13  
Colocação do Papel Alumínio nas duas Telhas



Fotografia 14  
Colocação das duas Telhas Sobre  
o Cilindro Maciço



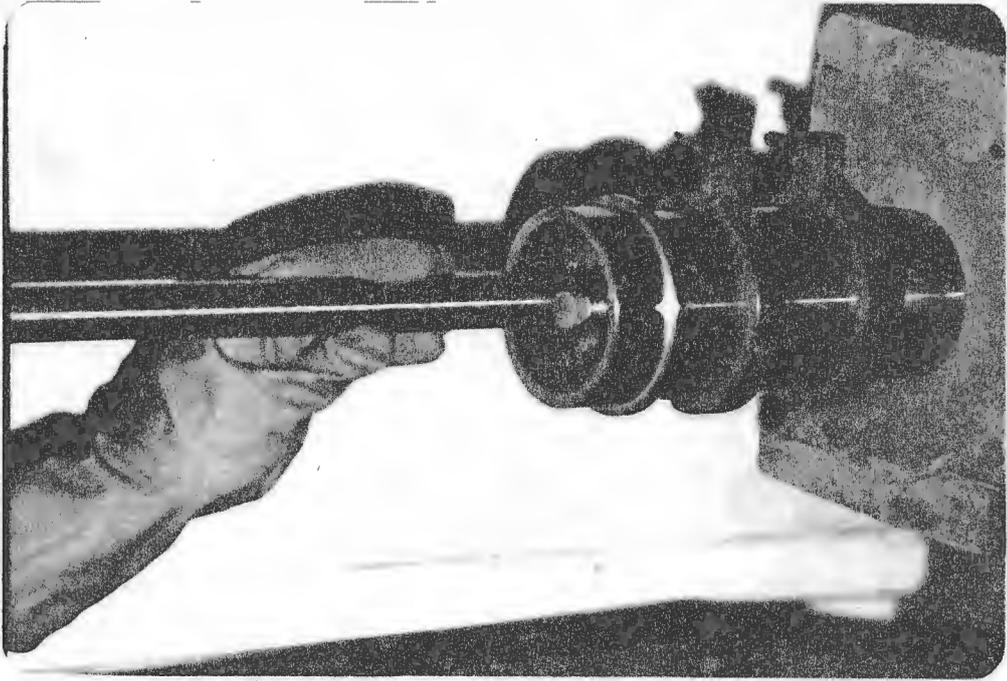
Fotografia 15  
Colocação das Braçadeiras



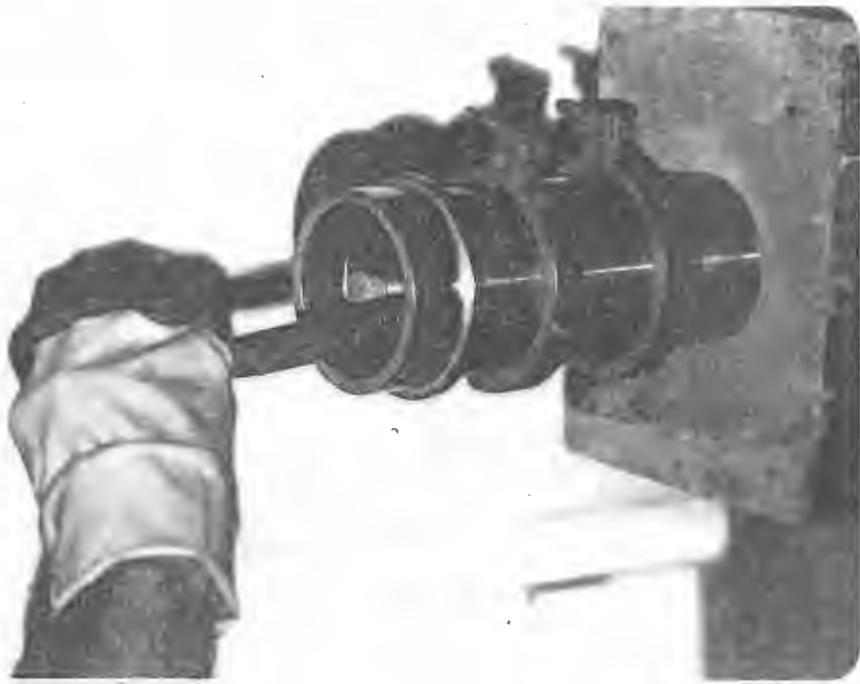
Fotografia 17  
Colocação de Material no Interior do Molde



Fotografia 16  
Aplicação de Silicone Aerosol  
Sobre Anel Sobressalente



Fotografia 19  
Amostra Sendo Compactada



Fotografia 18  
Preparação da Superfície a ser Compactada



Fotografia 20  
Operação Para Extração  
do Anel Sobressalente



Fotografia 21  
Corpo-de-Prova Sendo Arrazado



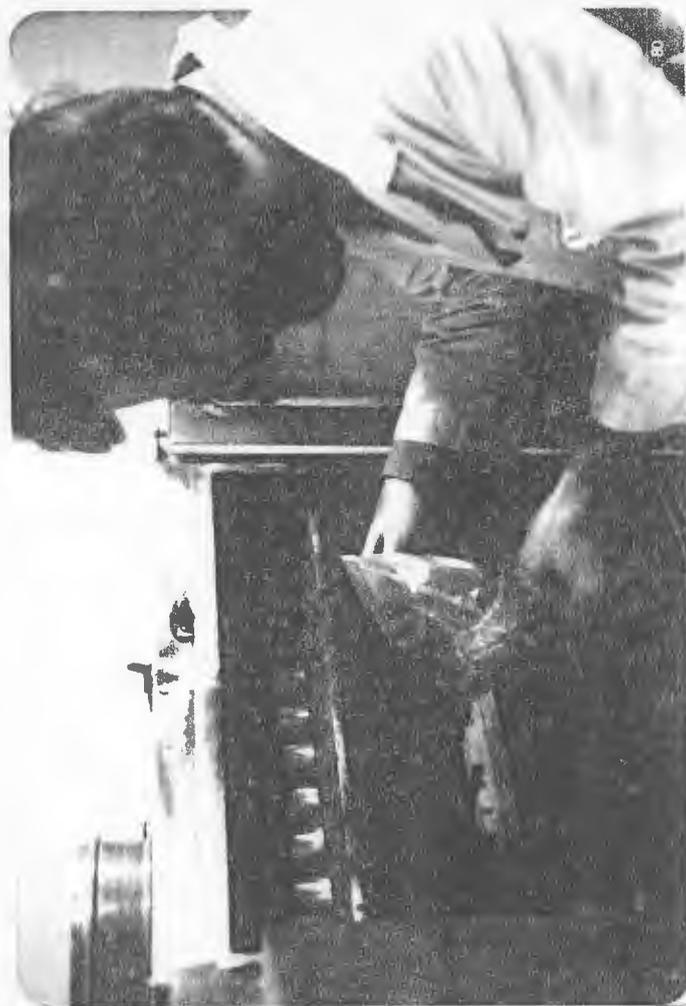
Fotografia 23  
Talragem do Corpo-de-Prova



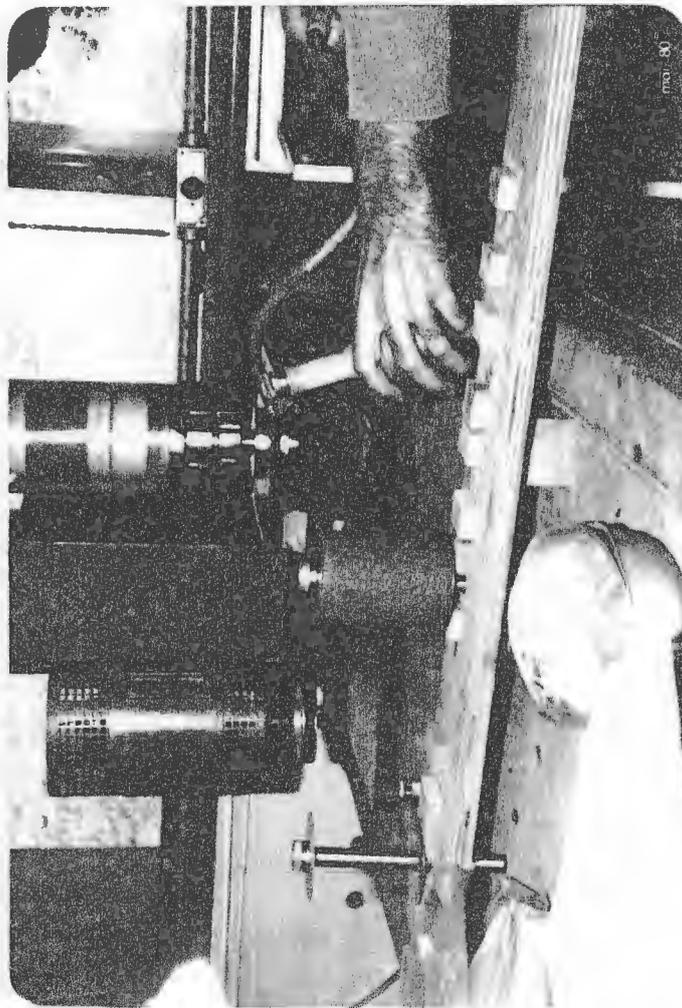
Fotografia 22  
Remoção das Telhas



Fotografia 24  
Talhamo do Corpo-de-Prova



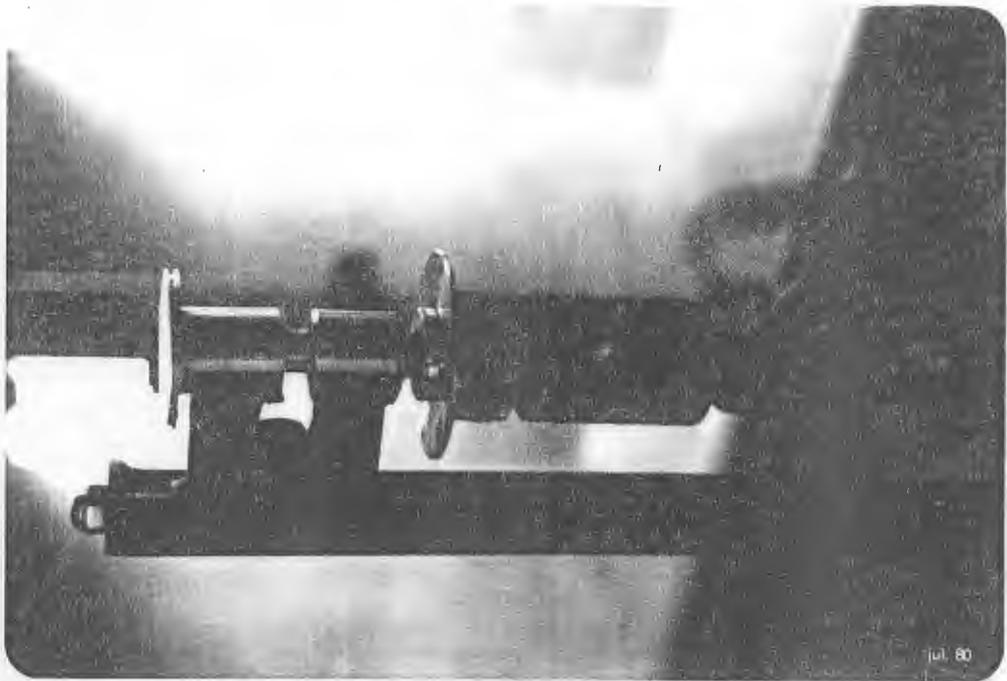
Fotografia 25  
Coloçação do Corpo-de-Prova em Estufa  
Para ser Procedida Cura



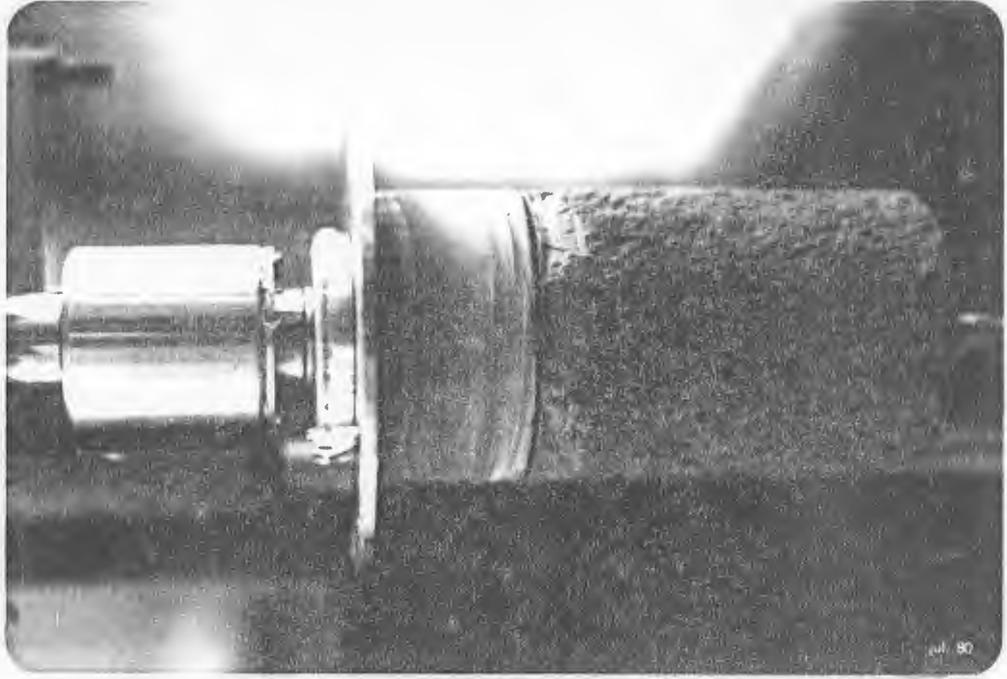
Fotografia 26  
Aspersão Sobre o Corpo-de-Prova



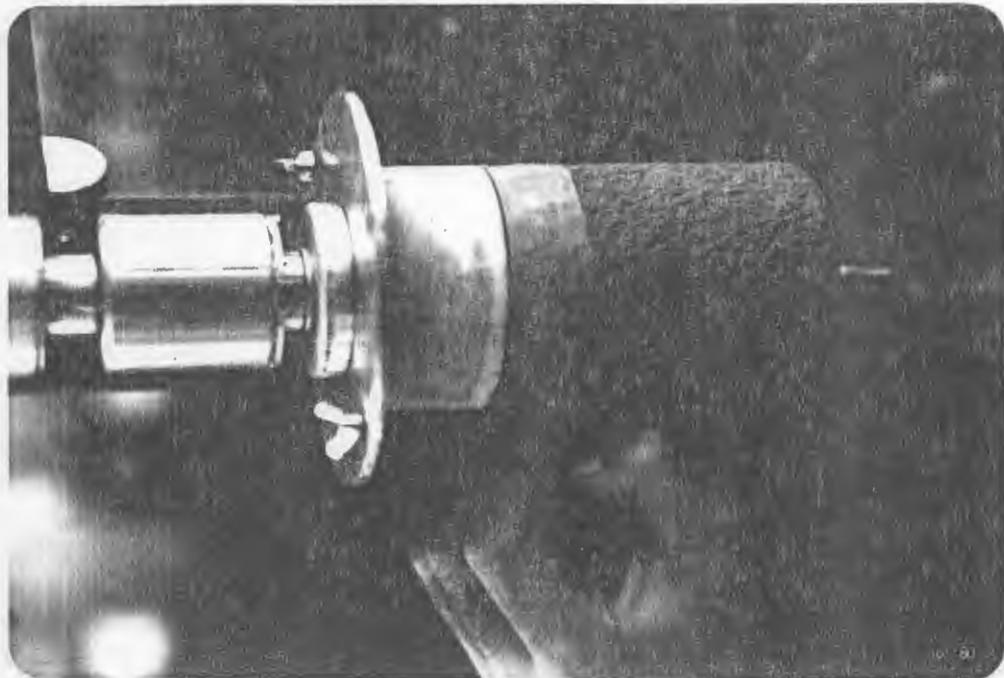
Fotografia 27  
Imersão do Corpo-de-Prova



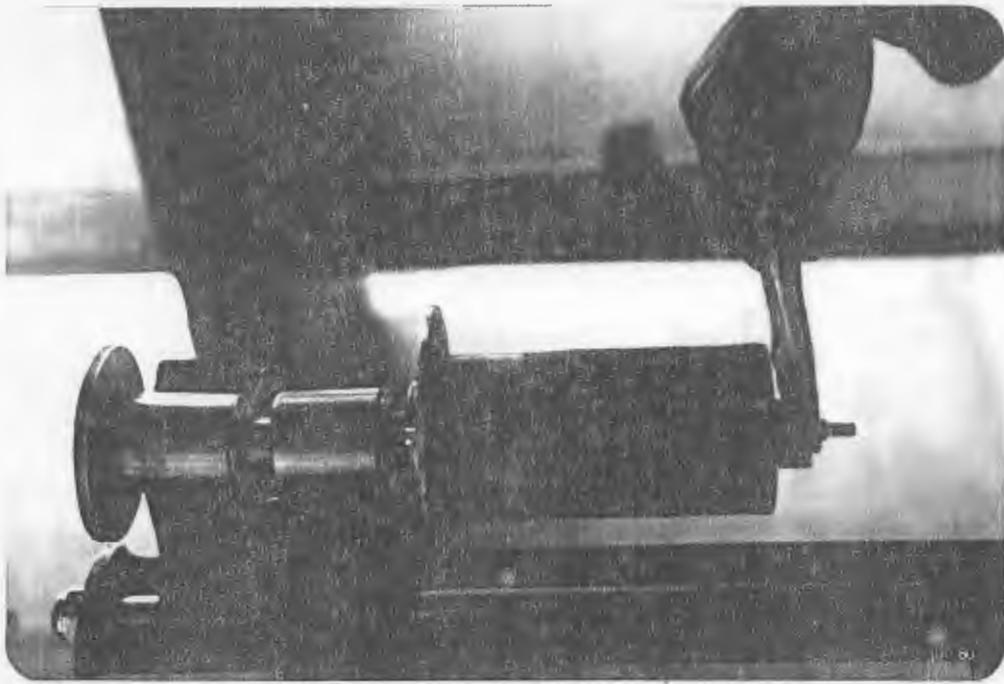
Fotografia 28  
Fixação do Corpo-de-Prova ao Conjunto



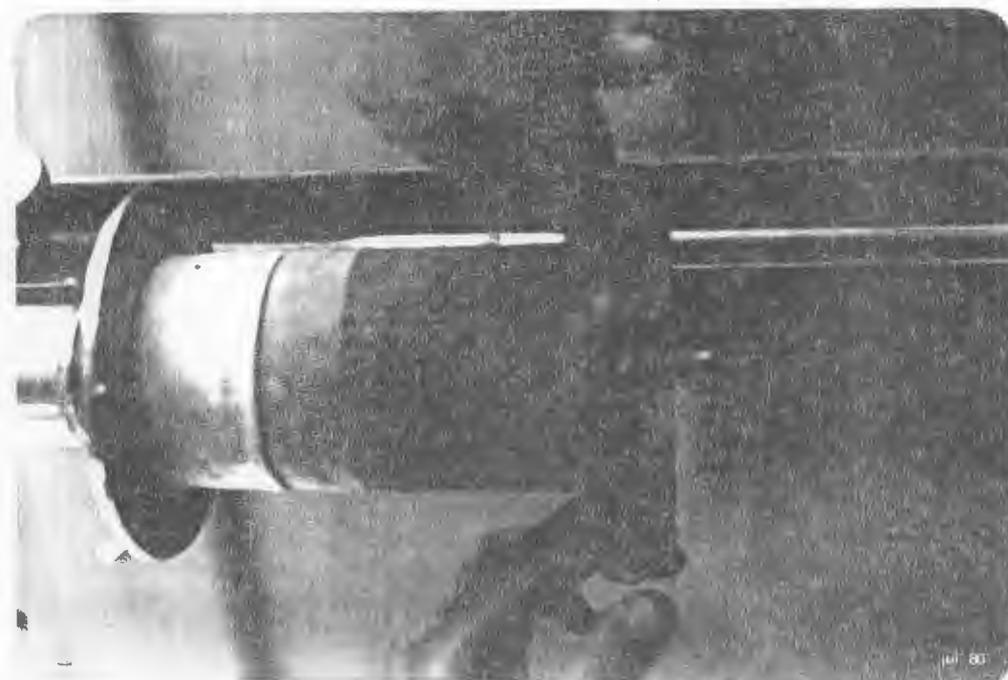
Fotografia 29  
Detalhe de Imperfeição da Extremidade do  
Corpo-de-prova Preenchida com Bentonita.



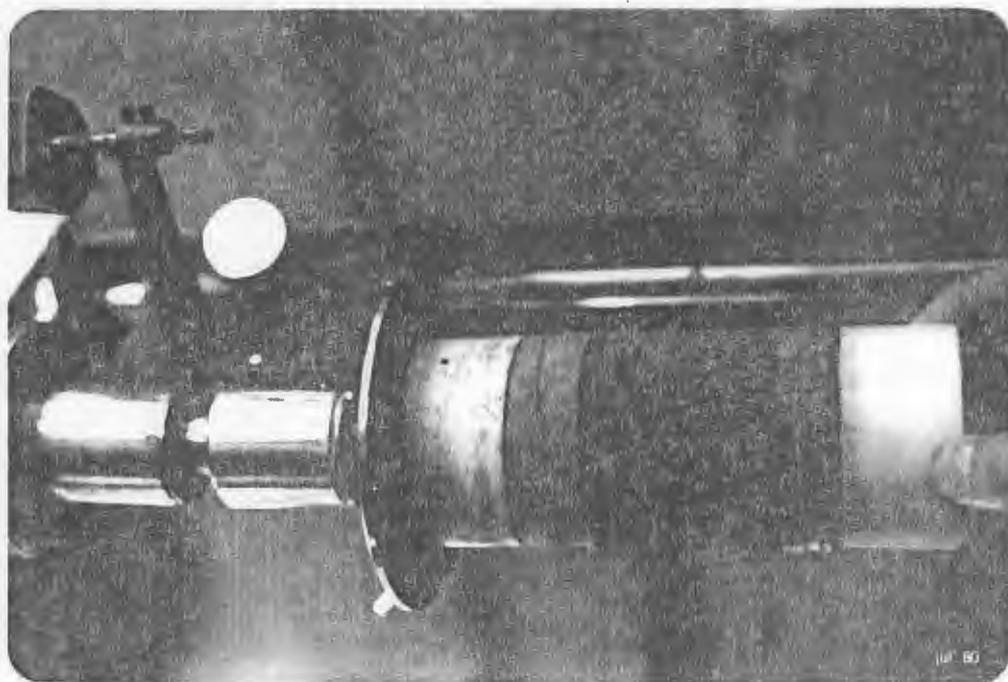
Fotografia 30  
Colocação de Membrana Superior Sobre o  
Corpo-de-Prova



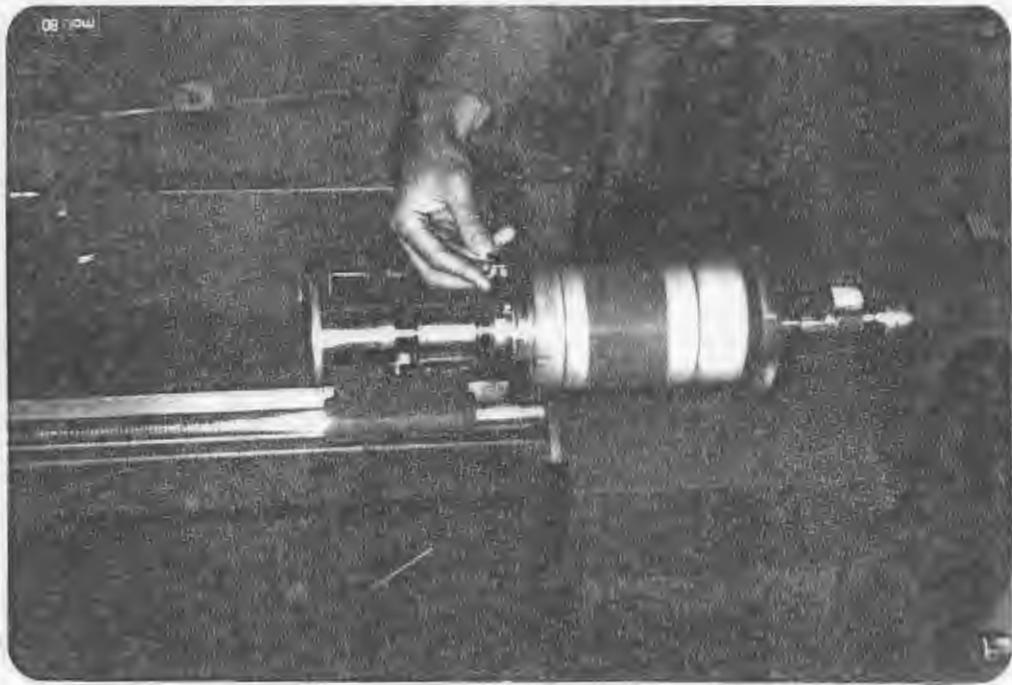
Fotografia 31  
Desenvolvimento de Aderência Entre o  
Corpo-de-Prova e as Placas de Apoio



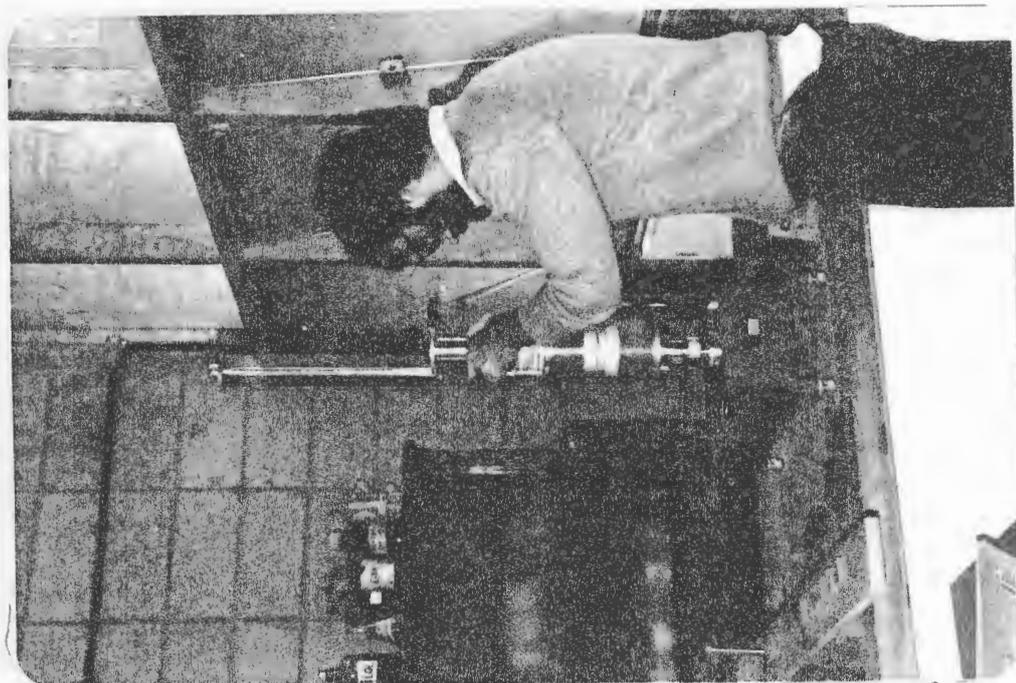
Fotografia 32  
Colocação da Membrana Inferior Sobre o  
Corpo-de-Prova



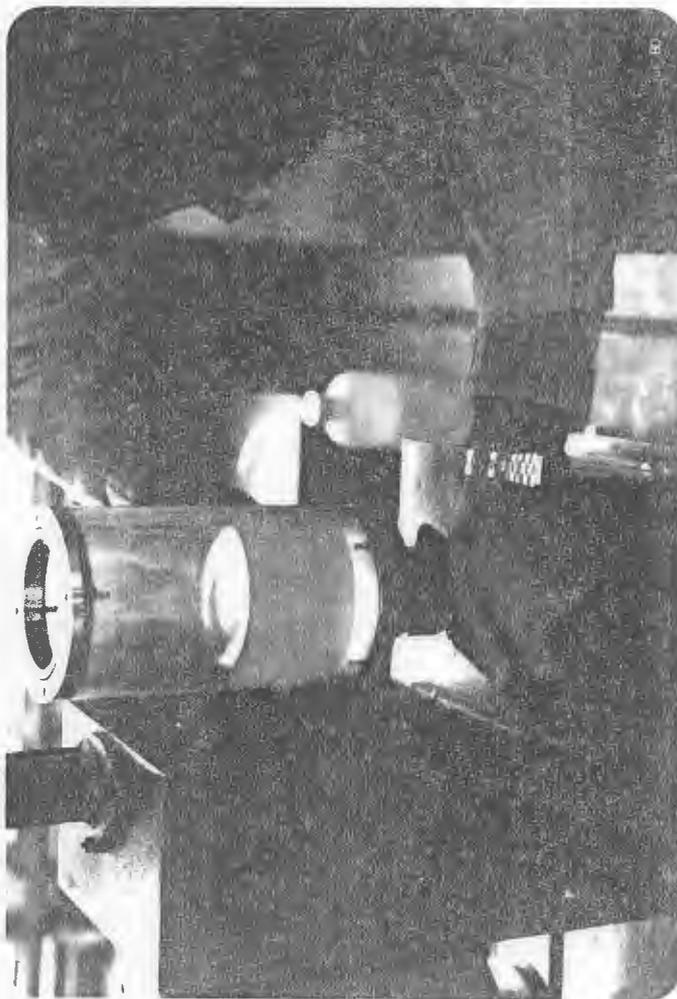
Fotografia 33  
Colocação do Cilindro Inferior ao  
Corpo-de-Prova



Fotografia 35  
 Fixação da Tampa ao Suporte Superior  
 do Cilindro Rotatório



Fotografia 34  
 Deslocamento da Parte Superior do Cilindro  
 Rotatório



Fotografia 36  
Remoção da Fixação Cilindro Rotatório-Eixo



Fotografia 37  
Colocação em Cápsulas do Material Erodido



Fotografia 38  
Colocação em Cápsulas do Material Erodo

### 3.4. Cálculos

#### 3.4.1. Tensão de cisalhamento aplicada ao corpo-de-prova

( $\tau_{\text{aplicada}}$ )

Hipótese: suponha-se distribuição uniforme de tensão ao longo do corpo-de-prova.

Condição de equilíbrio a ser obedecida após o início do ensaio:

$$- \Sigma \text{ Momentos aplicados sobre o corpo-de-prova } (\Sigma M) = 0 \quad (1)$$

mas

$$\Sigma M = M_{\text{aplicado pela água}} - M_{\text{aplicado pelo torquímetro}}$$

substituindo em (1) teremos:

$$M_{\text{aplicado pela água}} - M_{\text{aplicado pelo torquímetro}} = 0 \quad (2)$$

mas

$$M_{\text{aplicado pela água}} = \tau_{\text{aplicado}} \times A_L \times r \quad (3)$$

onde  $\tau_{\text{aplicado}}$  é dado em  $\text{g/cm}^2$ ,  $A_L$  é a área lateral do corpo-de-prova ( $246,49 \text{ cm}^2$ ) e  $r$  é o raio do corpo-de-prova ( $3,85 \text{ cm}$ ). Está implícito em (3) a hipótese de que as tensões tangenciais se aplicam unicamente na parte lateral do corpo-de-prova o que se justifica por ser muito pequena a espessura (cerca de  $1 \text{ mm}$ ) entre as placas de apoio e os cilindros<sup>10</sup>, e

$$M_{\text{aplicado pelo torquímetro}} = L \times b \times c \quad (4)$$

sendo  $L$  a leitura do dinamômetro do ensaio em gramas,  $b$  o braço de alavanca da roldana ( $4,295 \text{ cm}$ ) e  $c$  correção da leitura do dinamômetro em virtude do esforço aplicado não ser ortogonal ao seu braço (Quadro 3). Substituindo (3) e (4) em (2) teremos:

$$\tau_{\text{aplicado}} \times A_L \times r - L \times b \times c = 0 \quad (5)$$

de onde se extrai:

$$\tau_{\text{aplicado}} = \frac{L \times b \times c}{A_L \times r} \quad (6)$$

substituindo  $b$ ,  $A_L$  e  $r$  por seus valores teremos:

$$\tau_{\text{aplicado}} = 4,526 \times 10^{-3} \times L \times c \text{ (g/cm}^2\text{)} \quad (7)$$

### 3.4.2. Área lateral útil ( $A_{Lu}$ )

Para que os diferentes ensaios possam ter resultados comparáveis é necessário que se divida a quantia de erosão em grammas pela área do corpo-de-prova realmente exposta a ação erosiva do fluxo d'água, obtendo desse modo um valor de erosão específica ( $\text{g/cm}^2$ ). Com esse objetivo eram feitas leituras, antes da realização dos ensaios, de alturas expostas em 3 ou 4 geratrizes do corpo-de-prova que permitiam determinar um valor de altura média exposta ( $h_e$ ). A área lateral útil ( $A_{Lu}$ ) seria definida então:

$$A_{Lu} = 2 \times 3,85 \times h_e \quad (8)$$

### QUADRO 3 - Calibração do dinamômetro

Leitura (L) em grama	Correção (c)
20	1,0006
30	1,0010
40	1,0014
50	1,0019
60	1,0024
70	1,0031
80	1,0038
90	1,0046

### 3.5. Restrições do uso do ensaio

A princípio pensava-se que o aparelho pudesse ser utilizado para ensaiar solos minimamente expansivos ou solos expansivos devidamente estabilizados. No entanto, mesmo o solo A (solo laterítico), um solo reconhecidamente pouco expansivo, apresentava problemas ao ser imerso em água para saturar, apesar de ter sido antes submetido a cuidadosa aspersão (alguns pontos localizados sofriam expansão e se desintegravam, o corpo-de-prova tinha sua forma modificada, o que impedia o seu aproveitamento para realização dos ensaios). Numa tentativa de delimitar a quantia de expansão tolerável para a execução dos ensaios de erosão, foram feitos ensaios de expansão (especificação LNEC - E 200 - 1967) e ensaios de expansão com pressão confinante aproximadamente igual a zero (Apêndice I), cujos resultados estão dispostos nos quadros 4 e 5. O primeiro dos dois ensaios apresenta uma restrição importante com respeito a realidade que se pretende estudar - expansão com pressão confinante igual a zero em corpos-de-prova moldados com densidade semelhante a densidade seca máxima do Proctor Normal e umidade em torno da ótima - o corpo-de-prova é moldado com solo seco em densidade diferente dos corpos-de-prova utilizados no ensaio de erosão. Por isso, foi desenvolvido o ensaio de expansão com pressão confinante aproximadamente igual a zero, cujos resultados foram ao encontro do comportamento observado; o solo A e o solo C não expansivos, o solo B nitidamente expansivo (Quadro 5).

Antepondo a tais resultados o fato de que em nenhum dos três solos pode ser realizado o ensaio de erosão, conclui-se que, mesmo para solos minimamente expansivos, incapazes de terem seu valor determinado no ensaio de expansão com pressão confinante aproximadamente igual a zero, o ensaio de erosão não tem sentido, ficando a utilização do aparelho restrita a solos estabilizados.

**QUADRO 4 - Ensaio de expansão LNEC (LNEC - E 200 - 1967)**

E X P A N S Ã O %	
SOLO A	3,9
SOLO B	17,7
SOLO C	3,9

**QUADRO 5 - Ensaio de expansão com pressão confinante aproximadamente igual a zero**

	PARÂMETROS DE COMPACTAÇÃO	EXPANSÃO (%)
SOLO A	GC% = 99,7% $\Delta h\%$ = 0,37%	0
SOLO B	GC% = 99,7% $\Delta h\%$ = 0,41%	16,96
SOLO C	GC% = 101,2% $\Delta h\%$ = - 1,57%	0

## 4. CARACTERÍSTICAS GEOTÉCNICAS DOS SOLOS ESTUDADOS

### 4.1. Descrição dos solos ensaiados

Foram utilizadas três diferentes espécies de solo durante o desenvolvimento da tese:

SOLO A - argila medianamente plástica laterizada, extraída da jazida junto ao I.P.T. (Cidade Universitária - São Paulo).

SOLO B - silte pouco argiloso, constituindo um saprolito de granito, recolhido no km 34 da rodovia Castelo Branco. São Paulo.

SOLO C - solo arenoso fino, transportado e pedologicamente evoluído, extraído na rodovia SP 255 (Araraquara - Ribeirão Preto), km 63+400 à direita.

### 4.2. Programação seguida

Para caracterizar os solos ensaiados foram realizados os seguintes ensaios: densidade real dos grãos (MB-28), limite de liquidez (MB-30), limite de plasticidade (MB-31), análise granulométrica (MB-32), análise granulométrica sem defloculante e sem dispersão mecânica - SCS (conforme Apêndice II), Proctor Normal (MB-33). Os mesmos ensaios foram feitos em amostras dos solos acima mencionados, contendo 3% de cal hidratada (características da cal - Quadro 9), preparadas em umidade próxima à ótima e deixadas em cura por uma semana na câmara úmida. Além dos ensaios acima mencionados foram feitas determinações da Capacidade de Troca Catiônica, do pH e análise mineralógica por difratometria de raios X.

### 4.3. Resultados

Os resultados obtidos encontram-se dispostos nos quadros 6, 7 e 8.

QUADRO 6 - Resultado dos Ensaio Realizados no Solo A						
AMOSTRA NATURAL	Limite de Liquidez (%) - 60,0					
	Limite de Plasticidade (%) - 31,0					
	<b>ANÁLISE GRANULOMÉTRICA</b>					
		Argila(%)	Silte(%)	Areia Fina(%)	Areia Média(%)	Areia Grossa(%)
	MB-32	58	4	25	12	1
	SCS*	6	4	64	25	1
	Densidade Real dos Grãos (g/cm <sup>3</sup> )				2,65	
Proctor Normal com Secagem e com Reuso				$\gamma_s \text{ máx}(\text{g}/\text{cm}^3)=1,554$		
				$h_{\sigma_t} (\%) = 22,0$		
AMOSTRA 3% CAL	Limite de Liquidez (%) - 45,9					
	Limite de Plasticidade (%) - 27,0					
	<b>ANÁLISE GRANULOMÉTRICA</b>					
		Argila(%)	Silte(%)	Areia Fina(%)	Areia Média(%)	Areia Grossa(%)
	SCS*	0	8	51	40	1
	Proctor Normal com Secagem e com Reuso				$\gamma_s \text{ máx}(\text{g}/\text{cm}^3)=1,502$	
					$h_{\sigma_t} (\%) = 24,0$	
<p>- pH a 25°C (suspensão aquosa a 5%) - 6,2</p> <p>- capacidade de troca de cátions - 3,36</p> <p>- análise mineralógica por difratometria de raios x</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>. quartzo</li> <li>. argilo-mineral do grupo das caolinitas</li> <li>. gibsita</li> <li>. goethita</li> </ul>						
* Conforme Apêndice II						

QUADRO 7 - Resultado dos Ensaio Realizados no Solo B						
AMOSTRA NATURAL	Limite de Liquidez (%) - 49,9					
	Limite de Plasticidade (%) - 34,1					
	ANÁLISE GRANULOMÉTRICA					
		Argila(%)	Silte(%)	Areia Fina(%)	Areia Média(%)	Areia Grossa(%)
	MB-32	12	48	19	21	-
	SCS*	1	47	32	20	-
	Densidade Real dos Grãos (g/cm <sup>3</sup> )				2,75	
Proctor Normal com Secagem e com Reuso				$\gamma_s \text{ máx}(\text{g}/\text{cm}^3)=1,530$		
				$h_{\text{ót}} (\%) = 21,9$		
AMOSTRA 3% CAL	Limite de Liquidez (%) - 47,0					
	Limite de Plasticidade (%) - 25,7					
	ANÁLISE GRANULOMÉTRICA					
		Argila(%)	Silte(%)	Areia Fina(%)	Areia Média(%)	Areia Grossa(%)
	SCS*	1	29	30	40	-
	Proctor Normal com Secagem e com Reuso				$\gamma_s \text{ máx}(\text{g}/\text{cm}^3)=1,468$	
					$h_{\text{ót}} (\%) = 25,7$	
<p>- pH a 25°C (suspensão aquosa a 5%) - 6,4</p> <p>- capacidade de troca de cátions - 2,05</p> <p>- Análise mineralógica por difratometria de raios x</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>. quartzo</li> <li>. argilo-mineral do grupo das micas</li> <li>. argilo-mineral do grupo das caolinitas</li> <li>. feldspato</li> </ul>						
* Conforme Apêndice II						

QUADRO 8 - Resultado dos Ensaio Realizados no Solo C						
AMOSTRA NATURAL	▲ Limite de Liquidez (%) - 35,0					
	Limite de Plasticidade (%) - 17,0					
	ANÁLISE GRANULOMÉTRICA					
		Argila(%)	Silte(%)	Areia Fina(%)	Areia Média(%)	Areia Grossa(%)
	MB-32	26	9	51	14	-
	SCS*	1	7	70	22	-
	Densidade Real dos Grãos (g/cm <sup>3</sup> )				2,73	
	Proctor Normal com Secagem e com Reuso				$\gamma_s \text{ máx}(\text{g/cm}^3) = 1,878$	
					$h_{ot} = 13,5$	
	AMOSTRA 3% CAL	Limite de Liquidez (%) - 31,0				
Limite de Plasticidade (%) - 22,0						
ANÁLISE GRANULOMÉTRICA						
		Argila(%)	Silte(%)	Areia Fina(%)	Areia Média(%)	Areia Grossa(%)
SCS*		2	4	64	30	-
Proctor Normal com Secagem e com Reuso				$\gamma_s \text{ máx}(\text{g/cm}^3) = 1,782$		
				$h_{ot} (\%) = 15,5$		
<ul style="list-style-type: none"> <li>- pH a 25°C (suspensão aquosa a 5%) - 5,7</li> <li>- capacidade de troca de cátions - 0,59</li> <li>- análise mineralógica por difratometria de raios x <ul style="list-style-type: none"> <li>. quartzo</li> <li>. argilo-mineral do grupo das caolinitas</li> </ul> </li> </ul>						
*Conforme Apêndice II						

QUADRO 9 - Características da cal utilizada (ensaios realizados segundo a Norma MB-342/67 - método de análise química de cal virgem e cal hidratada).

MARCA - ITAÚ

RESULTADOS:

- Perda ao fogo .....	- 26,4%
- Insolúveis em ácido clorídrico .....	- 0,81%
- Óxidos de ferro e alumínio ( $Fe_2 O_3 + Al_2 O_3$ ) .....	- 0,44%
- Óxido de cálcio (CaO) .....	- 71,9%
- Óxido de magnésio (MgO) .....	- 0,45%
- Anidrido sulfúrico ( $SO_3$ ) .....	- nihil
- Anidrido carbônico ( $CO_2$ ) .....	- 4,98%

NOTA:

Os resultados da análise química acima permitem calcular os seguintes dados:

Na base do material original:

Óxido de cálcio não-hidratado (CaO) - nihil

Óxido de magnésio não-hidratado (MgO) - nihil

Na base de não voláteis:

Óxidos de cálcio e de magnésio (CaO + MgO) - 98,3%

## 5. ENSAIOS REALIZADOS

A seguir são apresentados os resultados dos ensaios realizados (Quadro de 10 a 24) sobre corpos-de-prova das amostras de solo A, B e C, submetidas a diferentes tensões cisalhantes. Em certos ensaios não se pode determinar a quantidade de solo erodido para alguns períodos de tempo acumulado, em virtude de falhas no sistema de controle.

QUADRO 10 - Solo A com 3% de cal - Ensaio nº 1

Condições de compactação:

Grau de compactação (GC%) = 101%

Desvio de umidade ( $\Delta h\%$ ) = -0,95%

Observações:

Tensão cisalhante aplicada ( $\tau_{aplicada}$ ) = 0,054 g/cm<sup>2</sup>

Área lateral útil ( $A_{Lu}$ ) = 144,66 cm<sup>2</sup>

Tempo (min)	(Solo erodido acumulado/ $A_{Lu}$ ) $\times 10^{-4}$ (g/cm <sup>2</sup> )
2	0,263
4	1,396
8	1,887
15	3,470
30	4,007
60	4,712
1465	7,576

QUADRO 11 - Solo A com 3% de cal - Ensaio nº 2

Condições de compactação:

Grau de compactação (GC%) = 100,5%

Desvio de umidade ( $\Delta h\%$ ) = 0,26%

Observações:

Tensão cisalhante aplicada ( $\tau_{aplicada}$ ) = 0,091 g/cm<sup>2</sup>

Área lateral útil ( $A_{Lu}$ ) = 146,35 cm<sup>2</sup>

Tempo (min)	(Solo erodido acumulado/ $A_{Lu}$ ) $\times 10^{-4}$ (g/cm <sup>2</sup> )
2	0,943
4	1,633
15	1,879
30	2,255
60	2,402
1463	5,897

QUADRO 12 - Solo A com 3% de cal - Ensaio nº 3

Condições de compactação:

Grau de compactação (GC%) = 100,9%

Desvio de umidade ( $\Delta h\%$ ) = - 0,48%

Observações:

Tensão cisalhante aplicada ( $\tau_{\text{aplicada}}$ ) = 0,113 g/cm<sup>2</sup>

Área lateral útil ( $A_{Lu}$ ) = 149,25 cm<sup>2</sup>

Tempo (min)	(Solo erodido acumulado/ $A_{Lu}$ )x10 <sup>-4</sup> (g/cm <sup>2</sup> )
2	2,378
4	3,437
8	3,980
15	5,407
30	6,955
60	7,899
1440	11,263

QUADRO 13 - Solo A com 3% de cal - Ensaio nº 4

Condições de compactação:

Grau de compactação (GC%) = 100%

Desvio de umidade ( $\Delta h\%$ ) = - 0,51%

Observações:

Tensão cisalhante aplicada ( $\tau_{aplicada}$ ) = 0,159 g/cm<sup>2</sup>

Área lateral útil ( $A_{L,u}$ ) = 148,77 cm<sup>2</sup>

Tempo (min)	(Solo erodido acumulado/ $A_{L,u}$ )x10 <sup>-4</sup> (g/cm <sup>2</sup> )
2	1,694
4	3,690
8	5,646
15	8,590
30	9,478
60	11,198
3420	14,143

**QUADRO 14 - Solo A com 3% de cal - Ensaio nº 5**

Condições de compactação:

Grau de compactação (GC%) = 100,3%

Desvio de umidade ( $\Delta h\%$ ) = 0,27%

Observações:

Tensão cisalhante aplicada ( $\tau_{\text{aplicada}}$ ) = 0,195 g/cm<sup>2</sup>

Área lateral útil ( $A_{Lu}$ ) = 146,96 cm<sup>2</sup>

Tempo (min)	(Solo erodido acumulado/ $A_{Lu}$ )x10 <sup>-4</sup> (g/cm <sup>2</sup> )
2	4,716
4	8,193
8	11,146
15	11,888
30	14,392
60	18,692
1500	37,153

QUADRO 15 - Solo B com 3% de cal - Ensaio nº 1

Condições de compactação:

Grau de compactação (GC%) = 99,1%

Desvio de umidade ( $\Delta h\%$ ) = 1,39%

Observações:

Tensão cisalhante aplicada ( $\tau_{aplicada}$ ) = 0,036 g/cm<sup>3</sup>

Área lateral útil ( $A_{Lu}$ ) = 146,59 cm<sup>2</sup>

Tempo (min)	(Solo erodido acumulado/ $A_{Lu}$ ) $\times 10^{-4}$ (g/cm <sup>2</sup> )
2	1,126
4	2,435
15	2,510
30	3,552
60	3,941
2500	6,262

QUADRO 16 - Solo B com 3% de cal - Ensaio nº 2

Condições de compactação:

Grau de compactação (GC%) = 98,6%

Desvio de umidade ( $\Delta h\%$ ) = 0,23%

Observações:

Tensão cisalhante aplicada ( $\tau_{\text{aplicada}}$ ) = 0,072 g/cm<sup>2</sup>

Área lateral útil ( $A_{Lu}$ ) = 144,42 cm<sup>2</sup>

Tempo (min)	(Solo erodido acumulado/ $A_{Lu}$ )x10 <sup>-4</sup> (g/cm <sup>2</sup> )
2	1,613
4	2,396
8	3,448
15	7,312
30	9,736
60	10,412
1466	15,026

**QUADRO 17 - Solo B com 3% de cal - Ensaio nº 3**

**Condições de compactação:**

Grau de compactação (GC%) = 98,03%

Desvio de umidade ( $\Delta h\%$ ) = 1,93%

**Observações:**

Tensão cisalhante aplicada ( $\tau_{\text{aplicada}}$ ) = 0,109 g/cm<sup>2</sup>

Área lateral útil ( $A_{Lu}$ ) = 163,04 cm<sup>2</sup>

Tempo (min)	(Solo erodido acumulado/ $A_{Lu}$ )x10 <sup>-4</sup> (g/cm <sup>2</sup> )
2	2,392
8	4,962
15	6,587
30	7,900
60	8,392
1485	38,714

**QUADRO 18 - Solo B com 3% de cal - Ensaio nº 4**

**Condições de compactação:**

Grau de compactação (GC%) = 99,93%

Desvio de umidade ( $\Delta h\%$ ) = 1,74%

**Observações:**

Tensão cisalhante aplicada ( $\tau_{\text{aplicada}}$ ) = 0,145 g/cm<sup>2</sup>

Área lateral útil ( $A_{Lu}$ ) = 153,12 cm<sup>2</sup>

Tempo (min)	(Solo erodido acumulado/ $A_{Lu}$ )x10 <sup>-4</sup> (g/cm <sup>2</sup> )
2	9,202
4	12,167
8	15,295
15	16,784
60	19,020
1455	37,343
3795	74,765

QUADRO 19 - Solo B com 3% de cal - Ensaio nº 5

Condições de compactação:

Grau de compactação (GC%) = 97,4%

Desvio de umidade ( $\Delta h\%$ ) = -0,64%

Observações:

Tensão cisalhante aplicada ( $\tau_{\text{aplicada}}$ ) = 0,181 g/cm<sup>2</sup>

Área lateral útil ( $A_{Lu}$ ) = 140,30 cm<sup>2</sup>

Tempo (min)	(Solo erodido acumulado/ $A_{Lu}$ ) $\times 10^{-4}$ (g/cm <sup>2</sup> )
2	6,643
4	9,473
8	11,190
15	12,217
30	18,553
60	21,654
1710	48,589

**QUADRO 20 - Solo C com 3% de cal - Ensaio nº 1**

Condições de compactação:

Grau de compactação (GC%) = 101%

Desvio de umidade ( $\Delta h\%$ ) = - 1,9%

Observações:

Tensão cisalhante aplicada ( $\tau_{\text{aplicada}}$ ) = 0,045 g/cm<sup>2</sup>

Área lateral útil ( $A_{Lu}$ ) = 144,17 cm<sup>2</sup>

Tempo (min)	(Solo erodido acumulado/ $A_{Lu}$ ) $\times 10^{-4}$ (g/cm <sup>2</sup> )
2	2,081
4	2,553
8	2,892
15	3,836
30	6,069
60	7,124
1395	12,999
4305	20,934

**QUADRO 21 - Solo C com 3% de cal - Ensaio nº 2**

Condições de compactação:

Grau de compactação (GC%) = 100,9%

Desvio de umidade ( $\Delta h\%$ ) = - 0,5%

Observações:

Tensão cisalhante aplicada ( $\tau_{aplicada}$ ) = 0,092 g/cm<sup>2</sup>

Área lateral útil ( $A_{Lu}$ ) = 140,90 cm<sup>2</sup>

Tempo (min)	Solo erodido acumulado/ $A_{Lu}$ (g/cm <sup>2</sup> )
2	2,243
4	4,975
8	8,055
15	10,511
30	11,945
60	12,647
120	14,379
360	20,561
2977	25,142

**QUADRO 22 - Solo C com 3% de cal - Ensaio nº 3**

Condições de compactação:

Grau de compactação (GC%) = 100,6%

Desvio de umidade ( $\Delta h\%$ ) = - 0,84%

Observações:

Tensão cisalhante aplicada ( $\tau_{\text{aplicada}}$ ) = 0,136 g/cm<sup>2</sup>

Área lateral útil ( $A_{Lu}$ ) = 143,33 cm<sup>2</sup>

Tempo (min)	Solo erodido acumulado/ $A_{Lu}$ (g/cm <sup>2</sup> )
2	4,386
4	6,837
8	9,858
15	14,749
30	17,756
60	22,535
1440	37,278

**QUADRO 23 - Solo C com 3% de cal - Ensaio nº 4**

Condições de compactação:

Grau de compactação (GC%) = 100,1%

Desvio de umidade ( $\Delta h\%$ ) = - 0,32%

Observações:

Tensão cisalhante aplicada ( $\tau_{aplicada}$ ) = 0,172 g/cm<sup>2</sup>

Área lateral útil ( $A_{Lu}$ ) = 153,60 cm<sup>2</sup>

Tempo (min)	Solo erodido acumulado/ $A_{Lu}$ (g/cm <sup>2</sup> )
2	4,981
4	7,734
8	9,570
15	10,879
30	16,979
60	19,069
120	21,354
240	25,326
360	27,389
1440	38,346

**QUADRO 24 - Solo C com 3% de cal - Ensaio nº 5**

Condições de compactação:

Grau de compactação (GC%) = 100,7%

Desvio de umidade ( $\Delta h\%$ ) = - 0,2%

Observações:

Tensão cisalhante aplicada ( $\tau_{\text{aplicada}}$ ) = 0,218 g/cm<sup>2</sup>

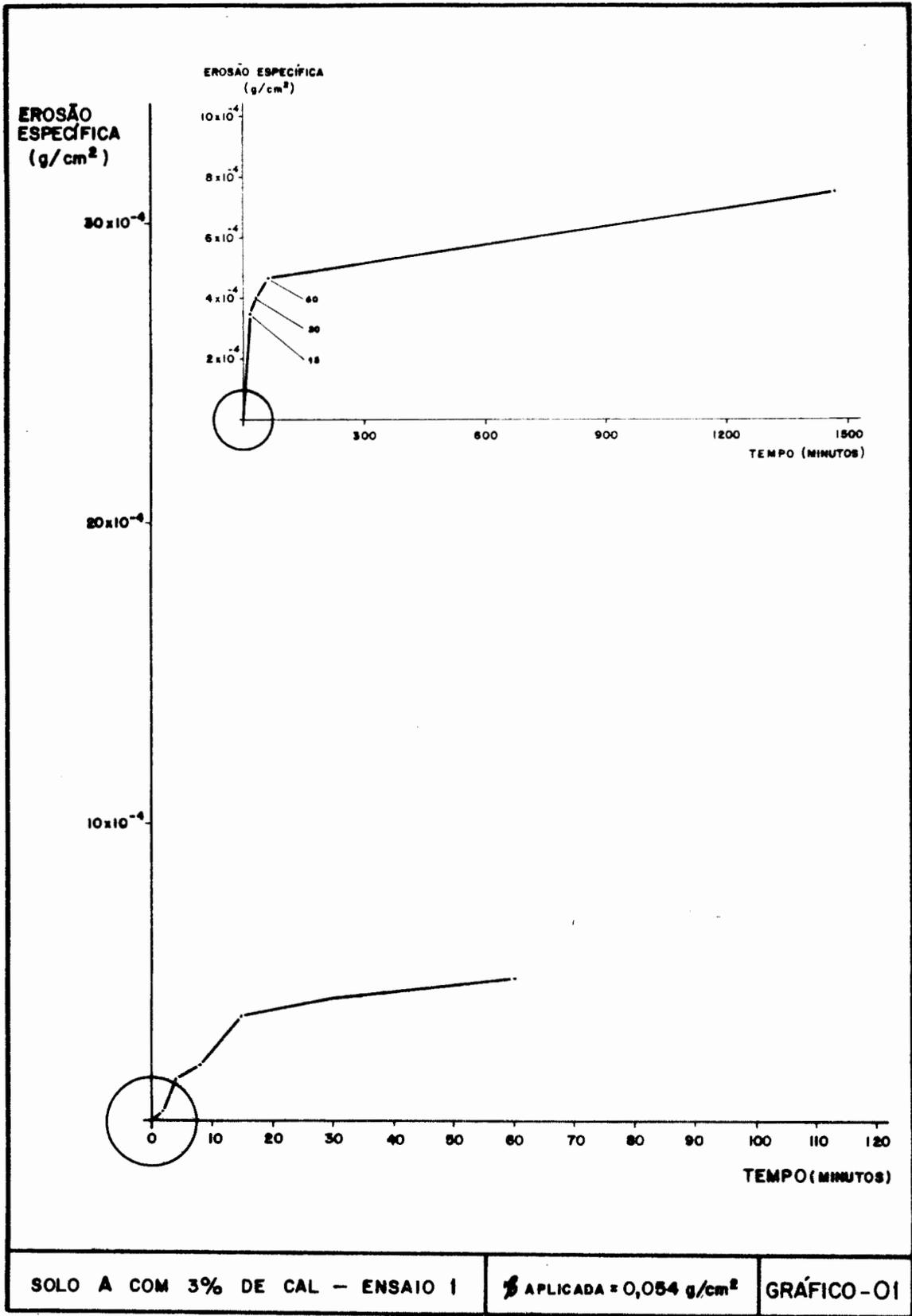
Área lateral útil ( $A_{Lu}$ ) = 137,88 cm<sup>2</sup>

Tempo (min)	Solo erodido acumulado/ $A_{Lu}$ (g/cm <sup>2</sup> )
2	7,470
4	9,233
8	12,141
15	13,461
30	24,384
60	29,003
120	31,201
1500	42,319

## 6. ANÁLISE DOS RESULTADOS

Os ensaios realizados, embora em pequeno número, sugerem a possibilidade de ser revisto o critério adotado por AKKY & SHEN<sup>5</sup>.

Os resultados obtidos, que vemos dispostos em gráficos "erosão específica" (solo erodido acumulado/área lateral útil) versus tempo (gráficos de 1 a 15), indicam, no ensaio ocorrer, uma nítida estabilização da erosão com o tempo, não permitindo que seja determinado um único módulo de erodibilidade (erosão específica/tempo). Essa possibilidade de obter diversos módulos de erodibilidade para um mesmo ensaio não fôra observada na metodologia de AKKY & SHEN<sup>5</sup>, uma vez que seus ensaios foram de curta duração (no máximo 20 minutos). Estes fatos, juntamente com a inexistência atual de correlação laboratório/campo, permitem suspender qualquer conclusão definitiva sobre o assunto, apenas sugerindo para o futuro perspectivas mais promissoras para métodos que se utilizam de períodos de tempo mais dilatados.



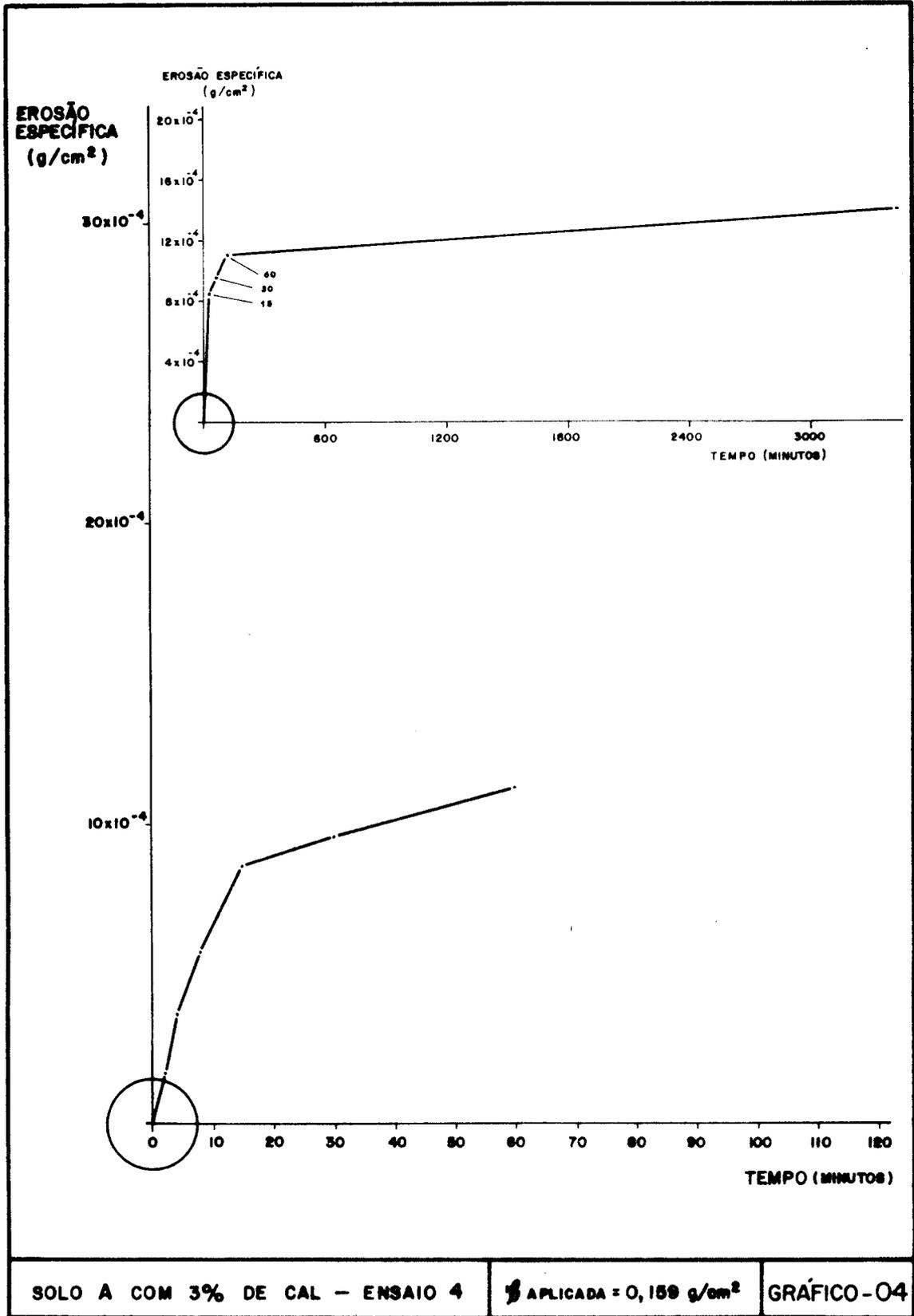
SOLO A COM 3% DE CAL - ENSAIO I

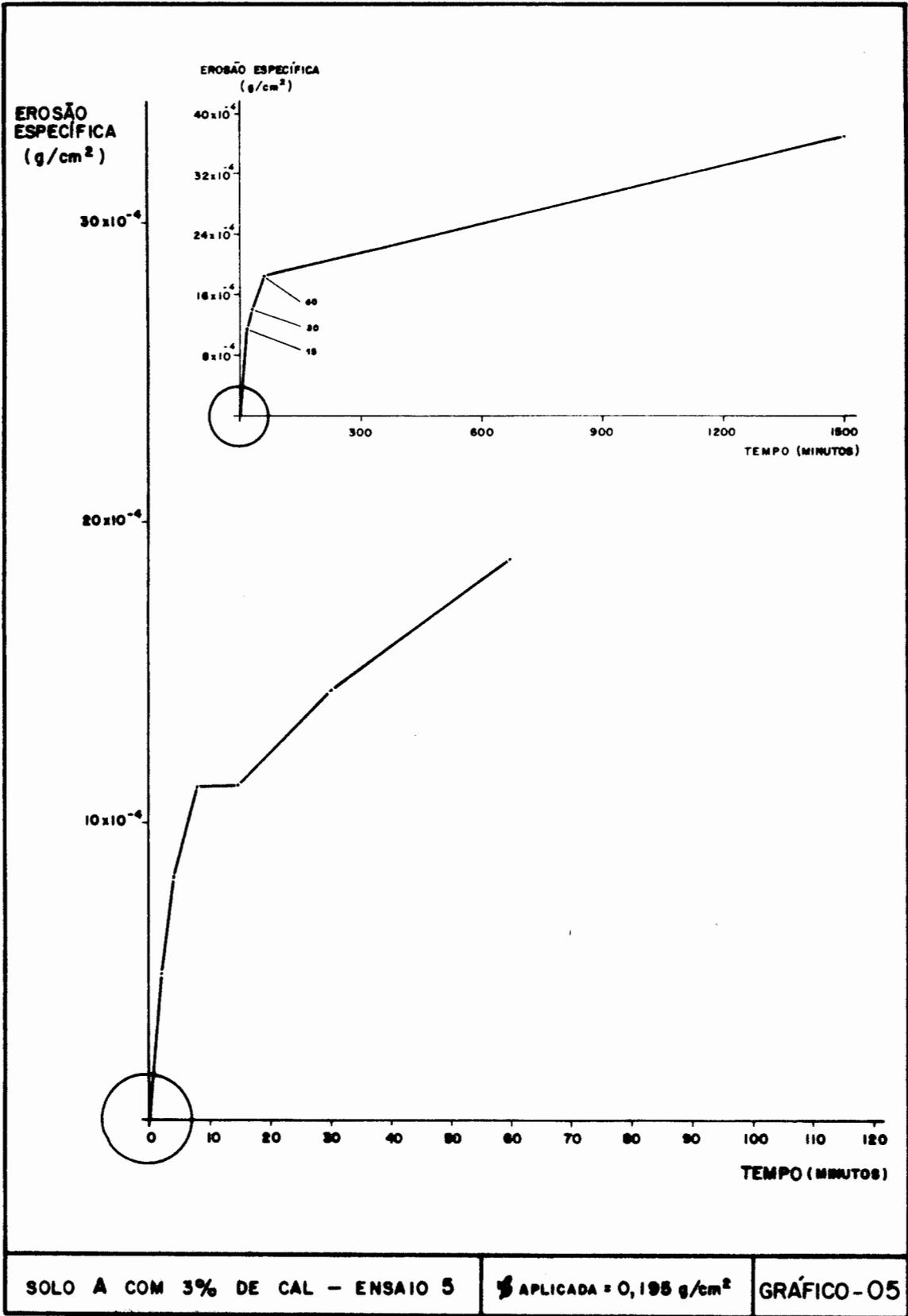
APLICADA = 0,054 g/cm<sup>2</sup>

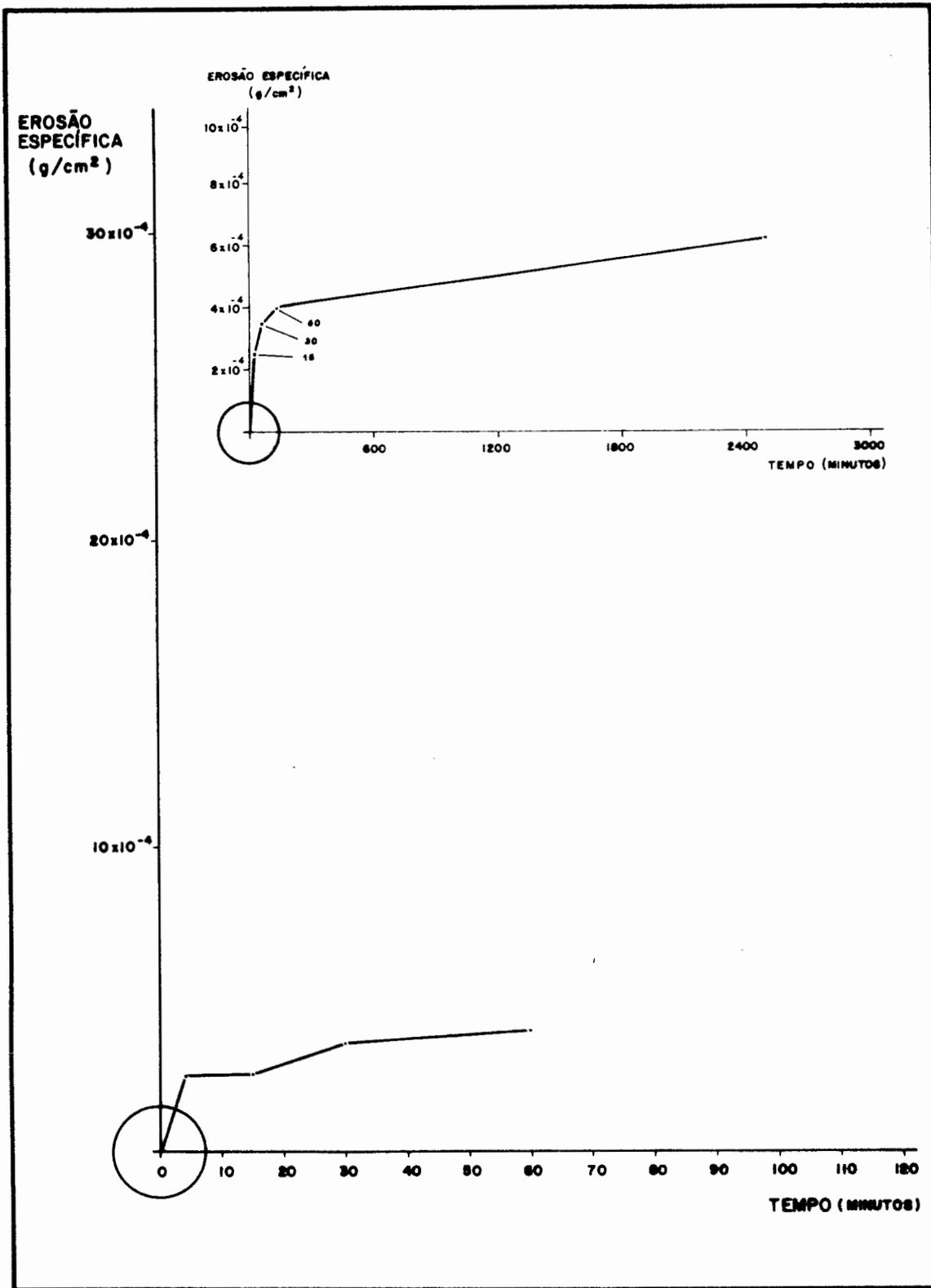
GRÁFICO-01



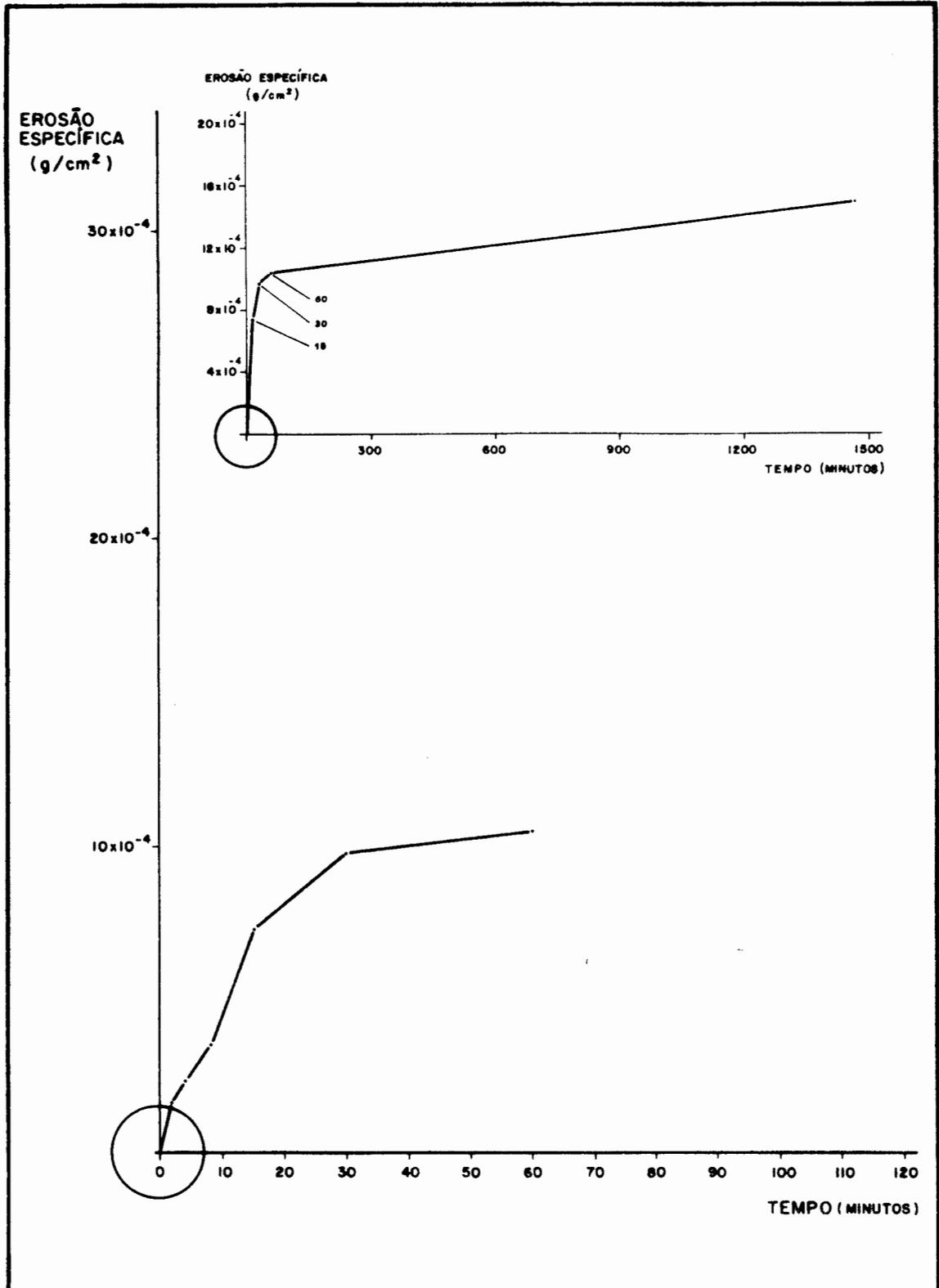




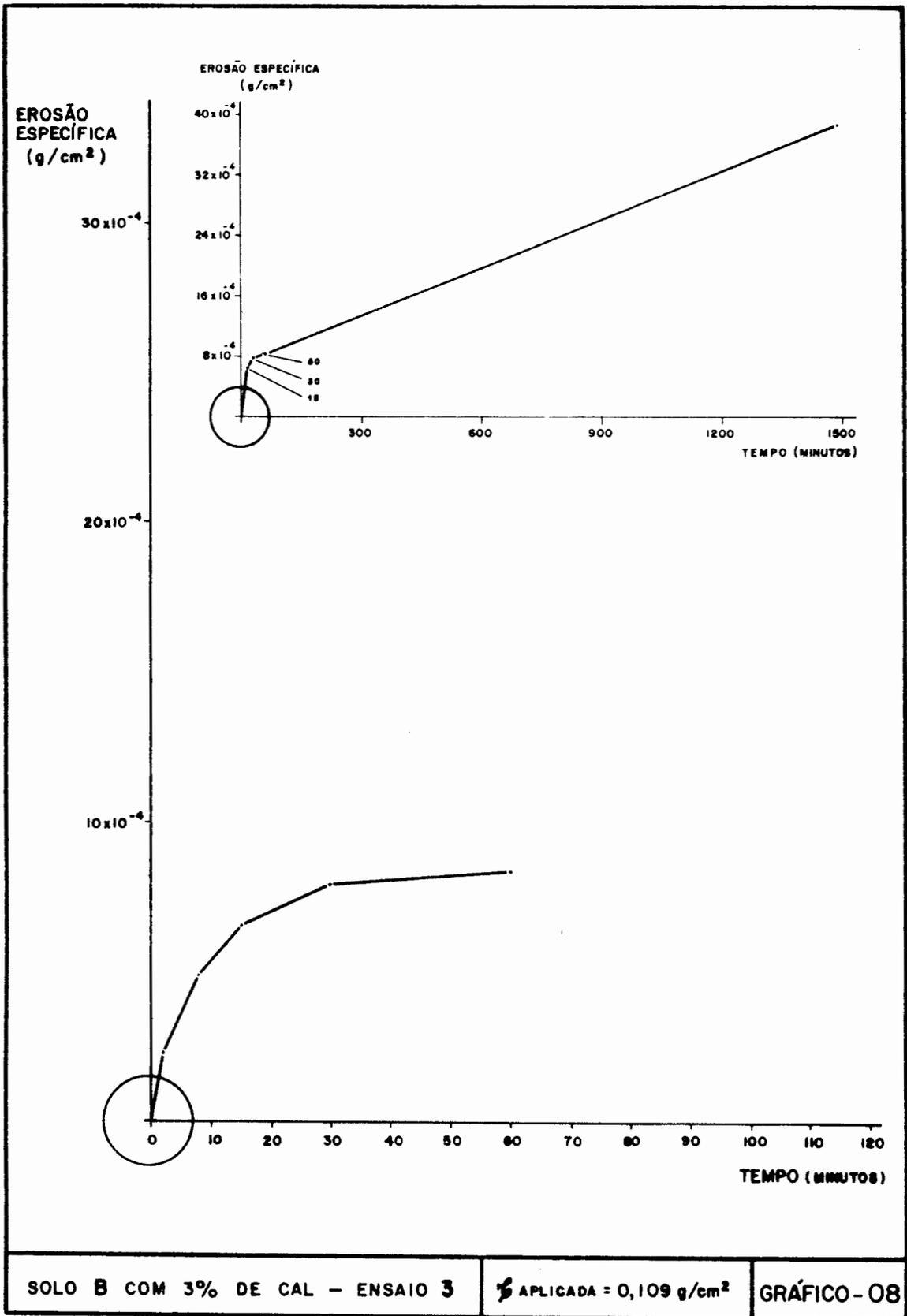




SOLO B COM 3% DE CAL - ENSAIO I	APLICADA = 0,036 g/cm <sup>2</sup>	GRÁFICO-06
---------------------------------	------------------------------------	------------



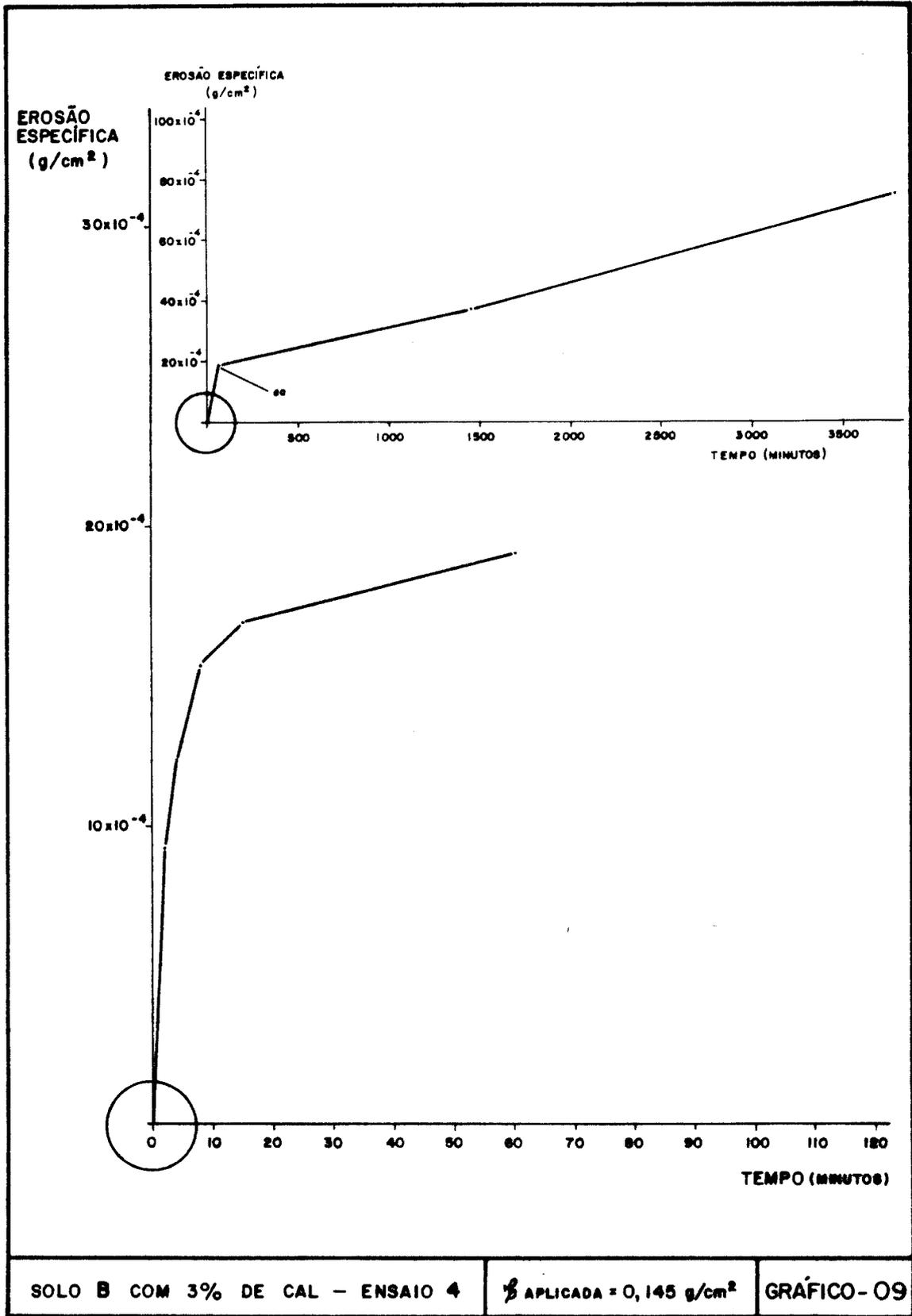
SOLO B COM 3% DE CAL - ENSAIO 2	APLICADA = 0,072 g/cm <sup>2</sup>	GRÁFICO-07
---------------------------------	------------------------------------	------------



SOLO B COM 3% DE CAL - ENSAIO 3

APLICADA =  $0,109 g/cm^2$

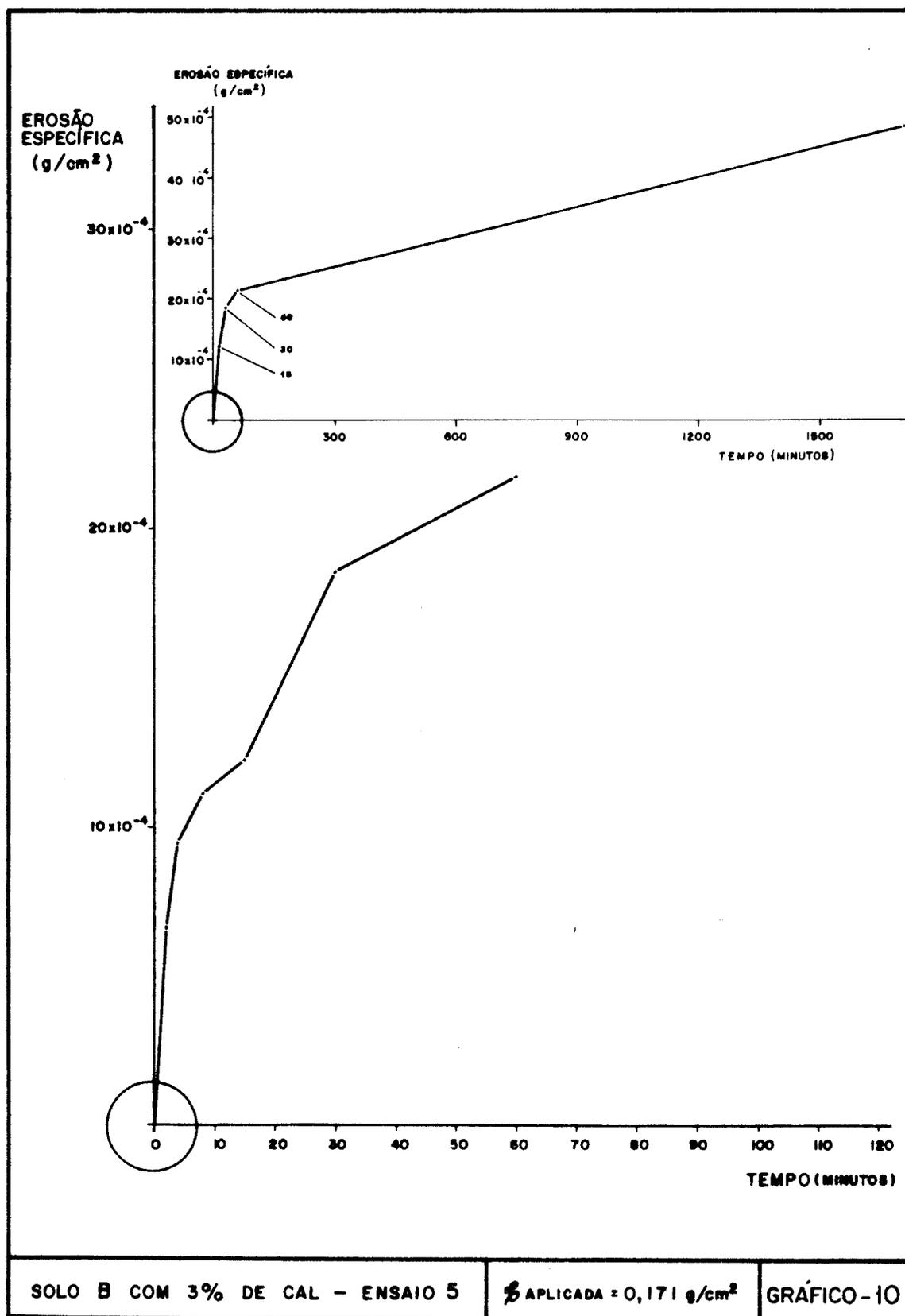
GRÁFICO-08

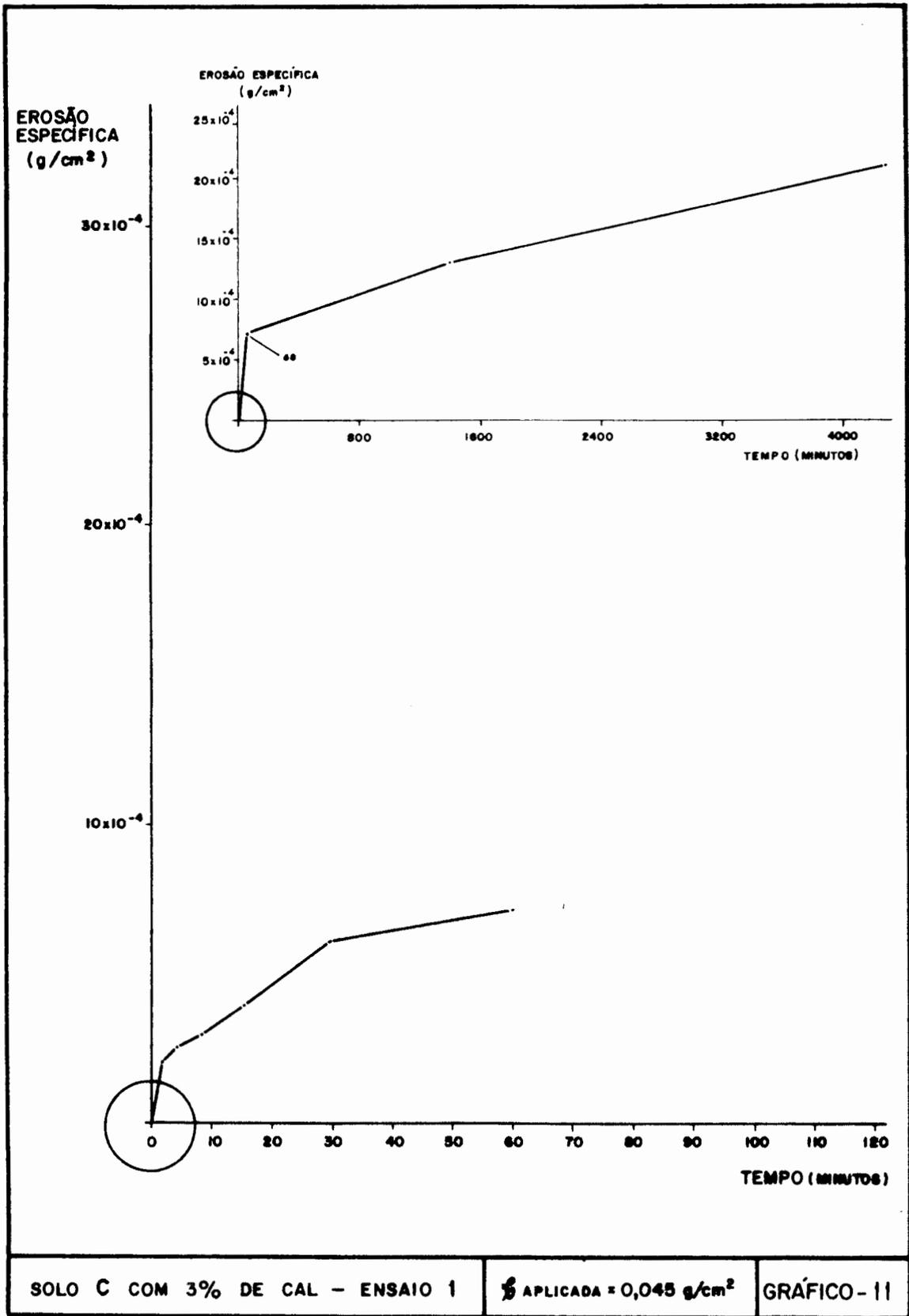


SOLO B COM 3% DE CAL - ENSAIO 4

σ APLICADA = 0,145 g/cm<sup>2</sup>

GRÁFICO-09

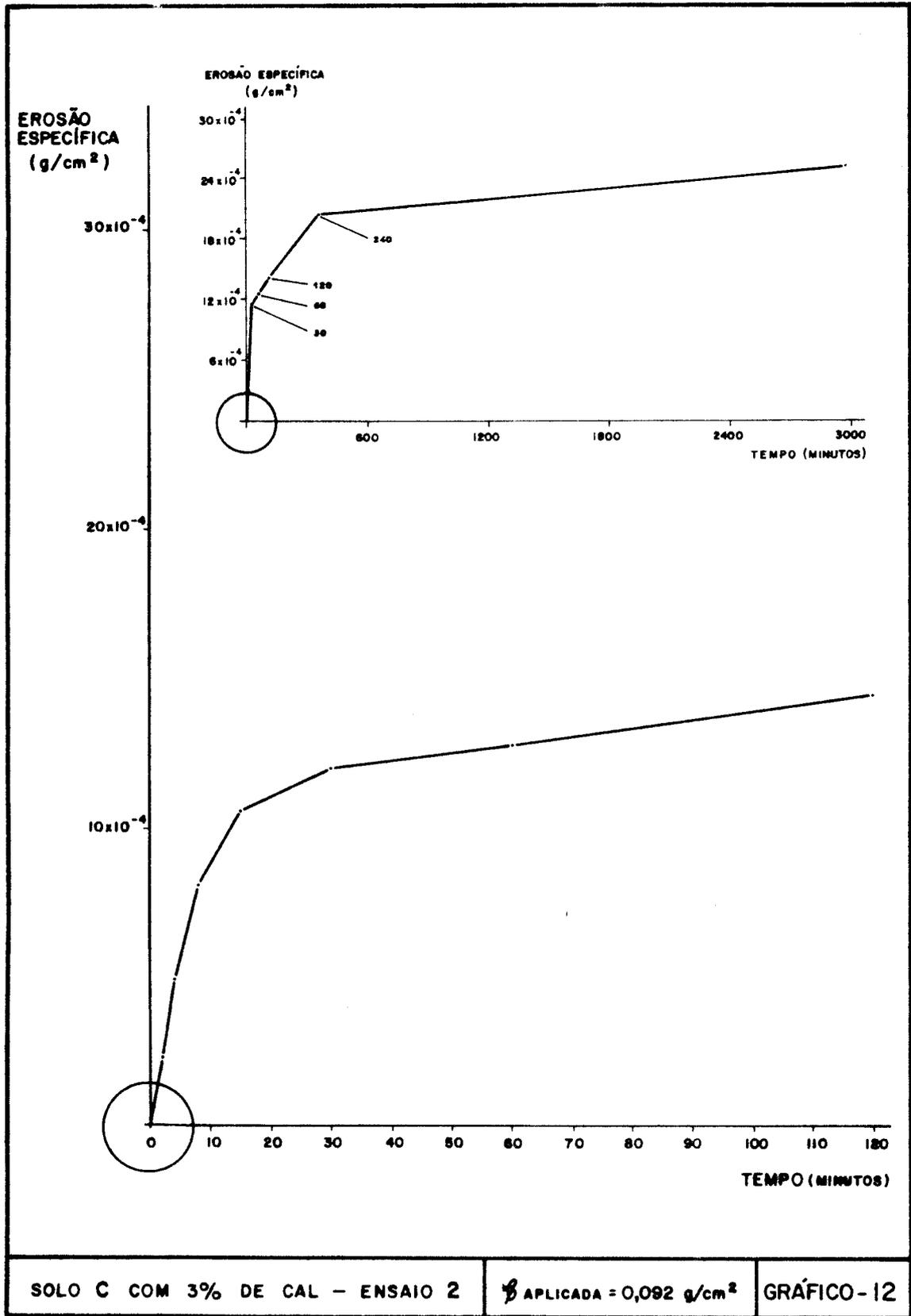


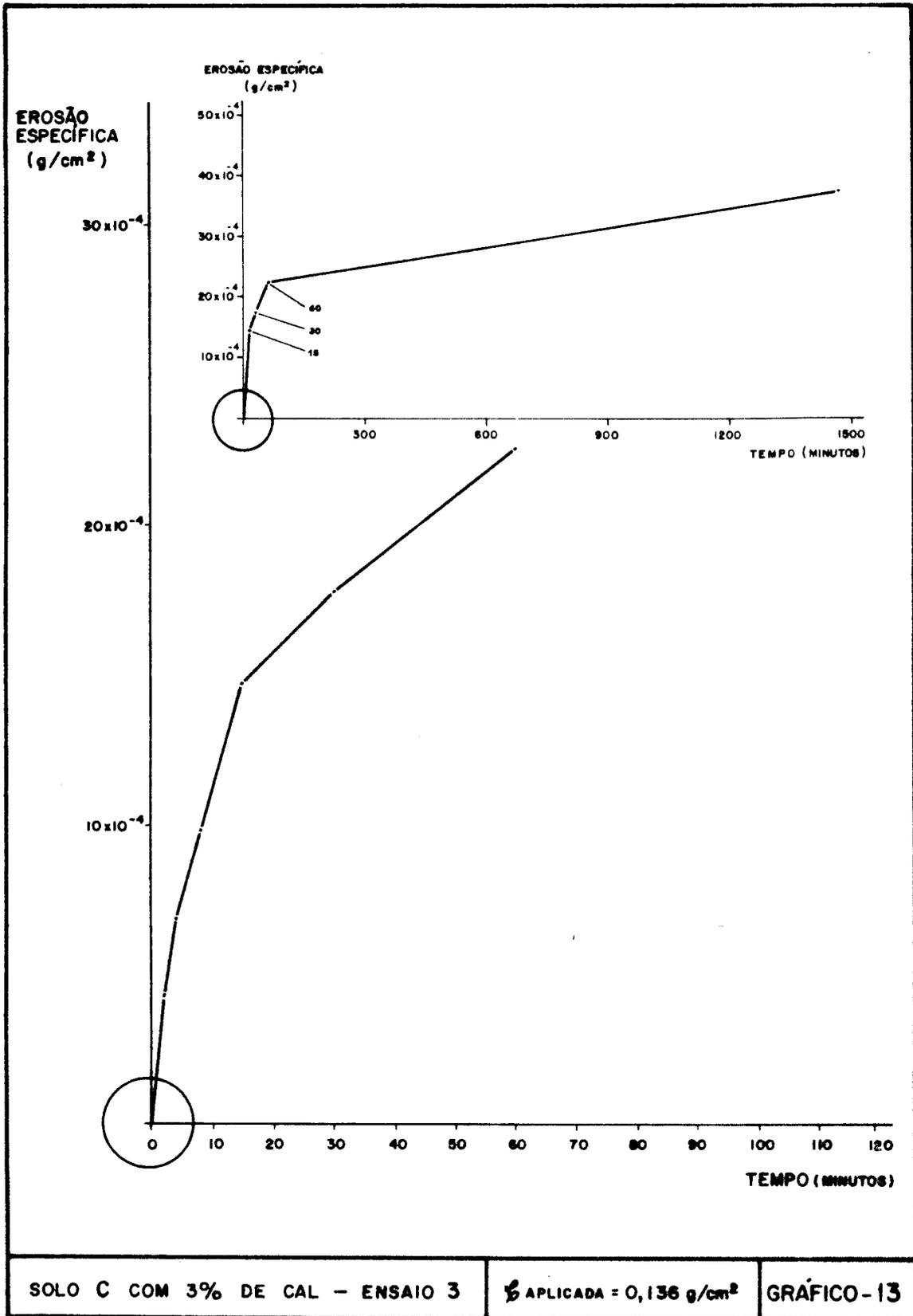


SOLO C COM 3% DE CAL - ENSAIO 1

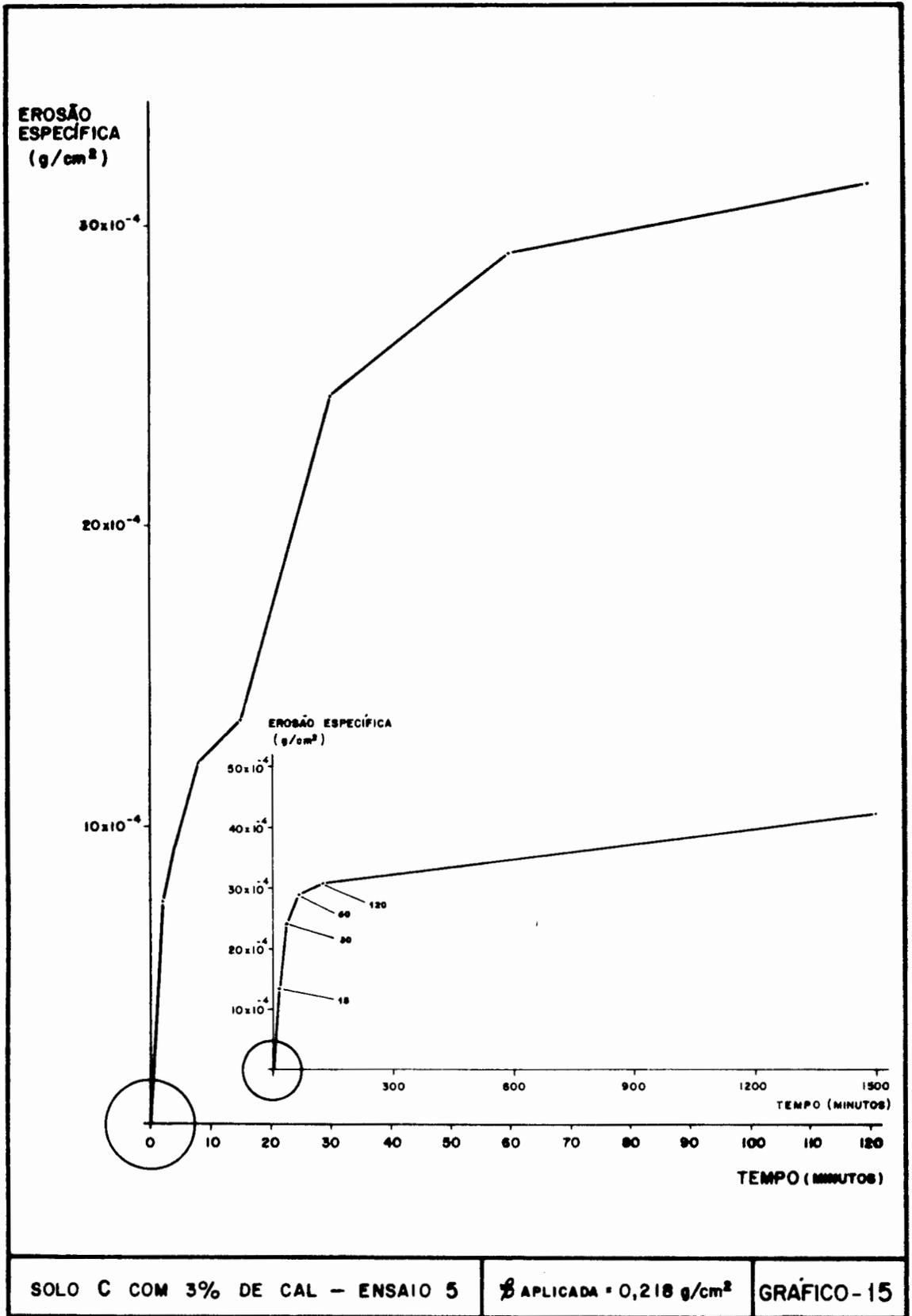
APLICADA = 0,045 g/cm<sup>2</sup>

GRÁFICO - 11









SOLO C COM 3% DE CAL - ENSAIO 5

σ APLICADA = 0,218 g/cm<sup>2</sup>

GRÁFICO-15

## 7. CONCLUSÕES

Concluimos que o equipamento desenvolvido satisfaz os objetivos iniciais, superando os problemas identificados no protótipo, e permitindo a realização de ensaios de boa qualidade na faixa de tensões usual em canais de irrigação.

Igualmente bem estabelecida ficou a metodologia de moldagem dos corpos-de-prova, montagem e execução dos ensaios.

Muito embora nada de definitivo se pode concluir, como já foi mencionado, a partir dos resultados obtidos tem-se uma visão promissora acerca da possibilidade de revisão dos critérios de determinação da tensão de cisalhamento hidráulica crítica.

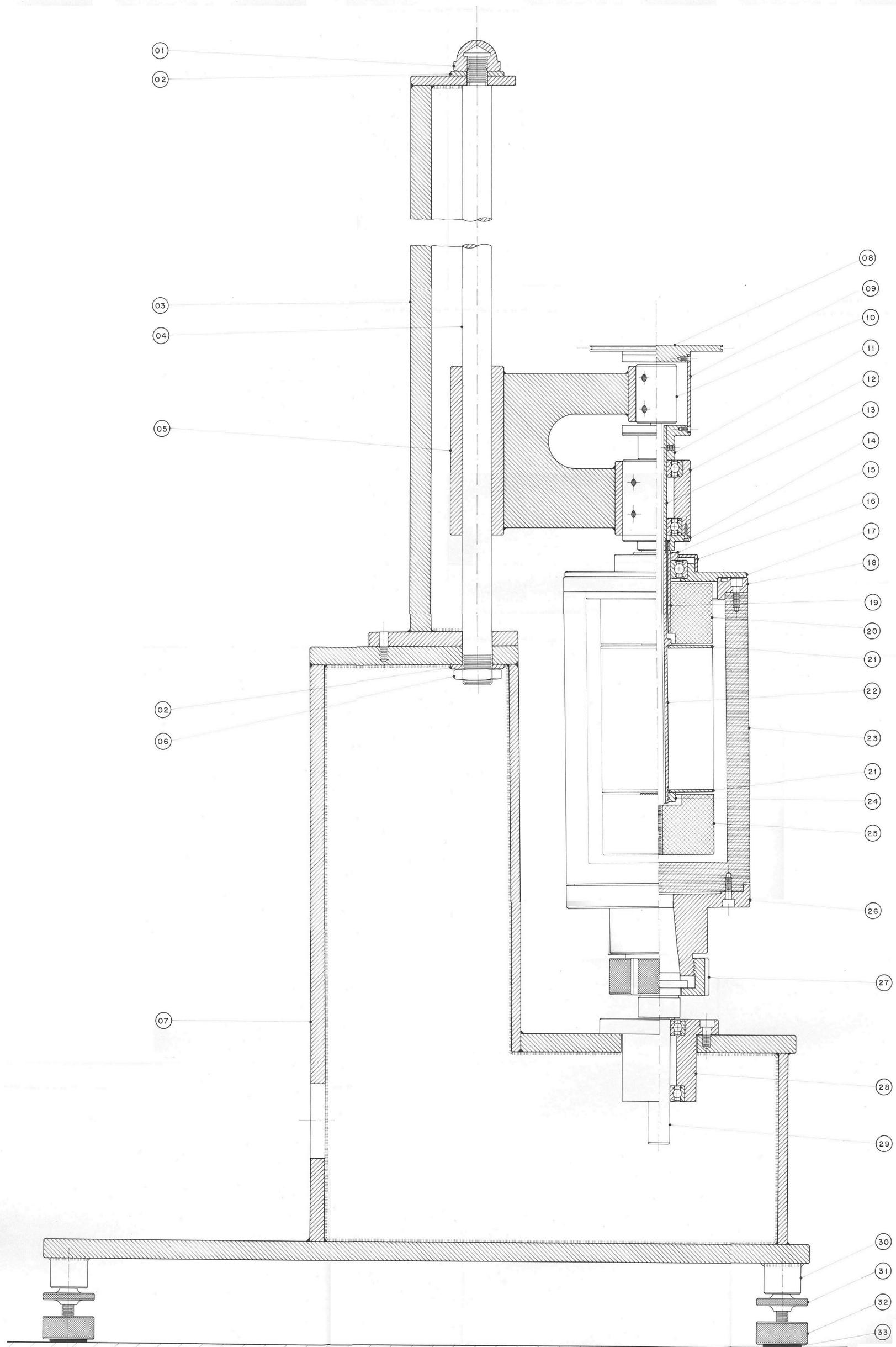
Por fim, seja lembrado que o uso do equipamento fica restrito somente a solos estabilizados quimicamente, por não ter sido possível a realização dos ensaios com amostra natural.

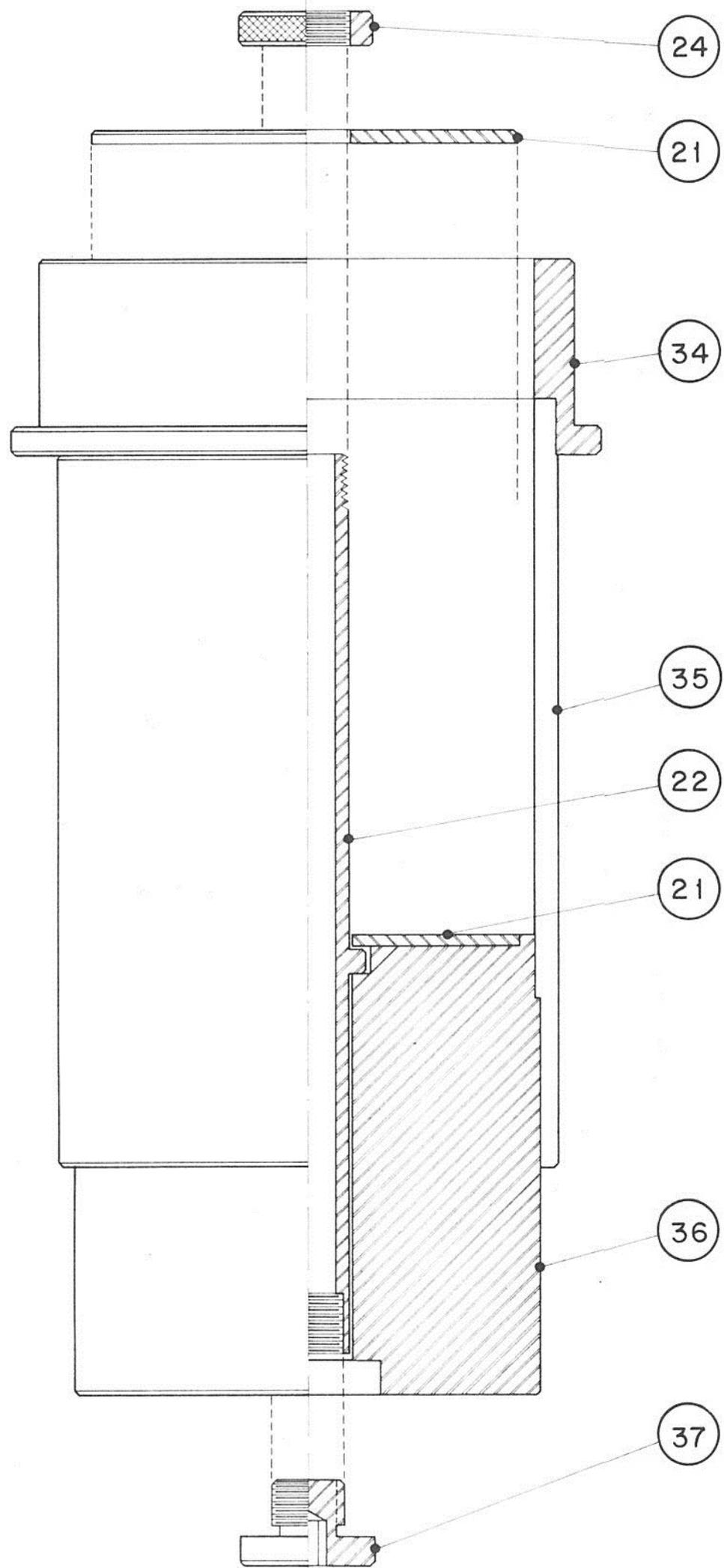
## 8. SUGESTÕES PARA FUTUROS ESTUDOS

"In soil mechanics, no evidence can be considered reasonably adequate until there is sufficient field experience to determine whether the phenomena observed in the laboratory are indeed the same as those that operate in the field. It must also be determined whether predictions based on laboratory studies and theories are indeed fulfilled in the field"<sup>8</sup>.

A idéia acima referida sintetiza o que se tem a sugerir para futuros estudos, bem como esboça o que se conclui seja o melhor caminho a ser tomado pelos ensaios de laboratório: maior atenção atribuída aos fenômenos observados em obras executadas, de tal modo que, da observação do comportamento dessas, se obtenha, uma harmoniosa correlação entre ensaios de laboratório e campo, sendo, assim, possível determinar índices significativos para aero são. Em outras palavras: a partir de um método comparativo como é o caso da utilização de ensaio CBR-CALIFORNIA BEARING RATIO - no projeto de pavimentos flexíveis, averigua-se a possibilidade e questiona-se a validade da utilização do Cilindro Rotatório face aos resultados de campo. ("... whether predications based on laboratory studies and theories are indeed fulfilled in the field") buscar desenvolver e aprimorar uma metodologia para determinação da tensão de cisalhamento hidráulica crítica em laboratório que forneça resultados os mais em consonância possível com aqueles observados em situações reais.

**A N E X O**

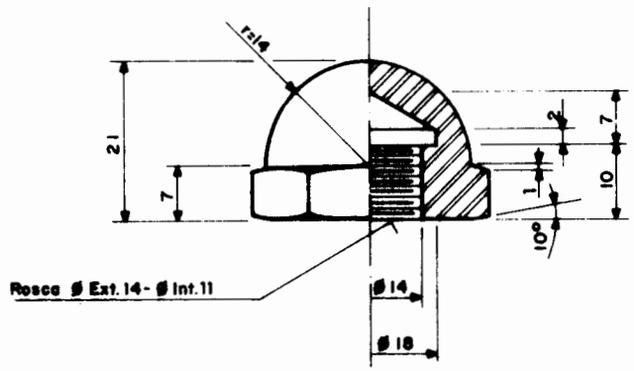




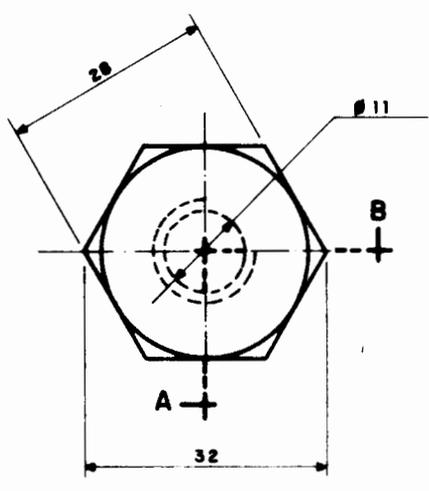
MOLDE PARA A CONFECÇÃO DE CORPOS - DE - PROVA

ESCALA : 1/1

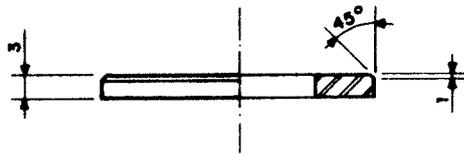
FIGURA - 10



CORTE A - B

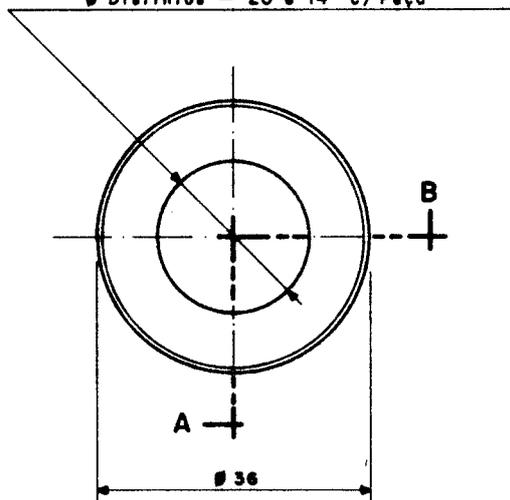


PORCA DE FIXAÇÃO SUPERIOR DO EIXO VERTICAL		PEÇA - 01
MATERIAL : AÇO INOXIDÁVEL	ESCALA : 1/1	FIGURA - 11



CORTE A - B

Ø Distintos - 20 e 14 c/ Peça



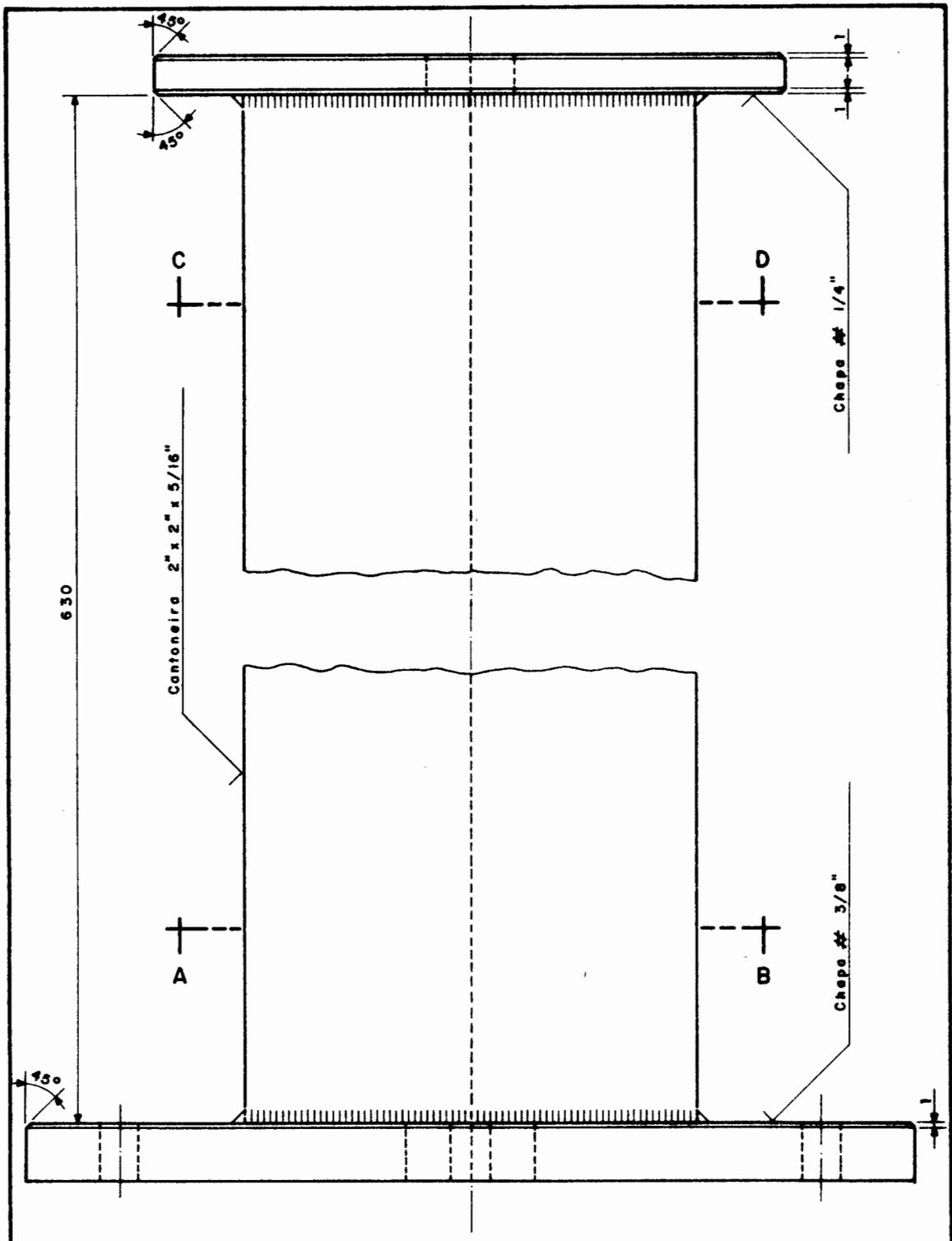
ARRUELA DE FIXAÇÃO DO EIXO VERTICAL

PEÇA - 02

MATERIAL: AÇO INOXIDÁVEL

ESCALA : 1/1

FIGURA - 12



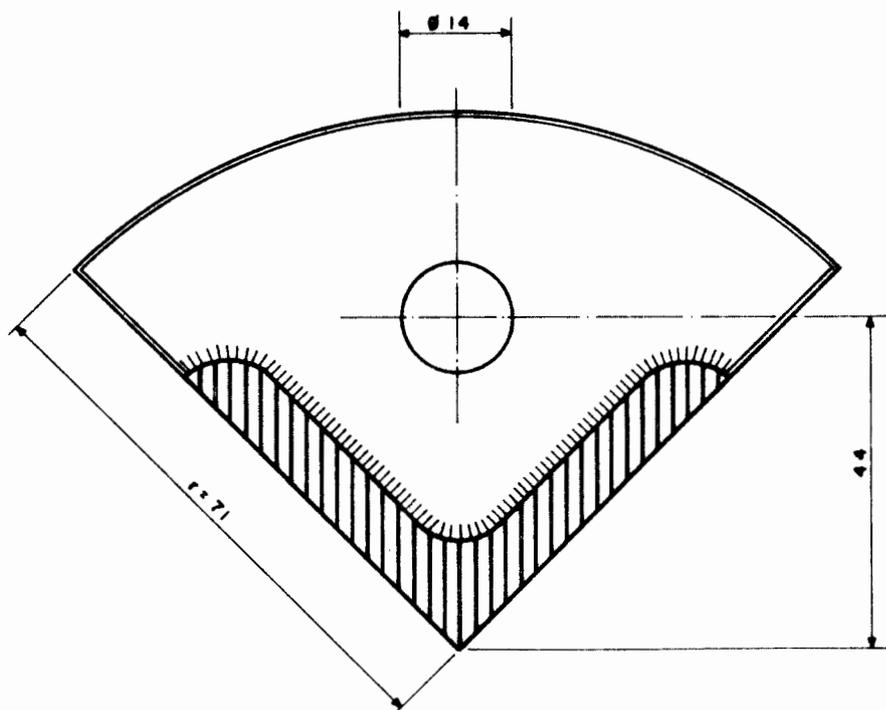
CALHA SUPORTE DO EIXO VERTICAL

PEÇA - 03

MATERIAL : CHAPA LAMINADA DE FERRO

ESCALA : 1/1

FIGURA - 13



CORTE C - D

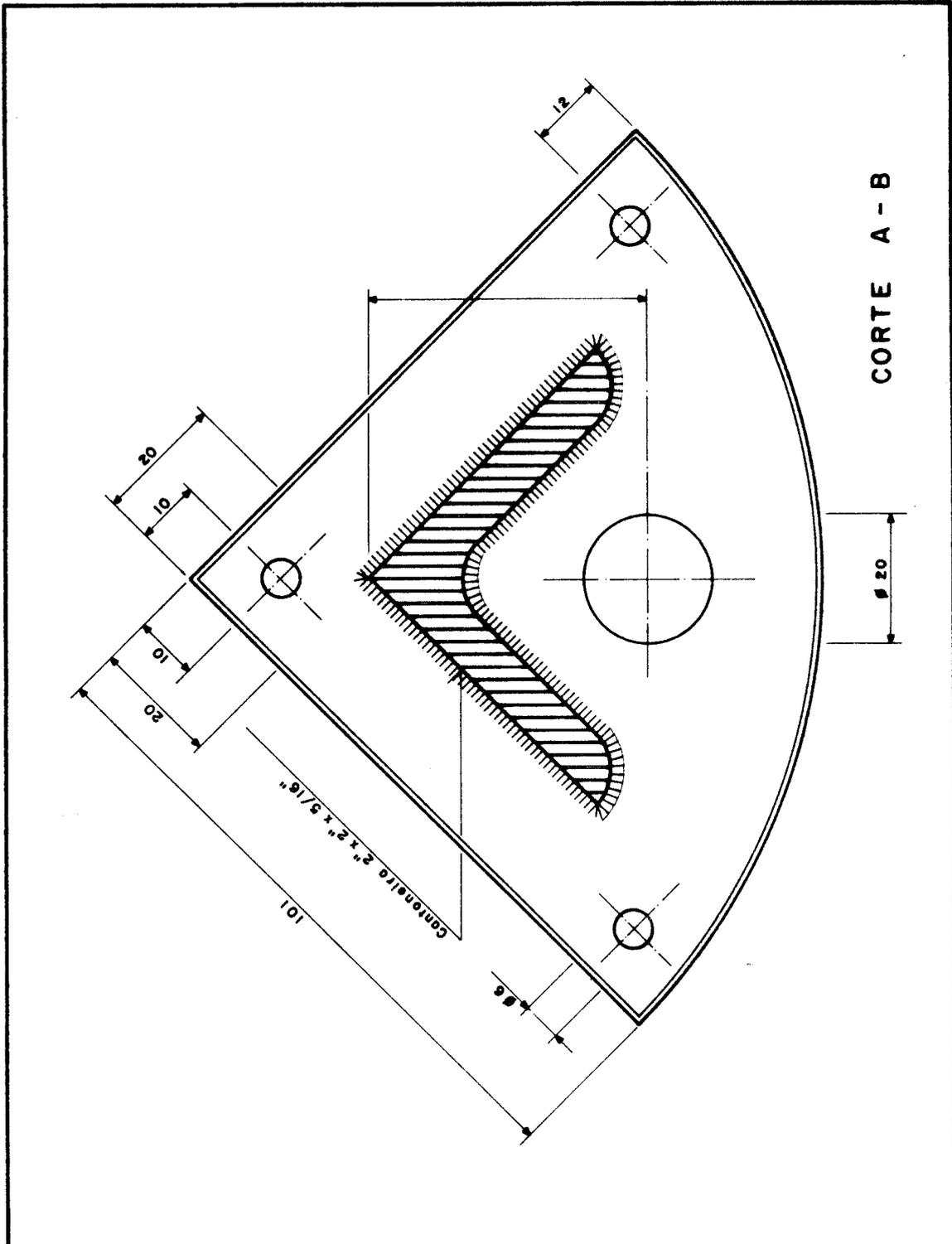
CALHA SUPORTE DO EIXO VERTICAL

PEÇA - 03

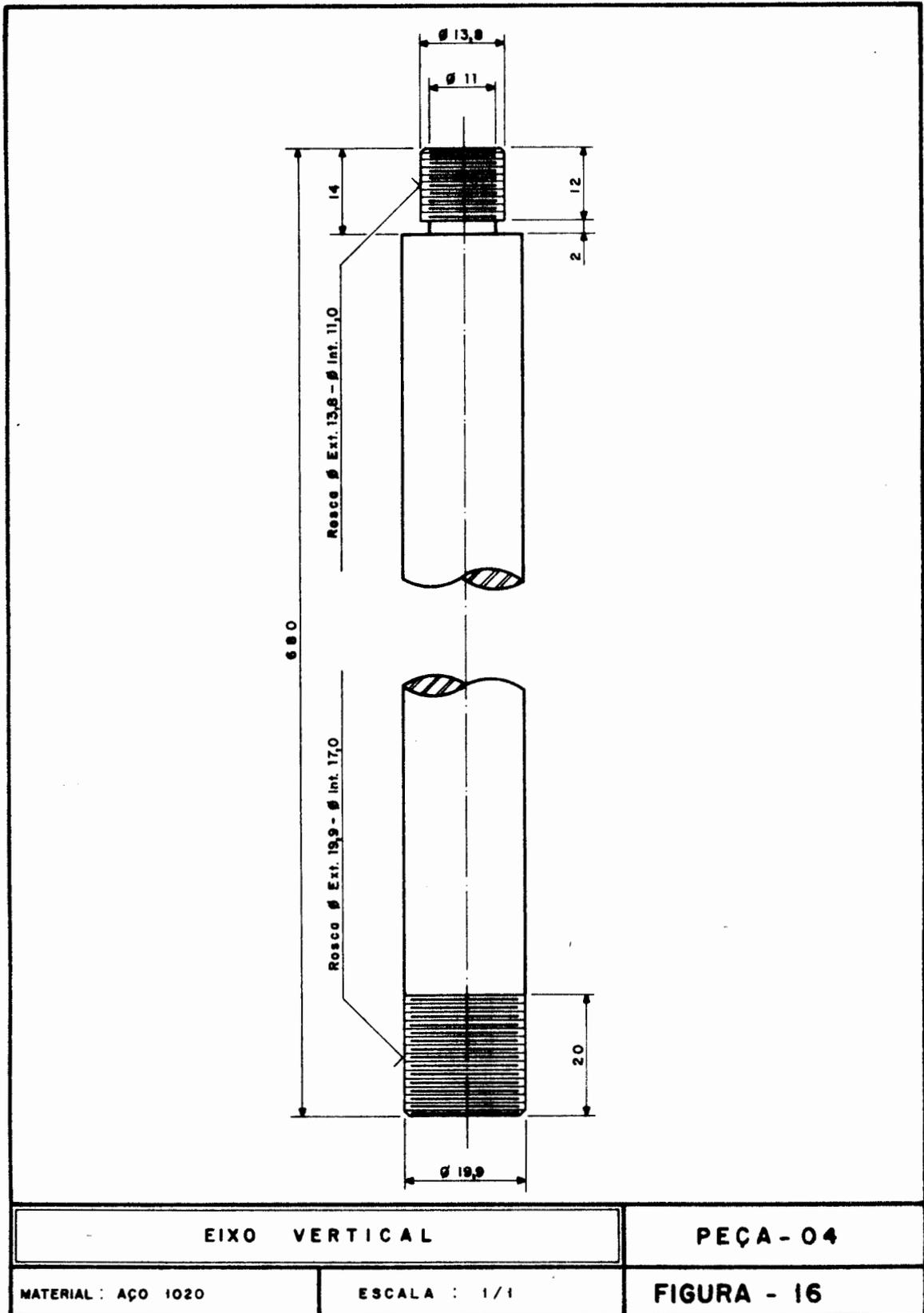
MATERIAL : CHAPA LAMINADA DE FERRO

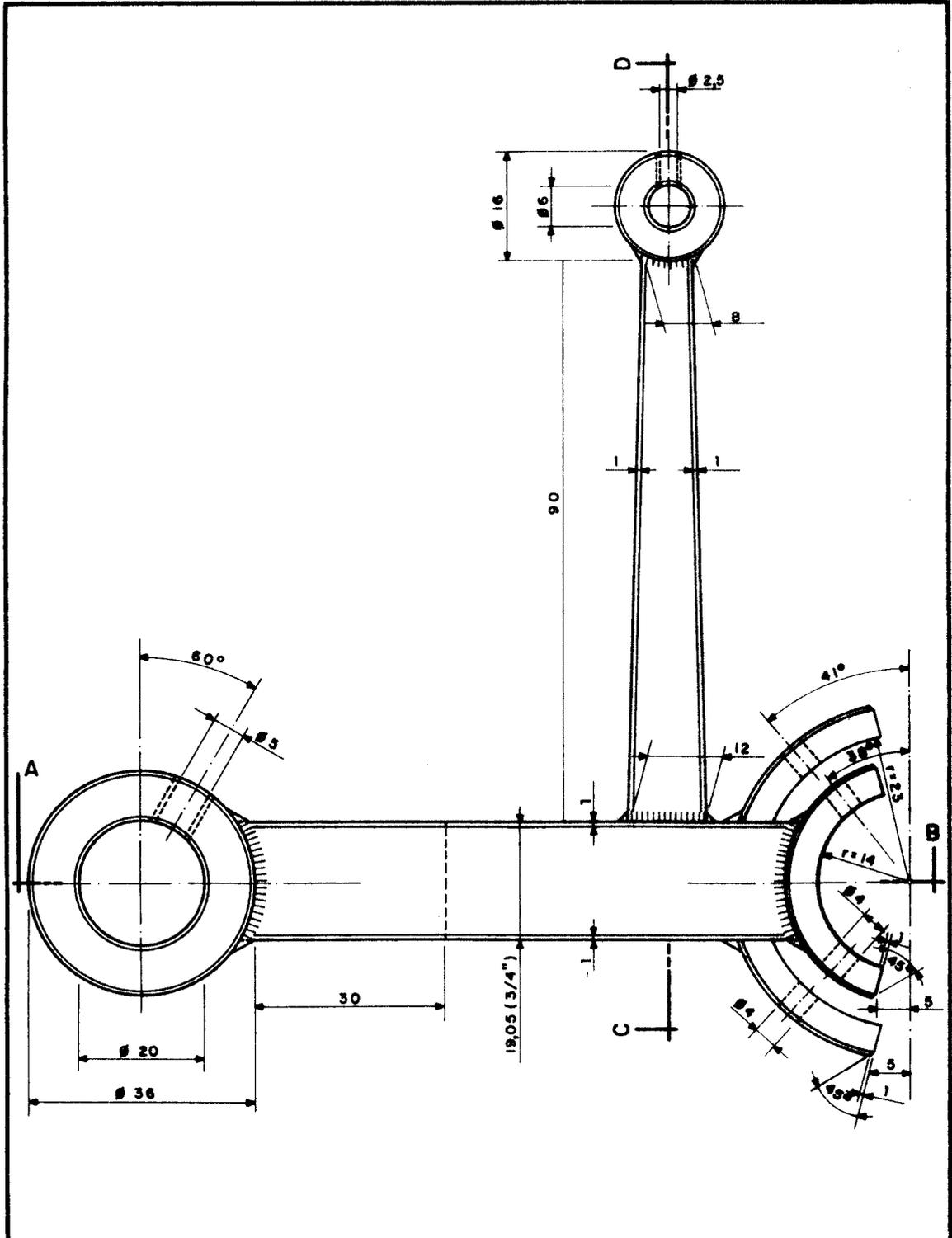
ESCALA : 1/1

FIGURA - 14

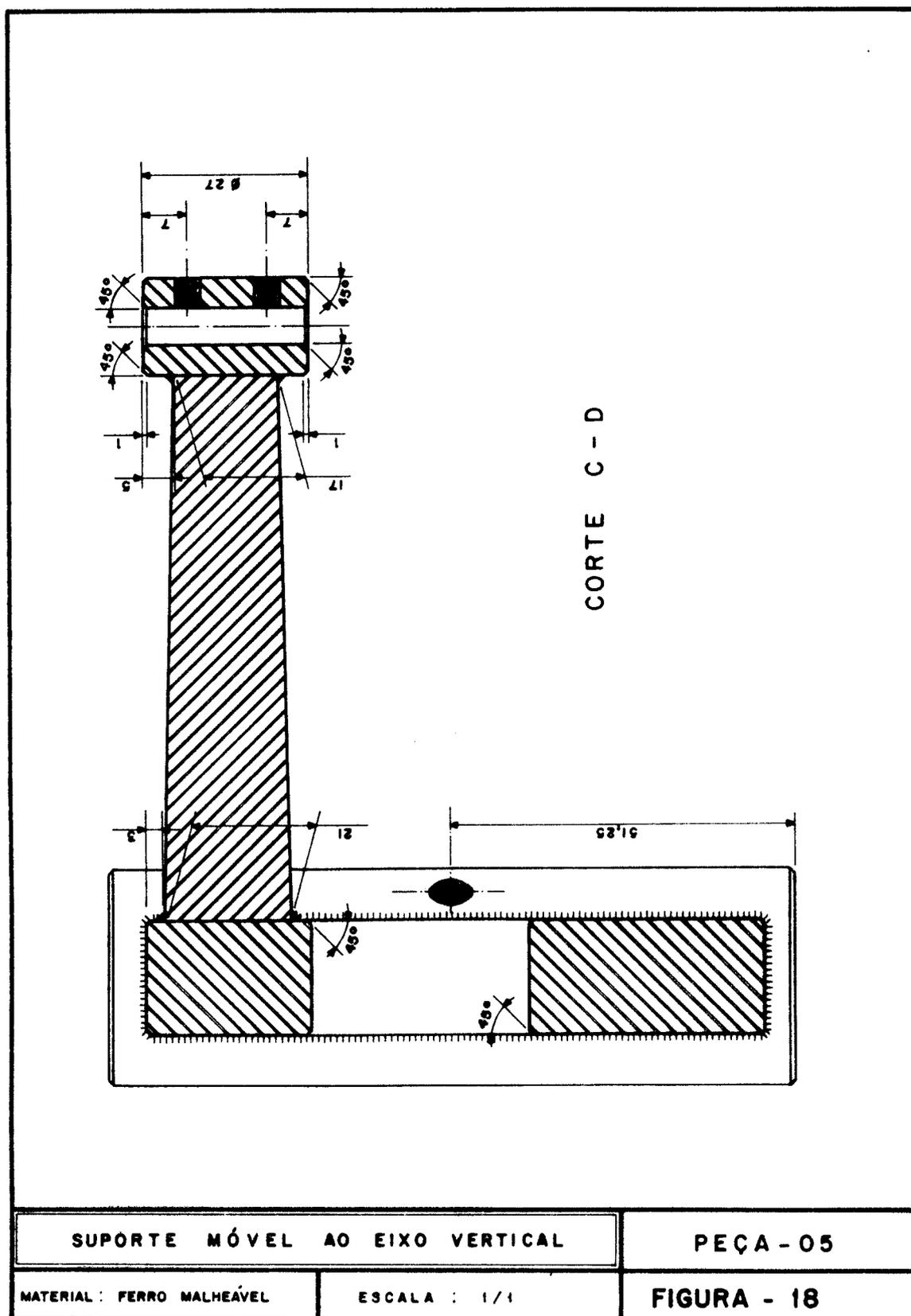


CALHA SUPORTE DO EIXO VERTICAL		PEÇA - 03
MATERIAL : CHAPA LAMINADA DE FERRO	ESCALA : 1/1	FIGURA - 15

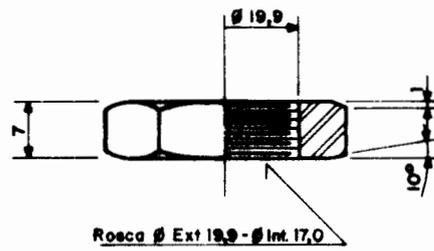




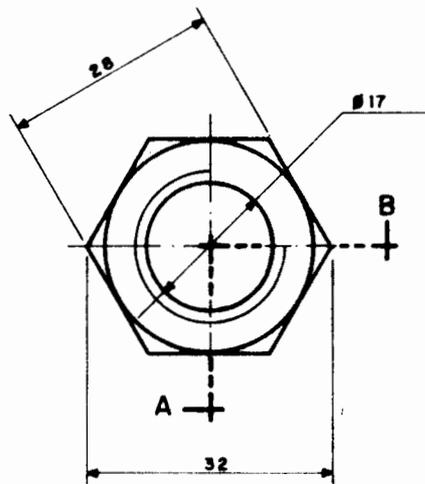
SUPOORTE MÓVEL AO EIXO VERTICAL		PEÇA - 05
MATERIAL : FERRO MALHEÁVEL	ESCALA : 1/1	FIGURA - 17



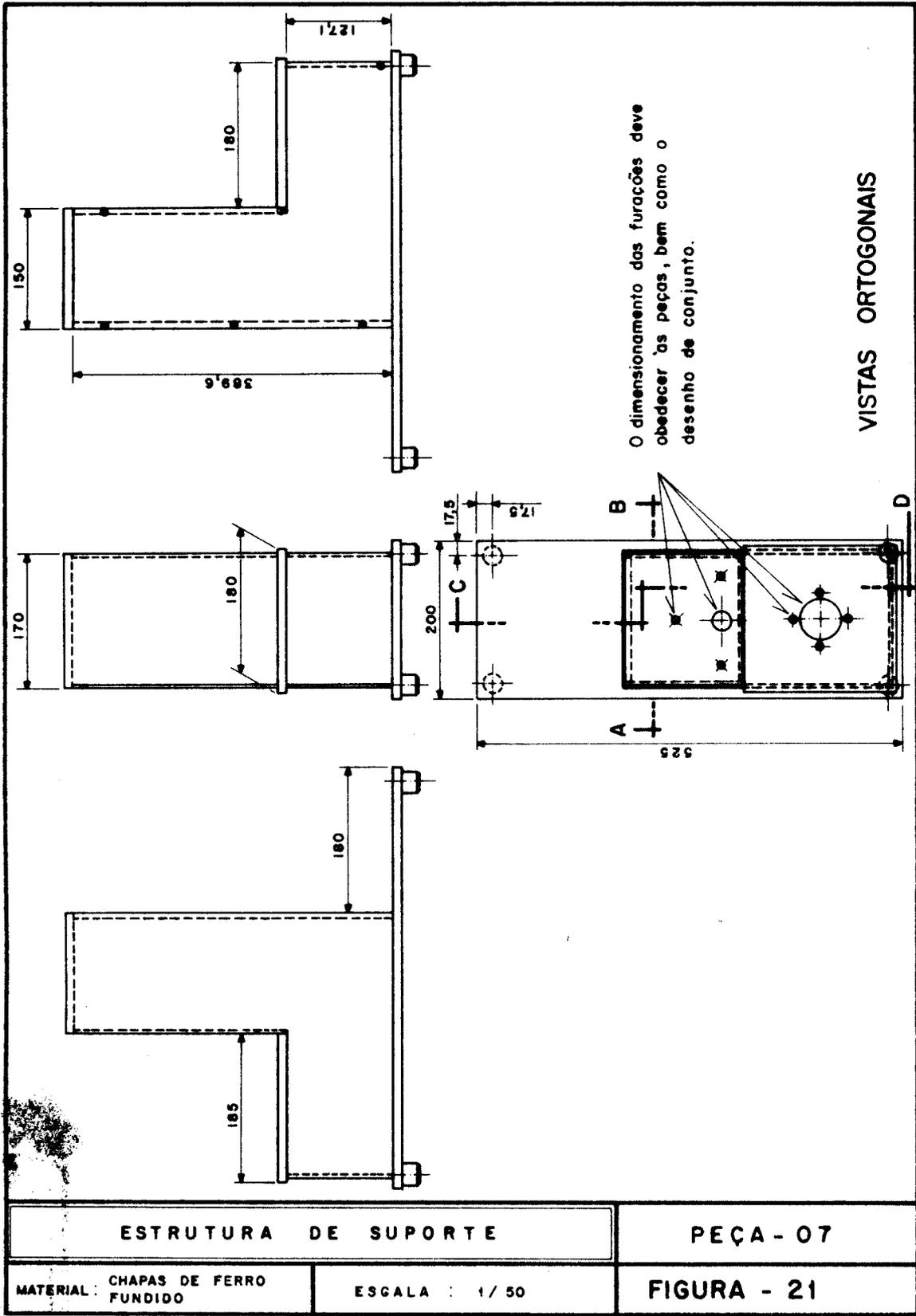


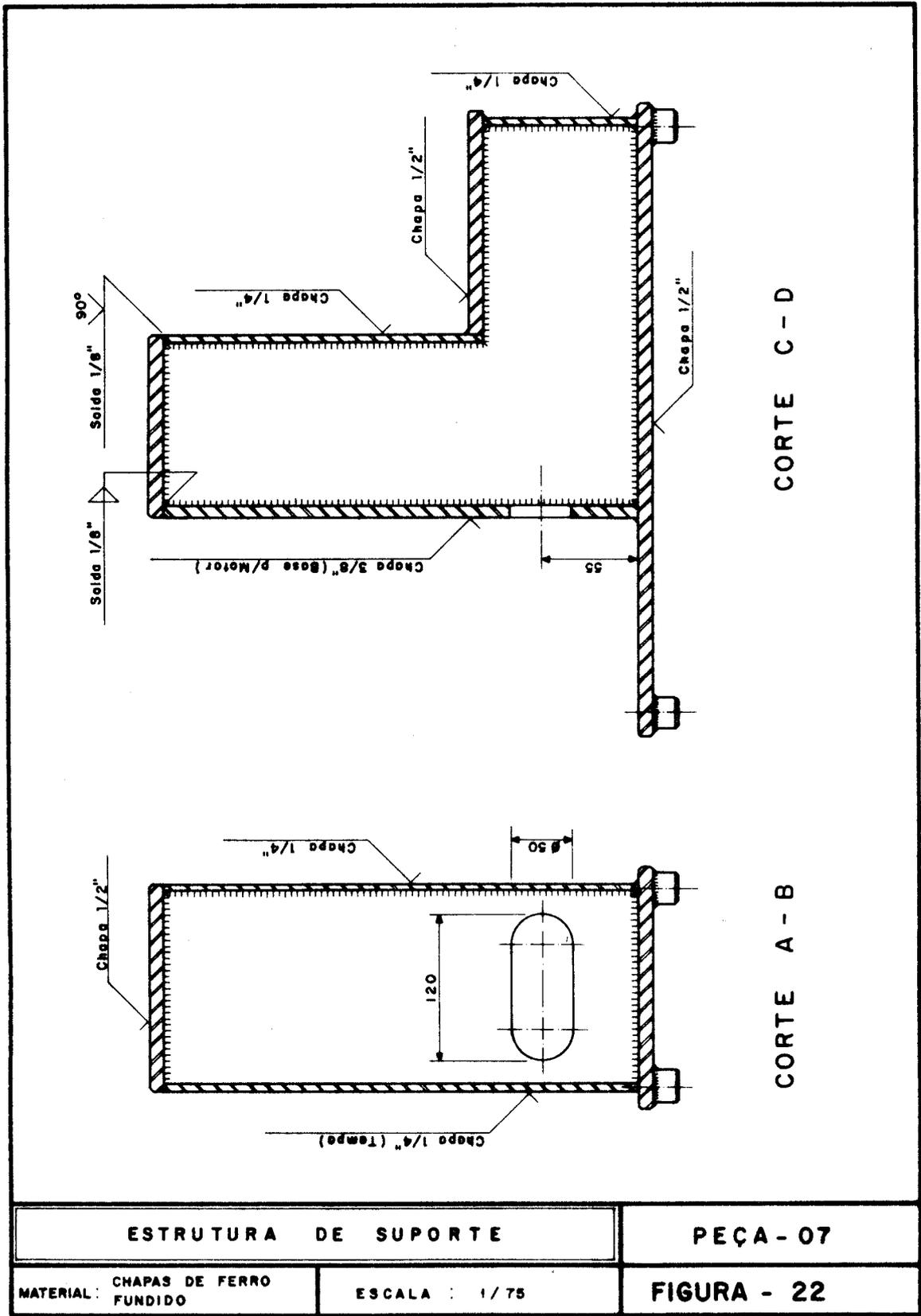


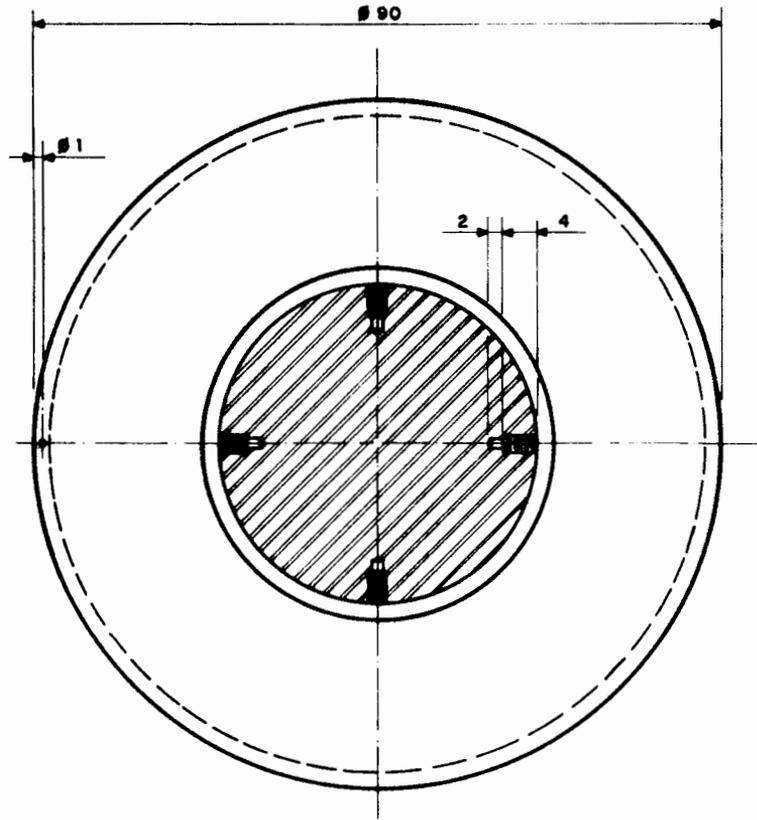
CORTE A - B



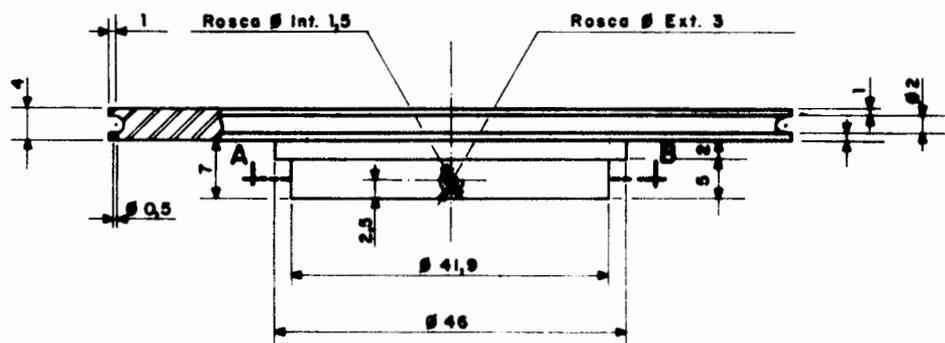
PORCA DE FIXAÇÃO INFERIOR DO EIXO VERTICAL		PEÇA - 06
MATERIAL : AÇO INOXIDÁVEL	ESCALA : 1/1	FIGURA - 20







CORTE A - B



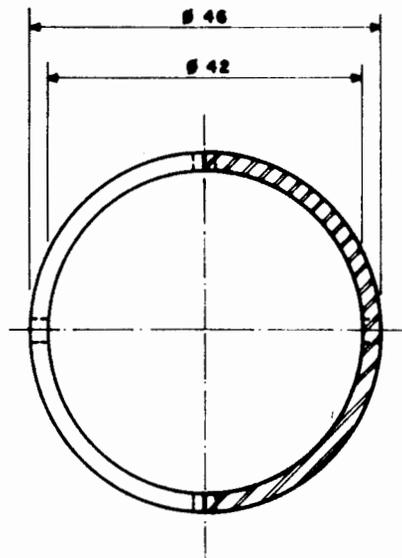
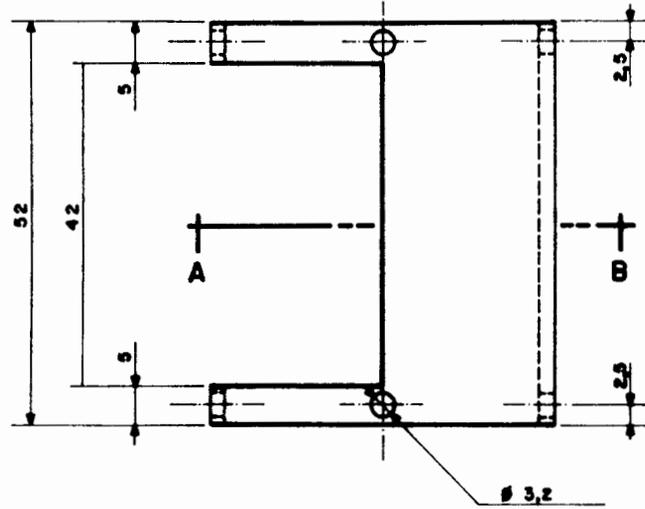
POLIA TRANSMISSORA DE TORQUES

PEÇA - 08

MATERIAL: ALUMINIO

ESCALA : 1/1

FIGURA - 23



CORTE A - B

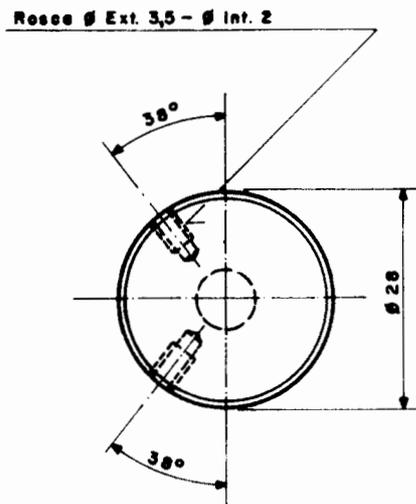
TUBO CILÍNDRICO

PEÇA - 09

MATERIAL : AÇO INOXIDÁVEL

ESCALA : 1/1

FIGURA - 24



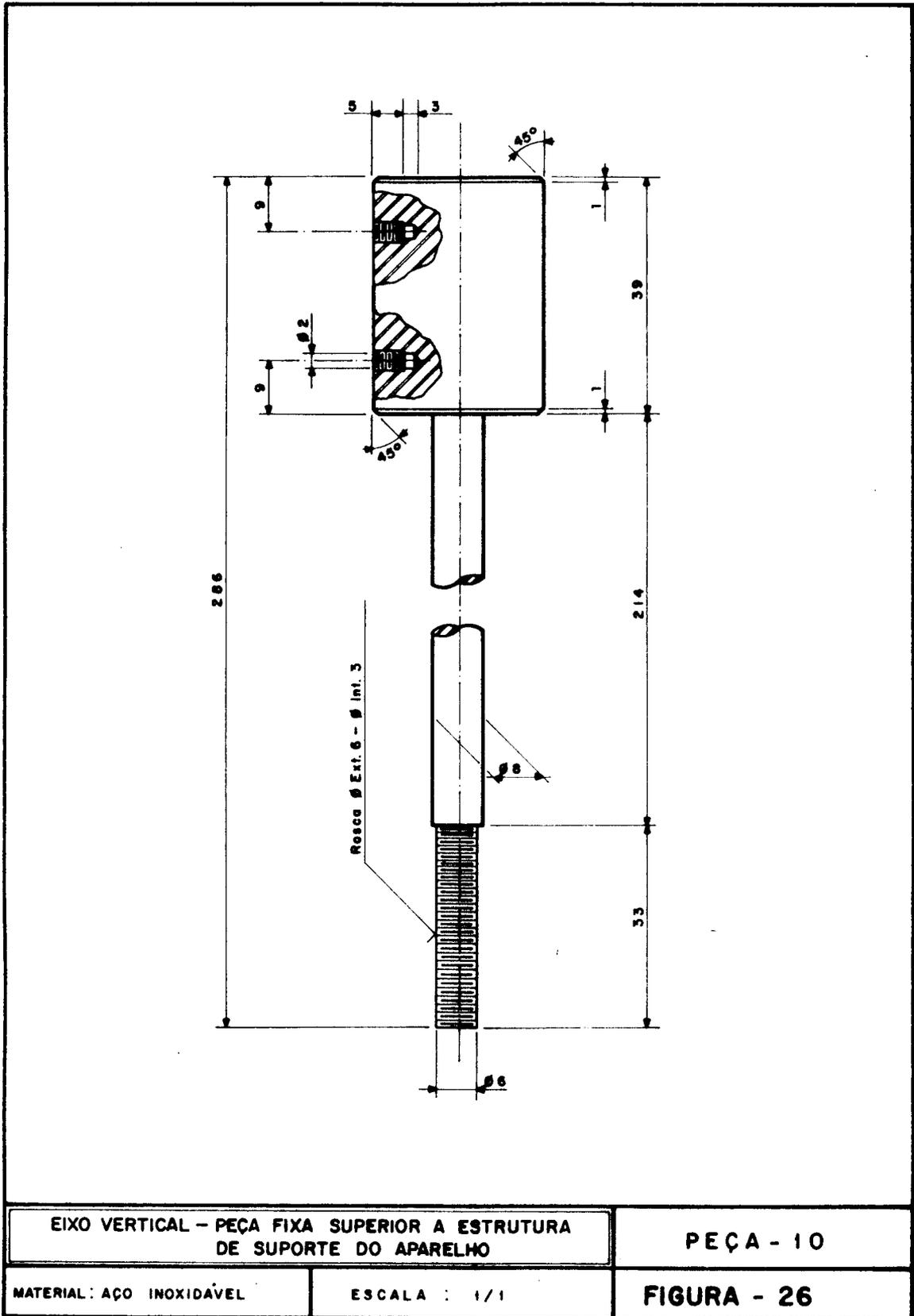
EIXO VERTICAL - PEÇA FIXA SUPERIOR A ESTRUTURA  
DE SUPORTE DO APARELHO

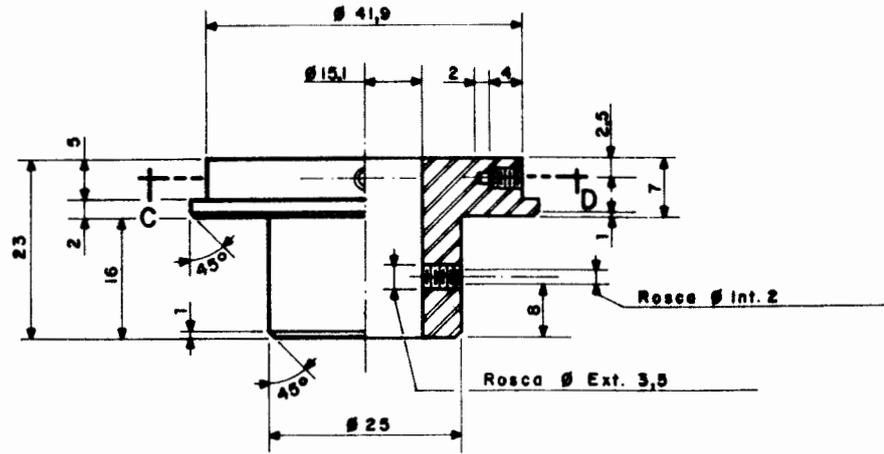
PEÇA - 10

MATERIAL: AÇO INOXIDÁVEL

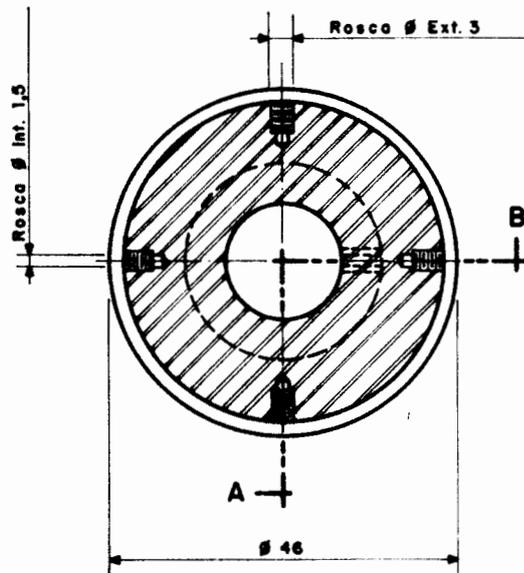
ESCALA : 1/1

FIGURA - 25

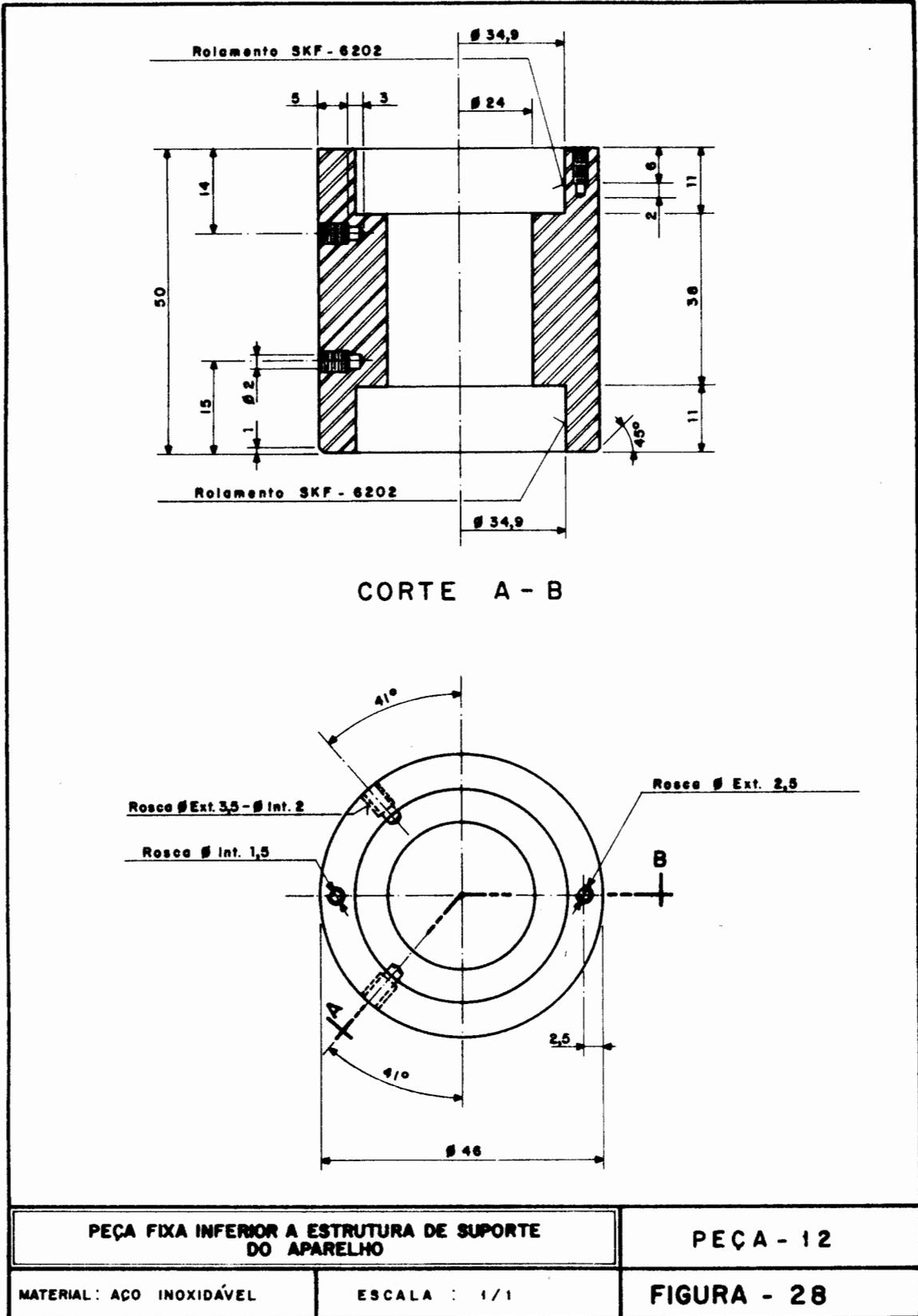


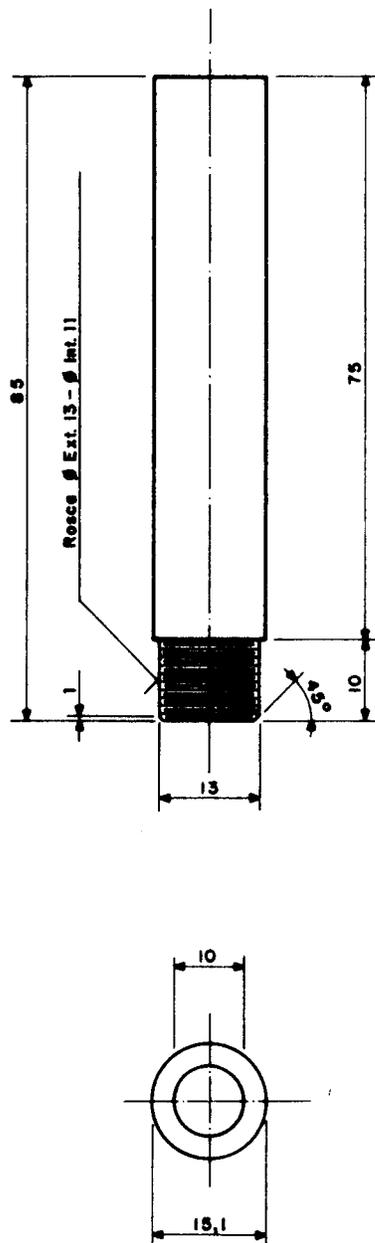


CORTE A - B

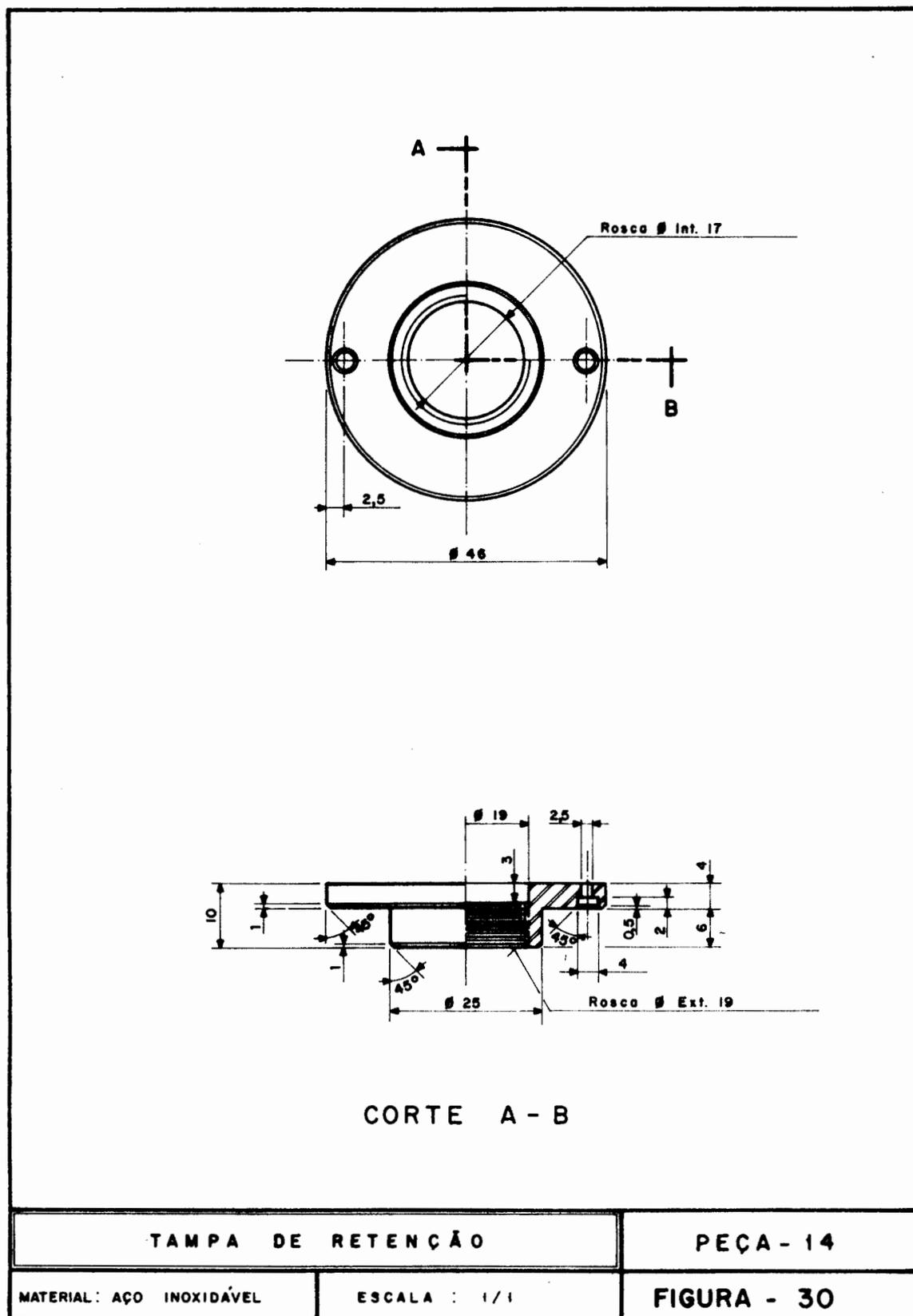


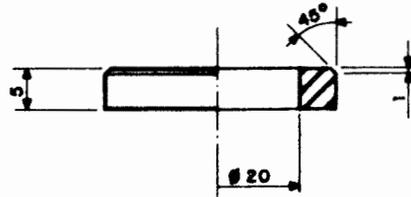
BASE DO SISTEMA DE TRANSMISSÃO DE TORQUES		PEÇA - 11
MATERIAL: AÇO INOXIDÁVEL	ESCALA : 1/1	FIGURA - 27



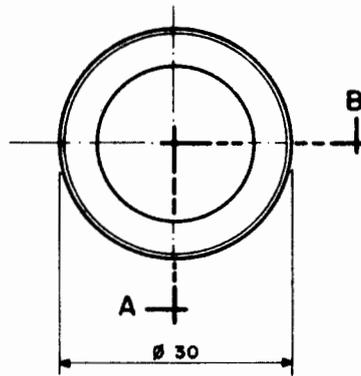


TUBO DE FIXAÇÃO		PEÇA - 13
MATERIAL: AÇO INOXIDÁVEL	ESCALA : 1/1	FIGURA - 29





CORTE A - B



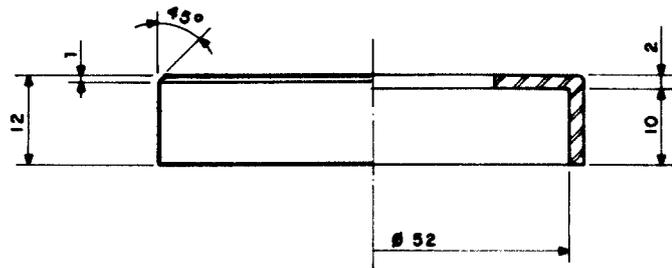
ARRUELA DE PROTEÇÃO

PEÇA - 15

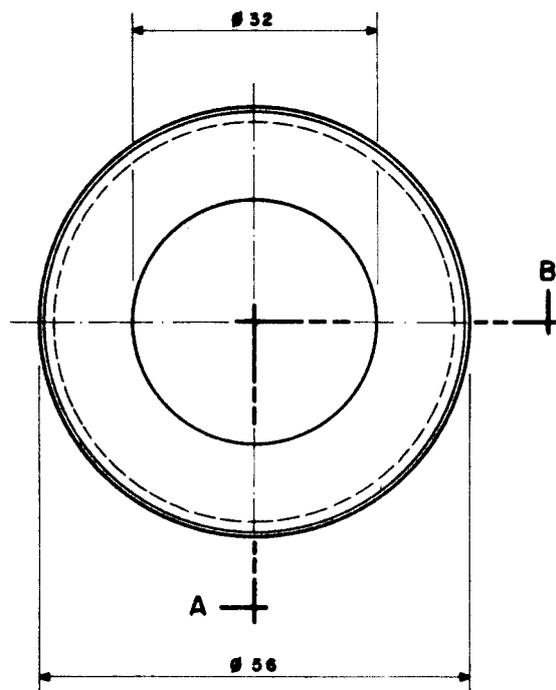
MATERIAL: AÇO INOXIDÁVEL

ESCALA : 1/1

FIGURA - 31



CORTE A - B



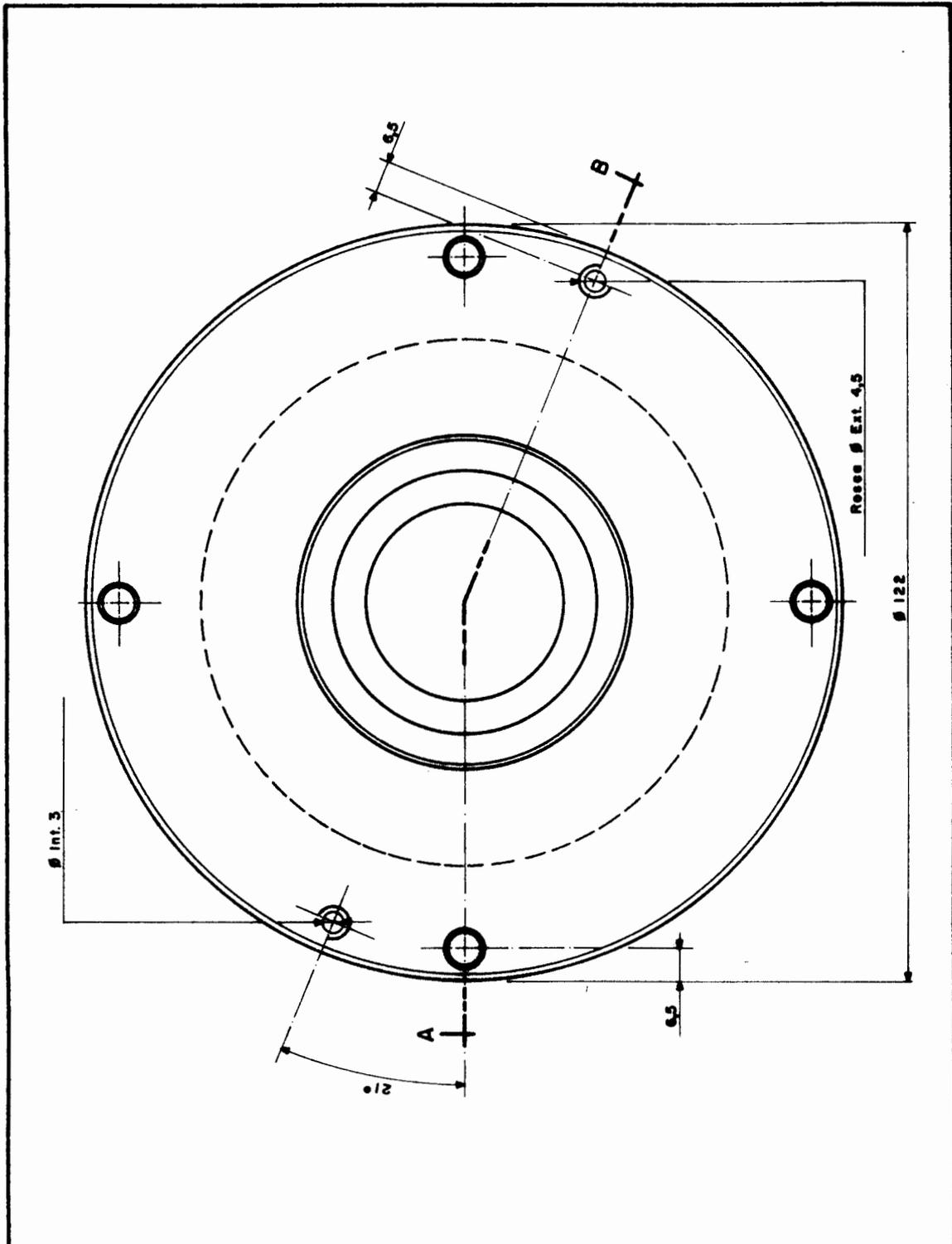
TAMPA PROTETORA

PEÇA - 16

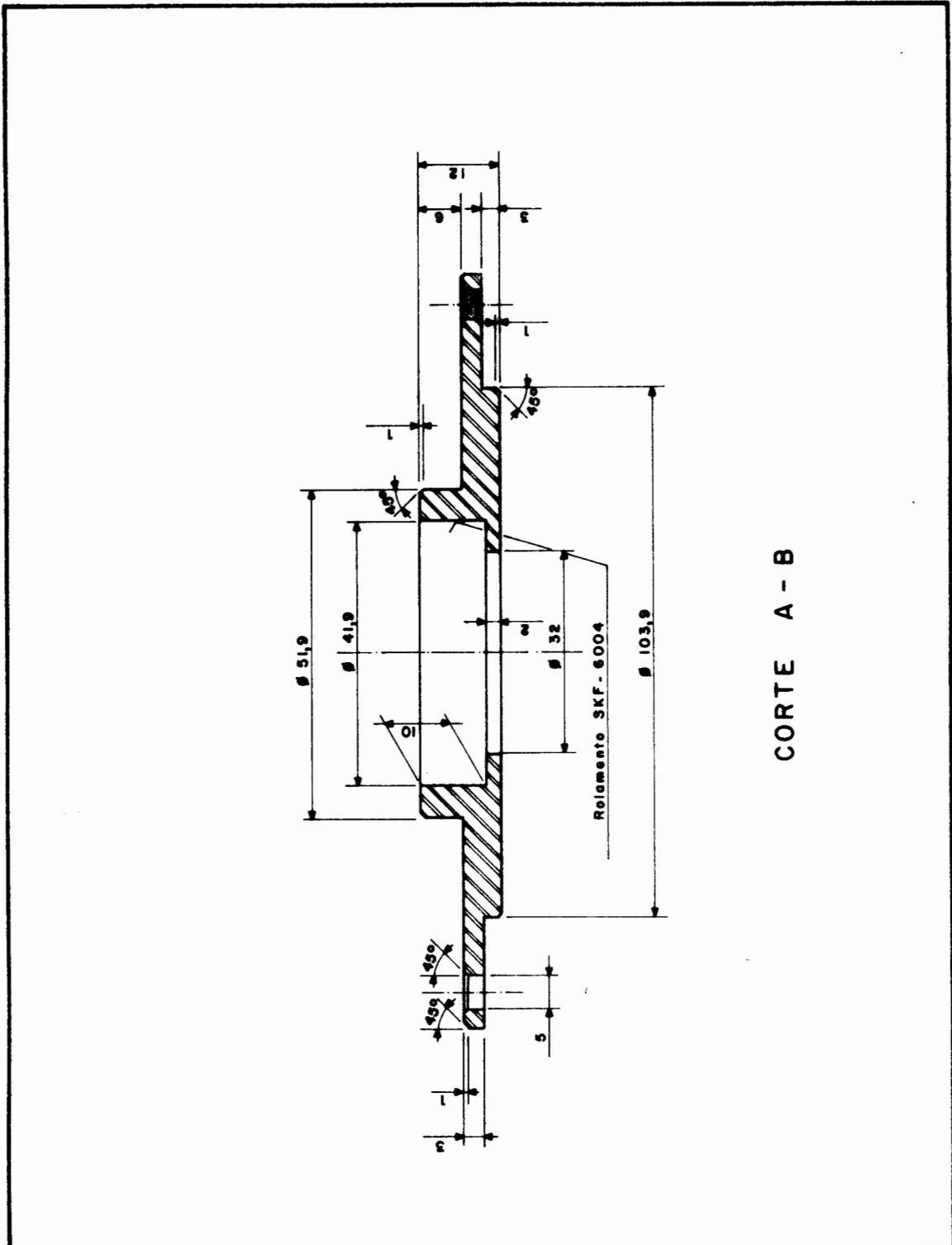
MATERIAL: AÇO INOXIDÁVEL

ESCALA : 1/1

FIGURA - 32

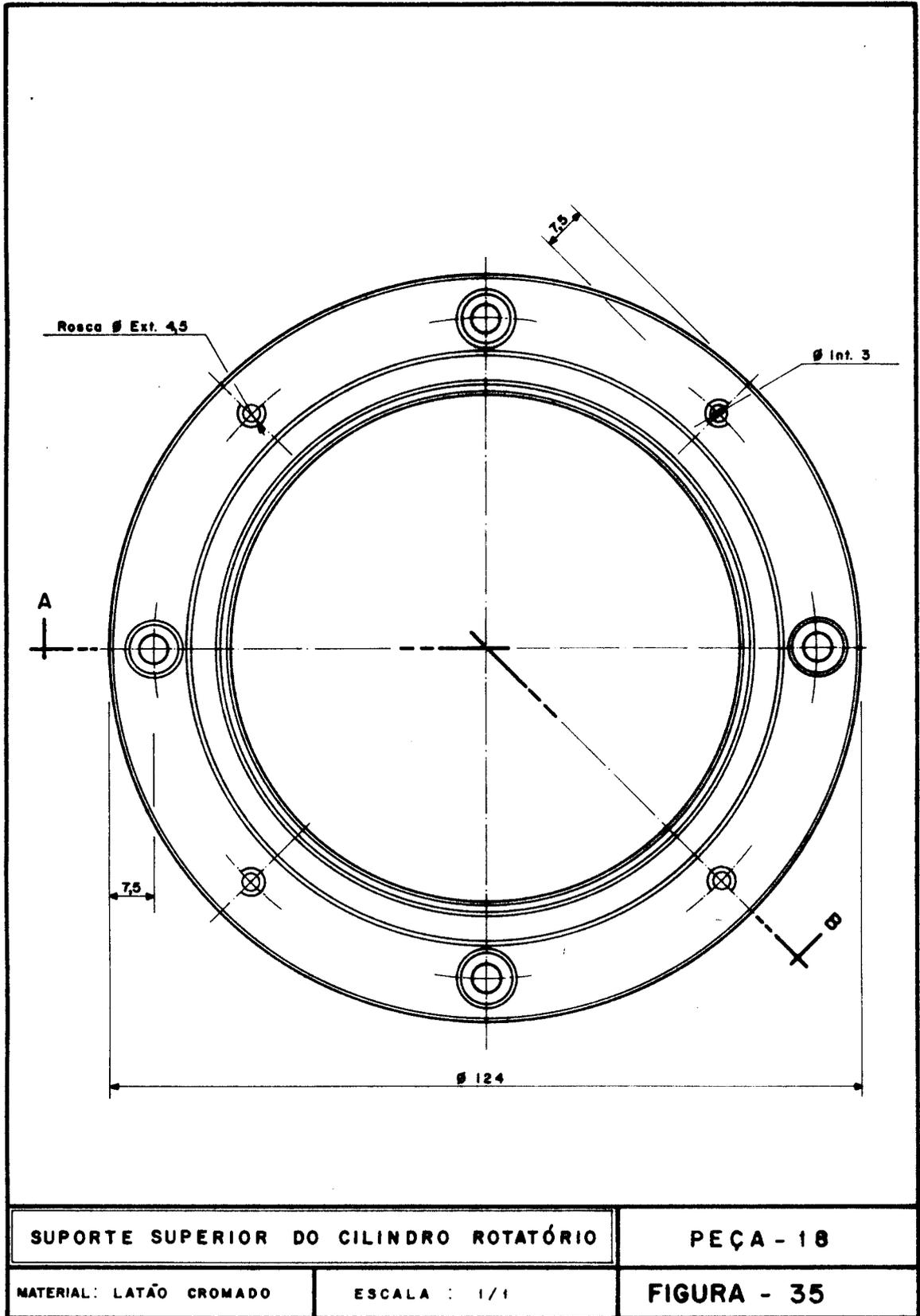


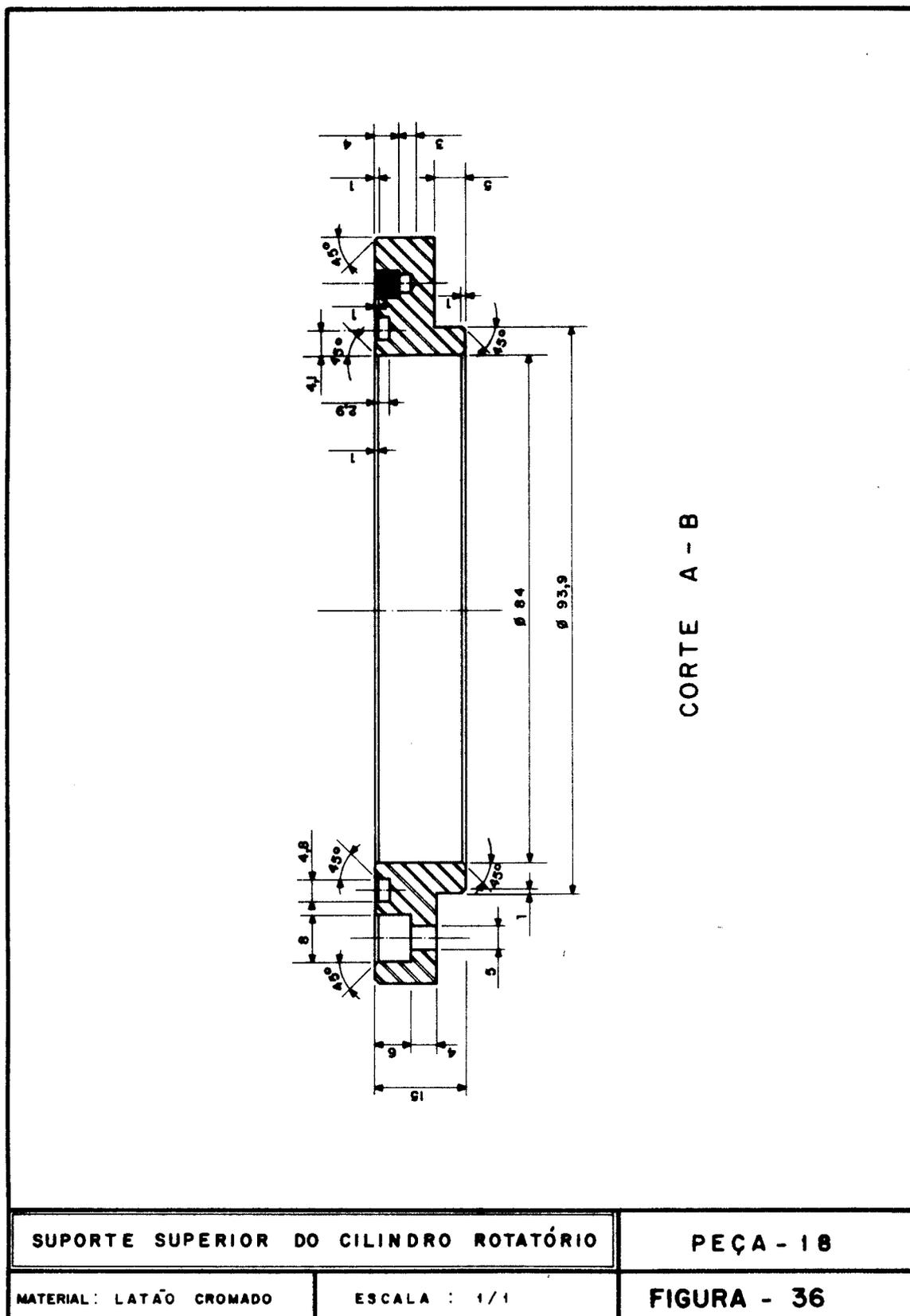
TAMPA DO CILINDRO ROTATÓRIO		PEÇA - 17
MATERIAL: AÇO INOXIDÁVEL	ESCALA : 1/1	FIGURA - 33

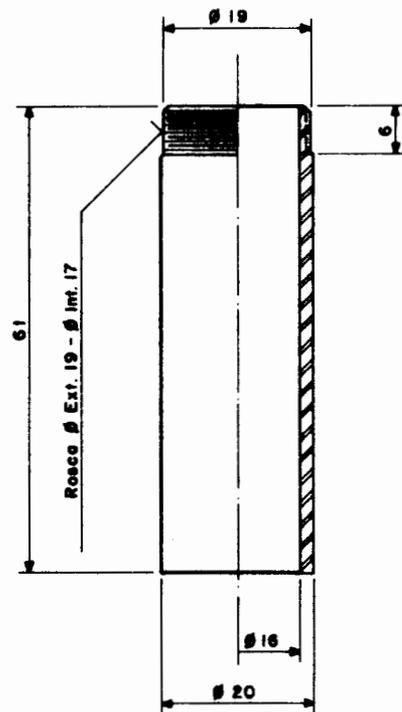


CORTE A - B

TAMPA DO CILINDRO ROTATÓRIO		PEÇA - 17
MATERIAL: AÇO INOXIDÁVEL	ESCALA : 1/1	FIGURA - 34







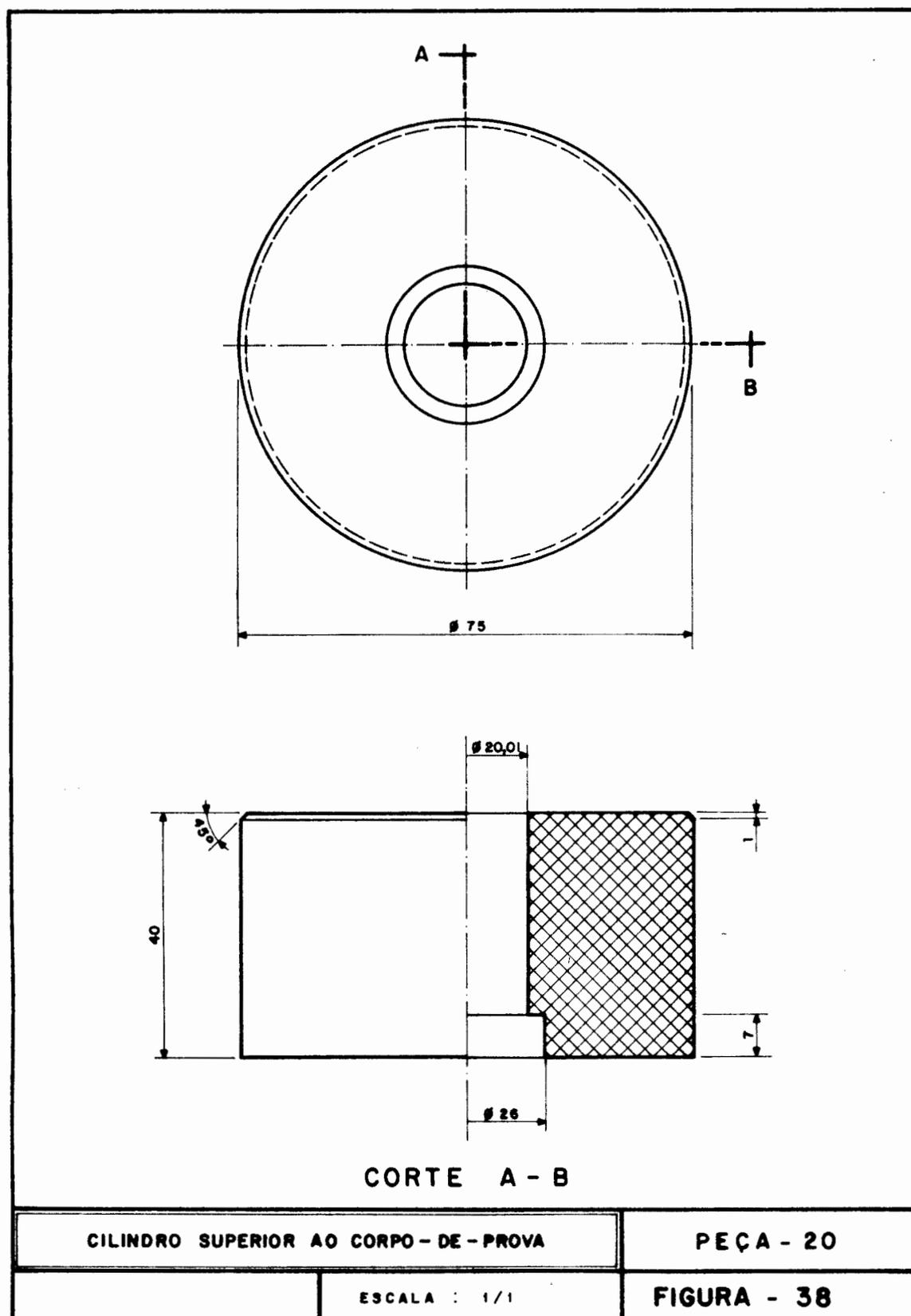
TUBO DE FIXAÇÃO DO CILINDRO SUPERIOR AO  
CORPO - DE - PROVA

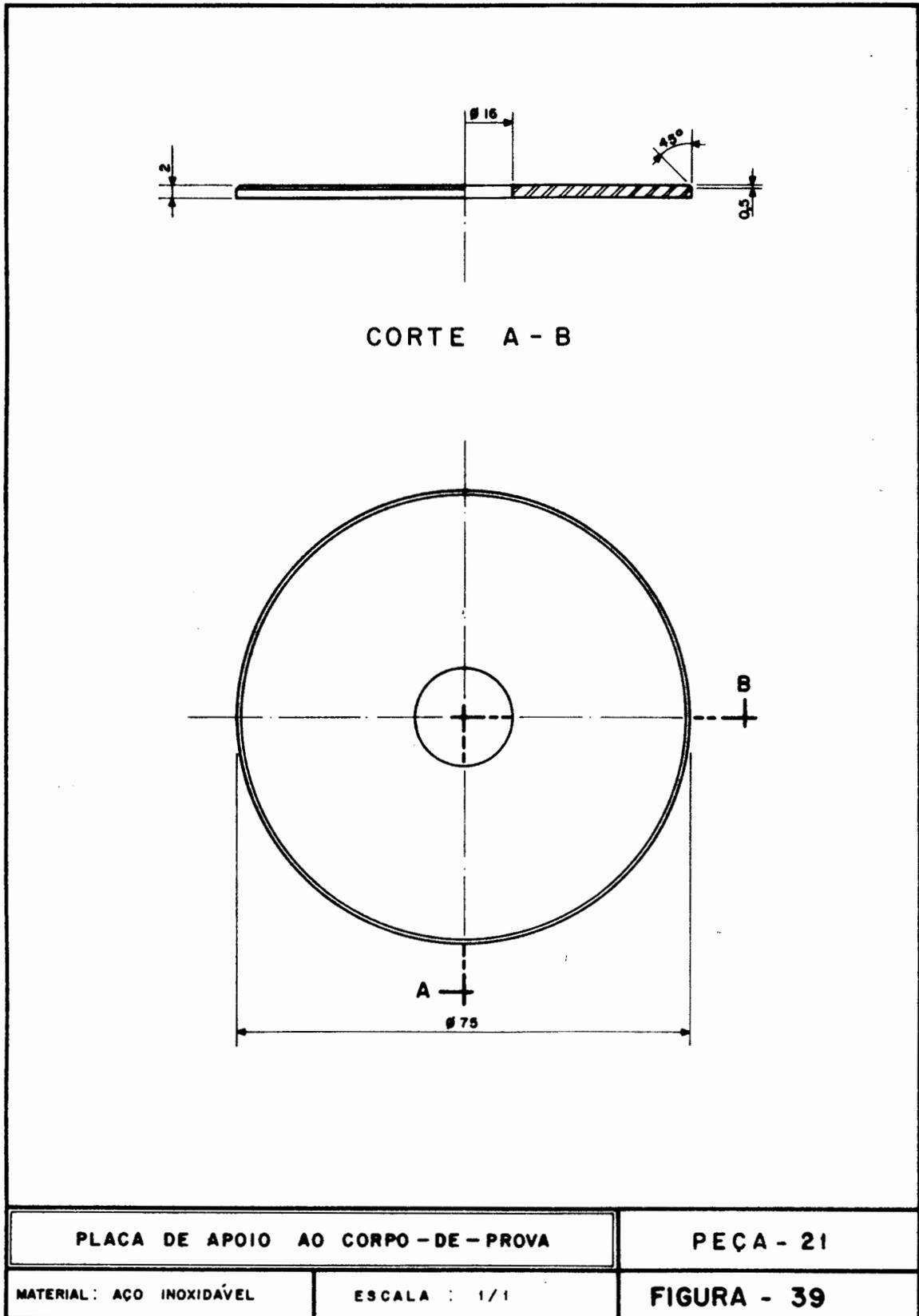
PEÇA - 19

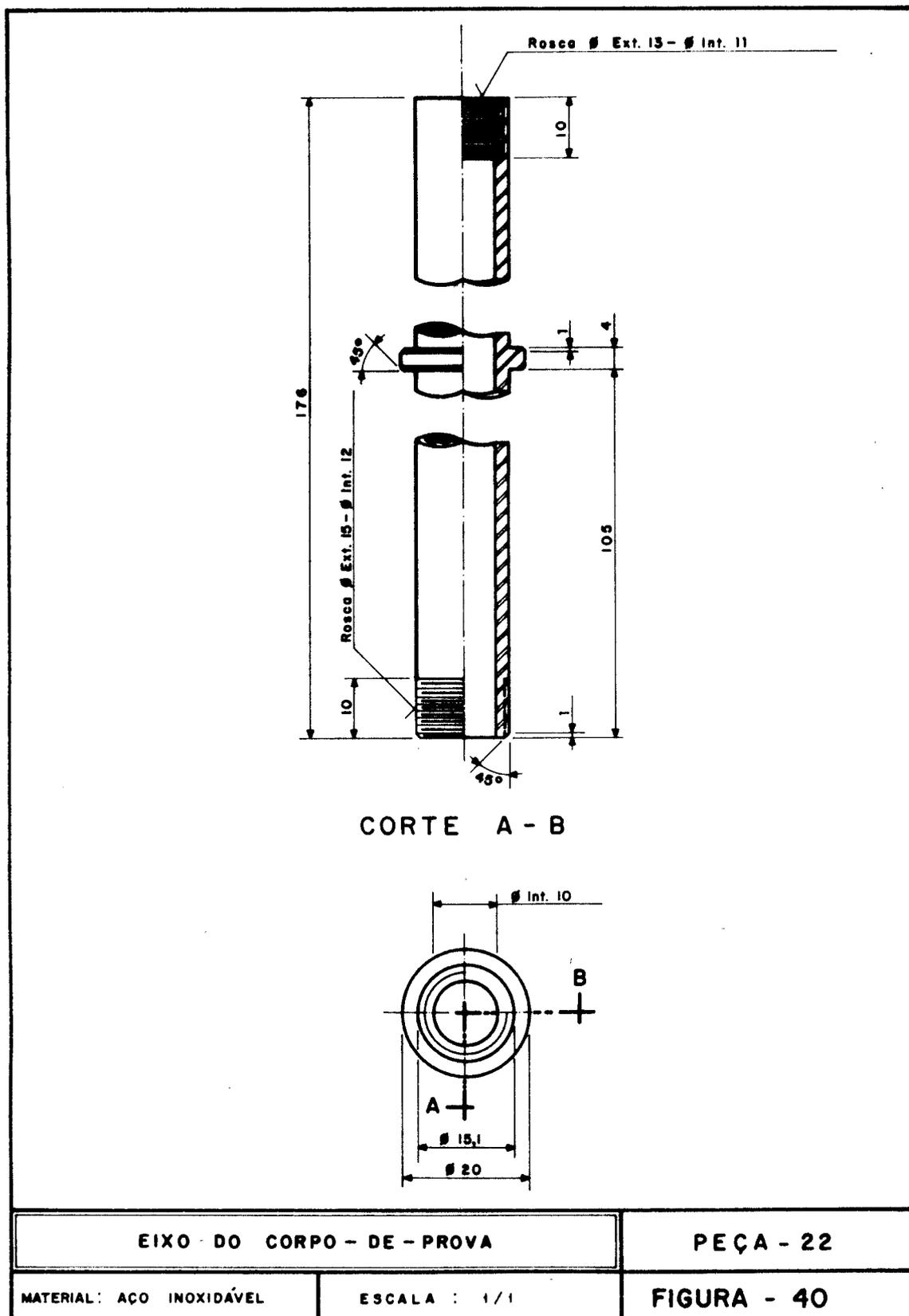
MATERIAL: AÇO INOXIDÁVEL

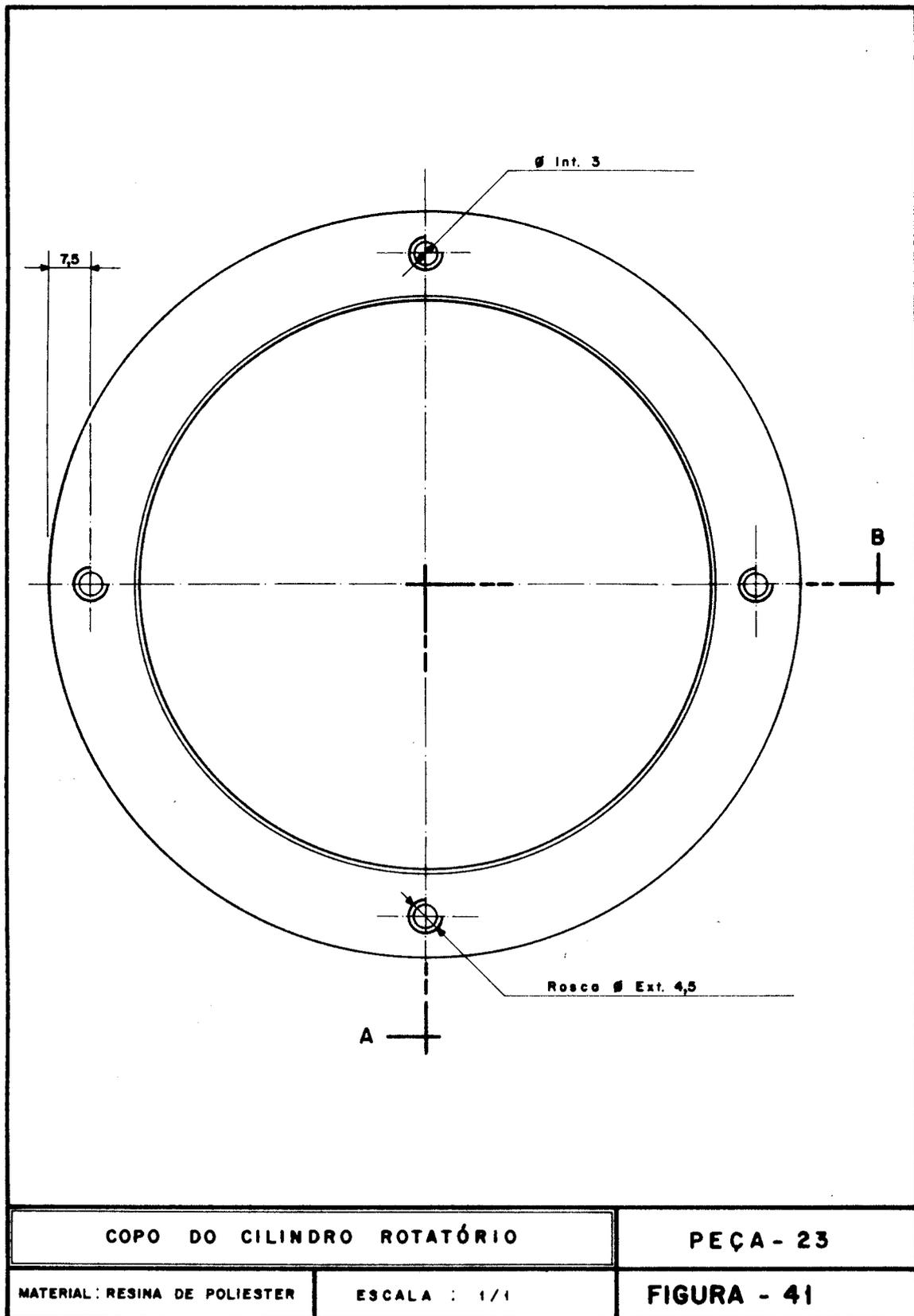
ESCALA : 1/1

FIGURA - 37

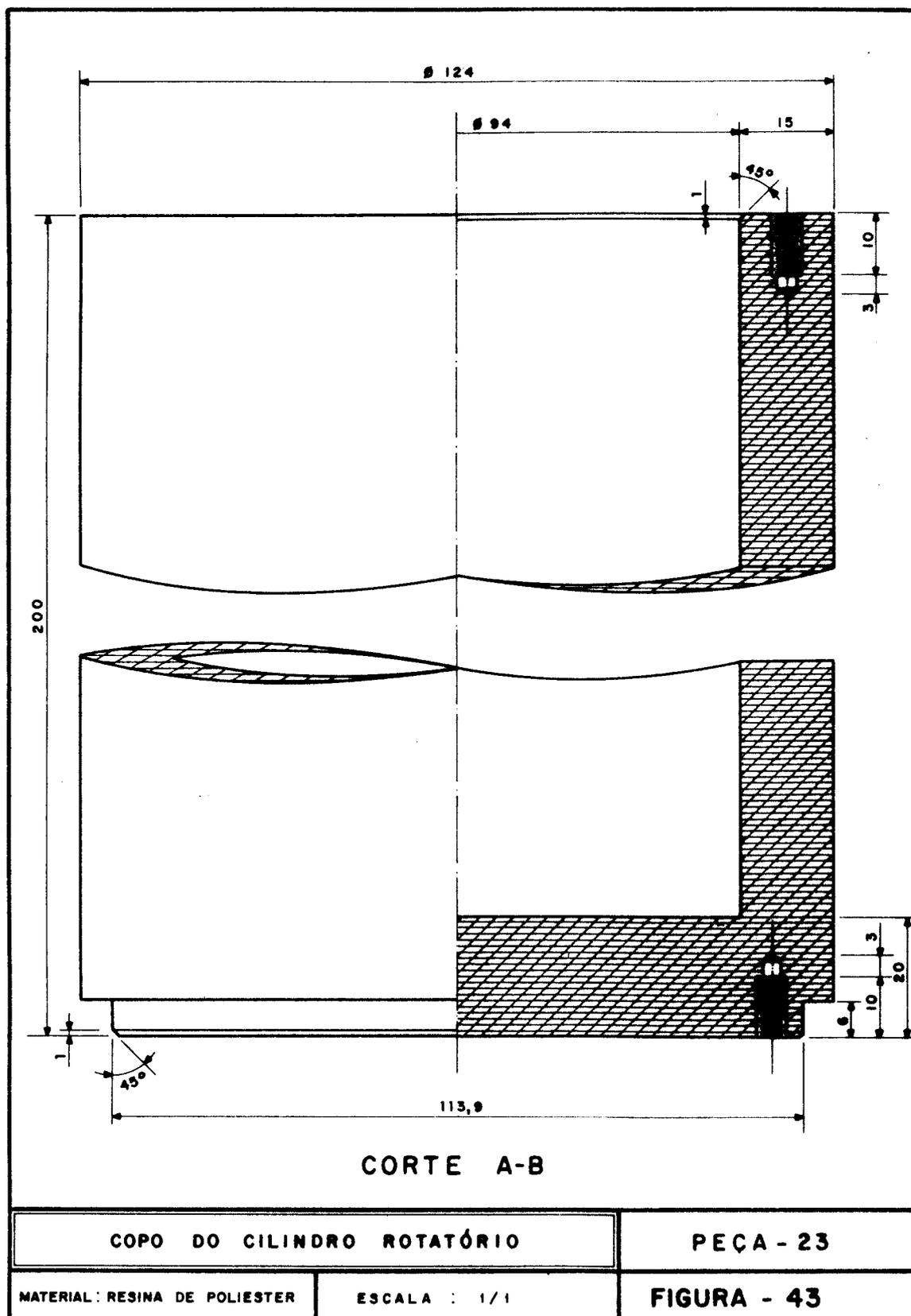


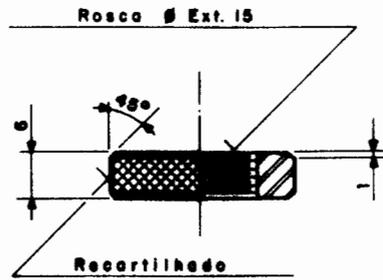




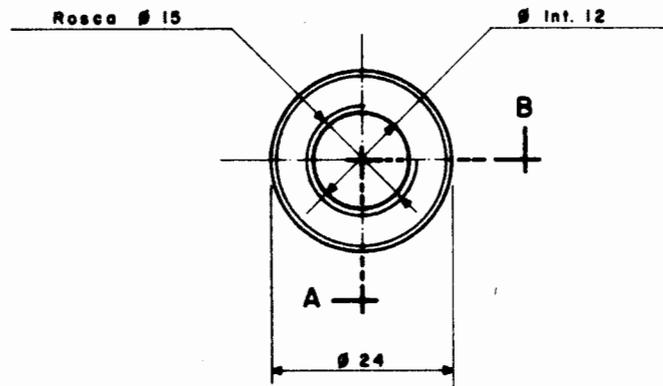




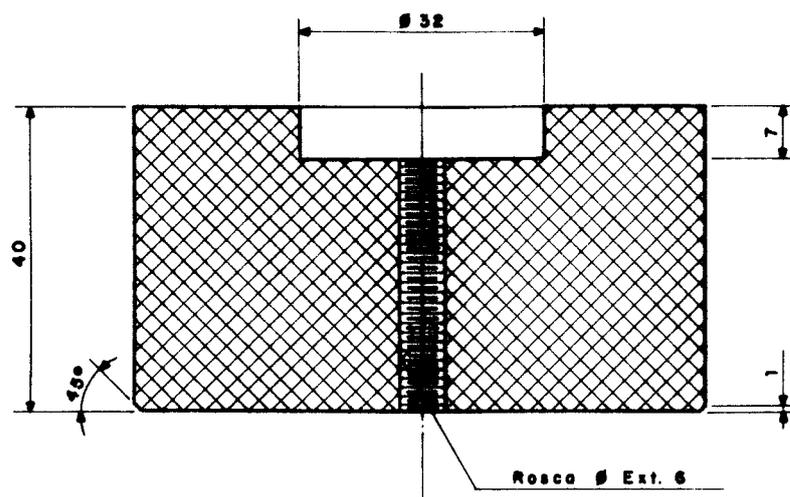




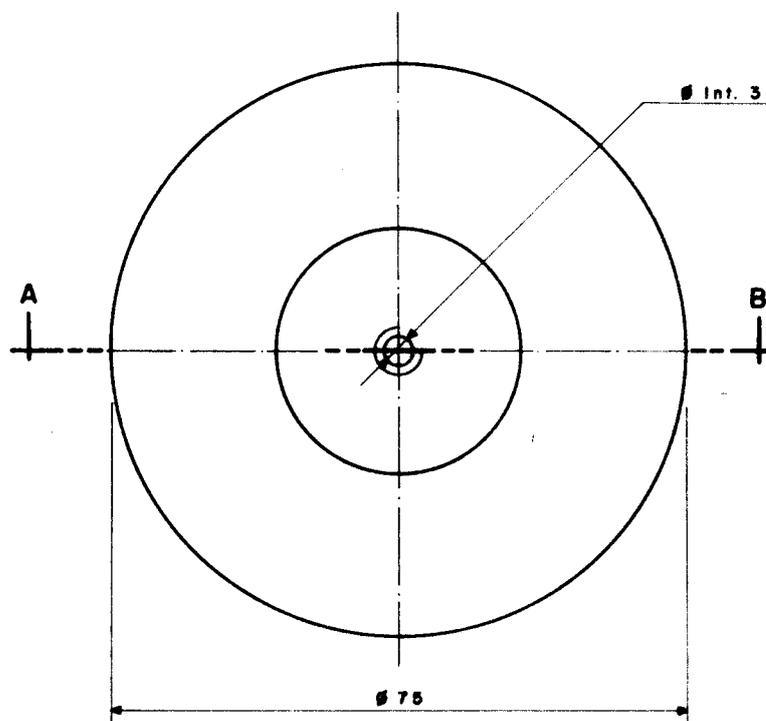
CORTE A - B



<p>PORCA DE FIXAÇÃO</p>		<p>PEÇA - 24</p>
<p>MATERIAL: AÇO INOXIDÁVEL</p>	<p>ESCALA : 1/1</p>	<p>FIGURA - 44</p>



CORTE A - B

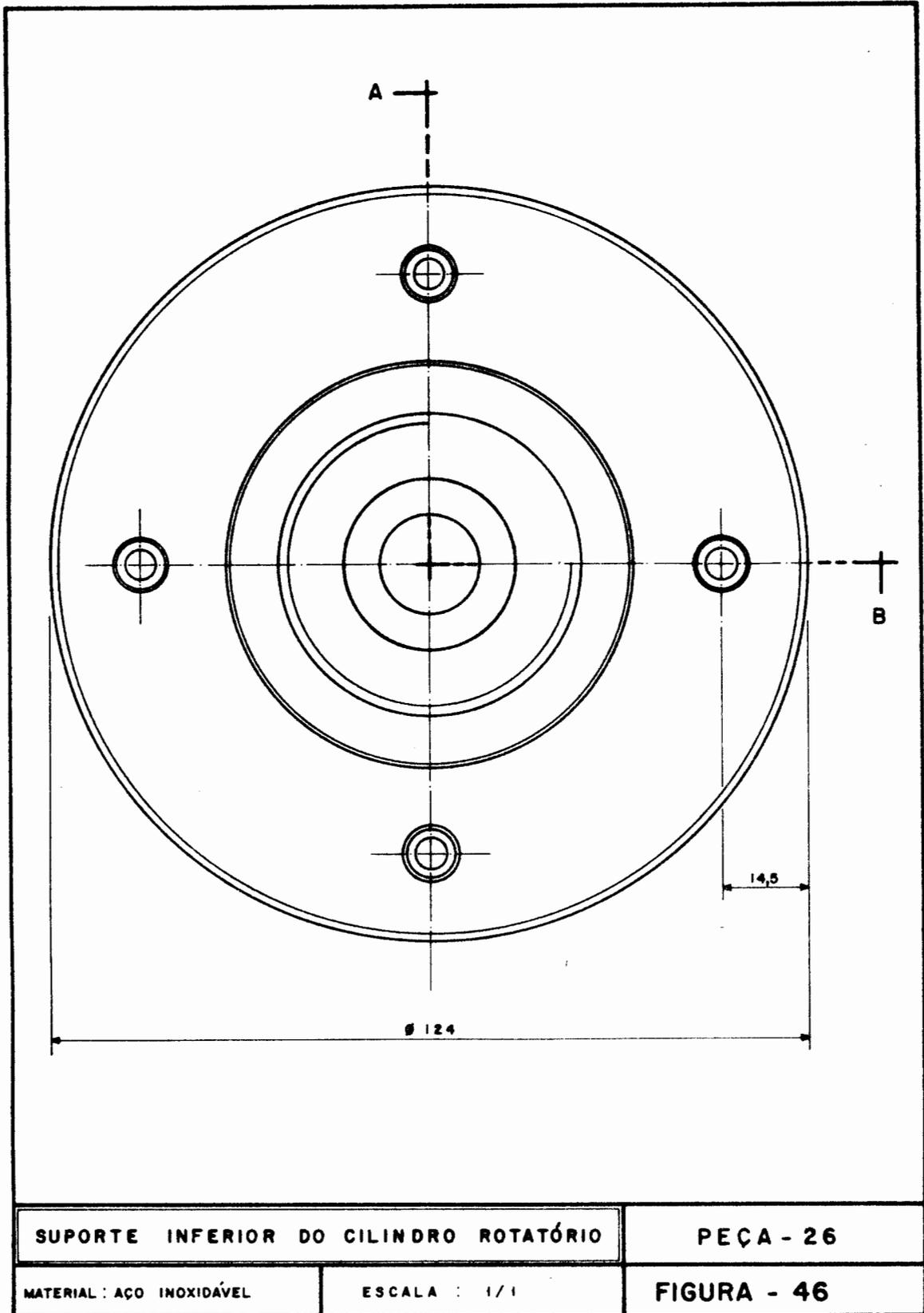


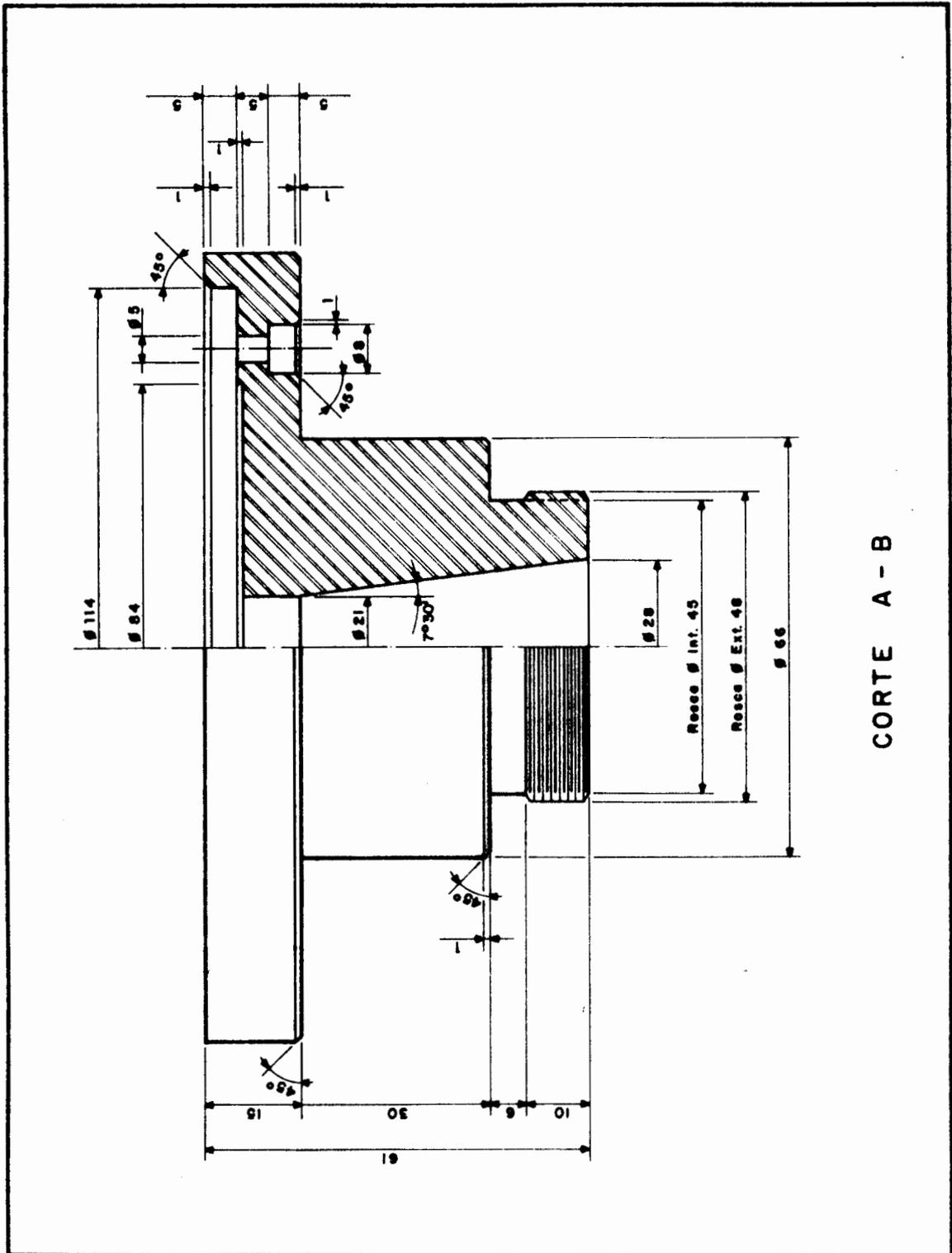
CILINDRO INFERIOR AO CORPO - DE - PROVA

PEÇA - 25

ESCALA : 1/1

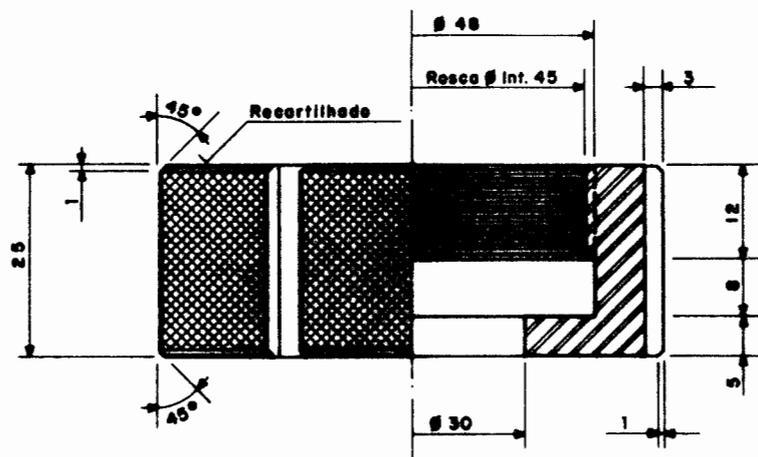
FIGURA - 45



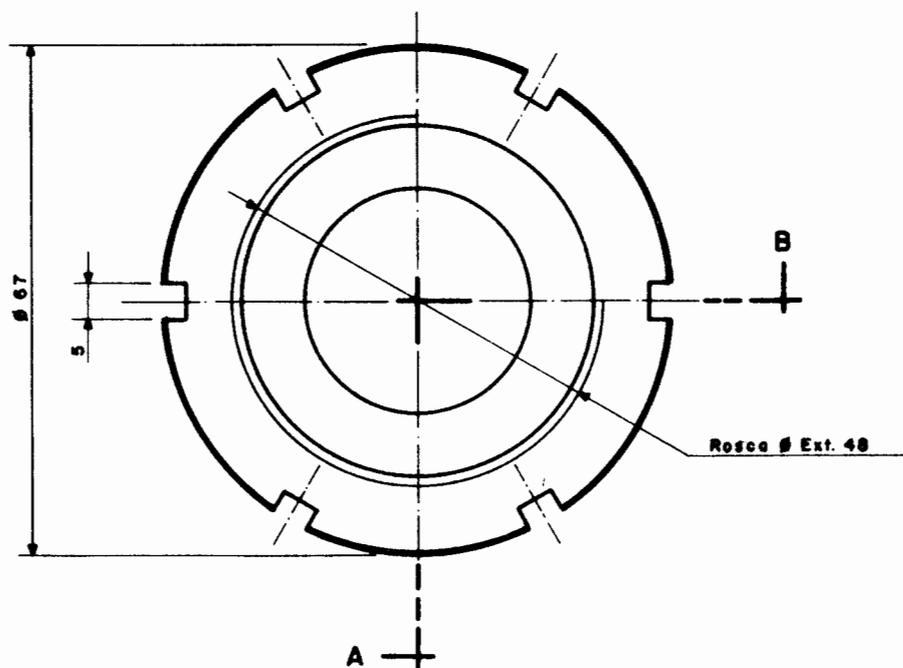


CORTE A - B

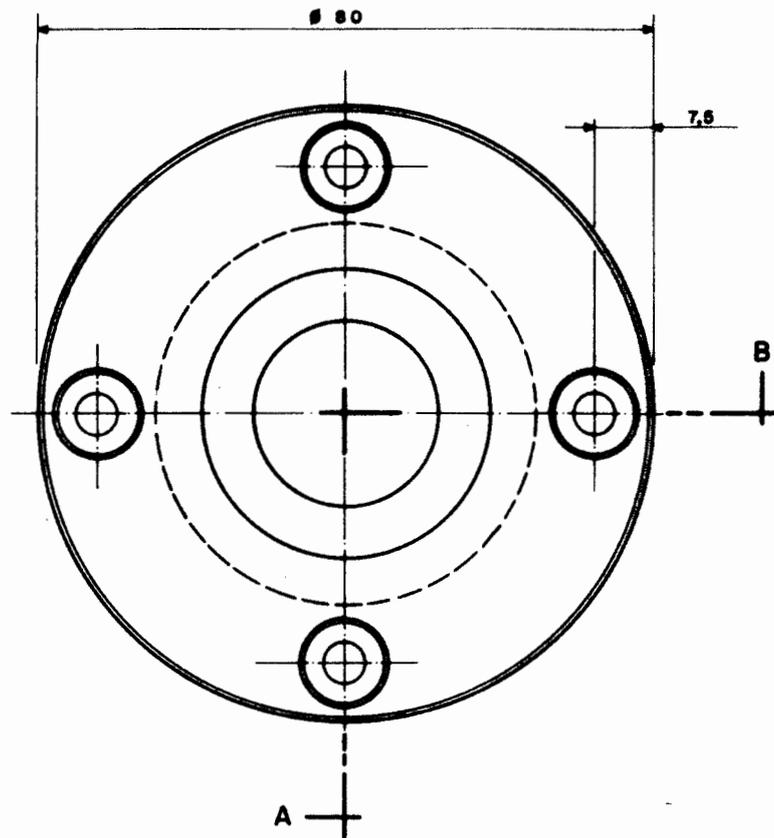
SUPOORTE INFERIOR DO CILINDRO ROTATÓRIO		PEÇA - 26
MATERIAL : AÇO INOXIDÁVEL	ESCALA : 1/1	FIGURA - 47



CORTE A - B



PORCA DE FIXAÇÃO		PEÇA - 27
MATERIAL: AÇO INOXIDÁVEL	ESCALA : 1/1	FIGURA - 48



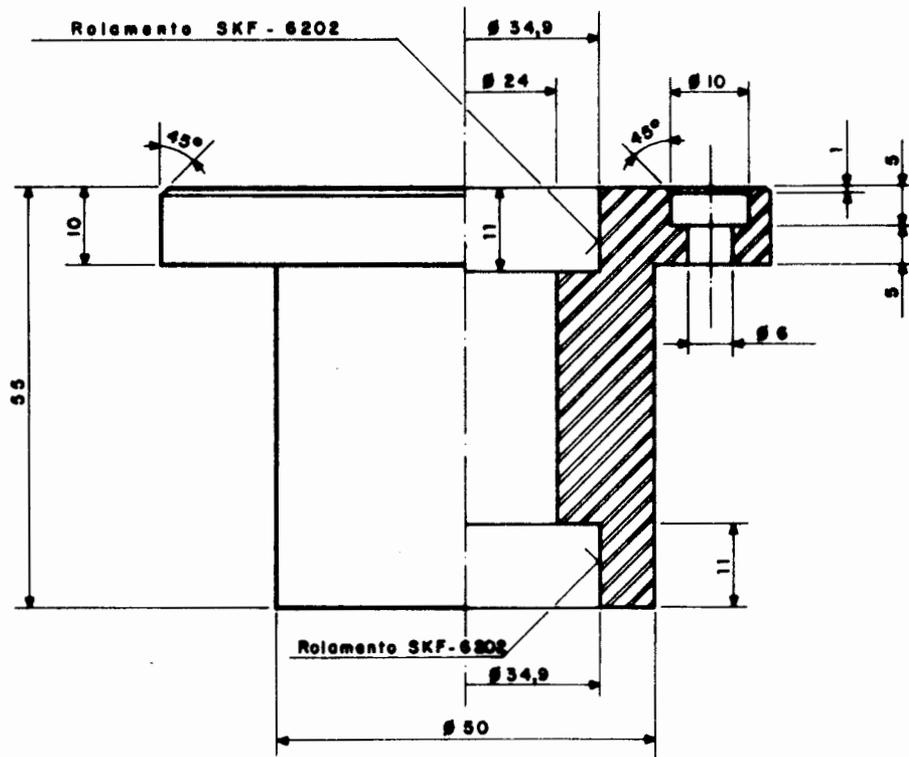
CAIXA DE ROLAMENTOS

PEÇA - 28

MATERIAL : AÇO INOXIDÁVEL

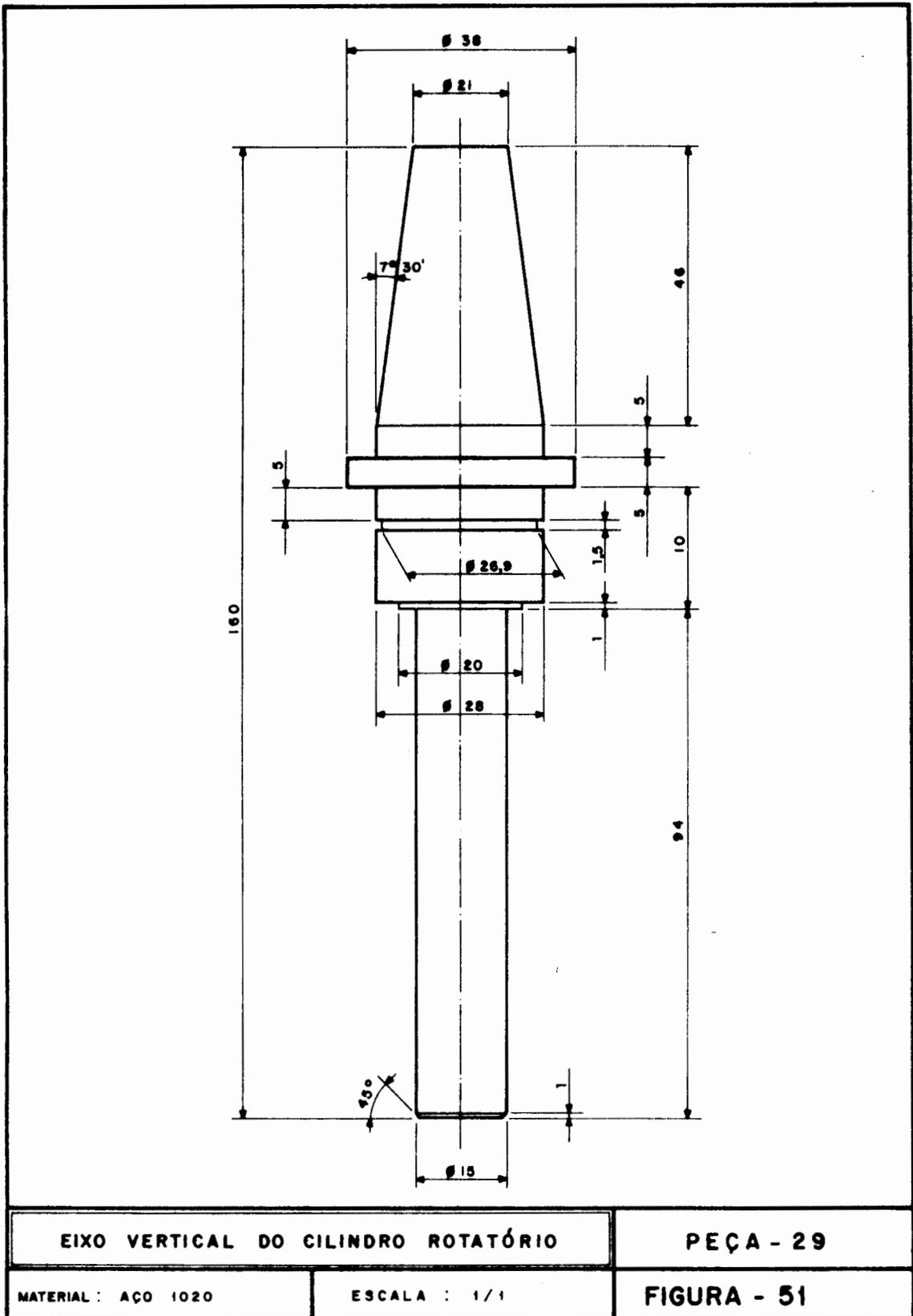
ESCALA : 1/1

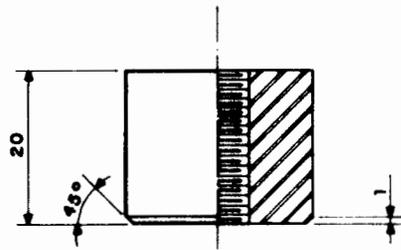
FIGURA - 49



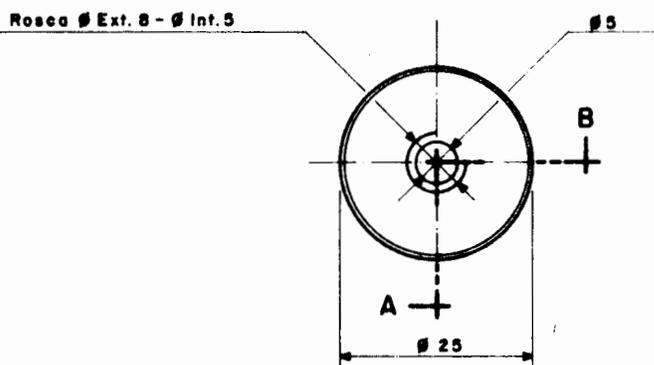
CORTE A - B

CAIXA DE ROLAMENTOS		PEÇA - 28
MATERIAL : AÇO INOXIDÁVEL	ESCALA : 1/1	FIGURA - 50

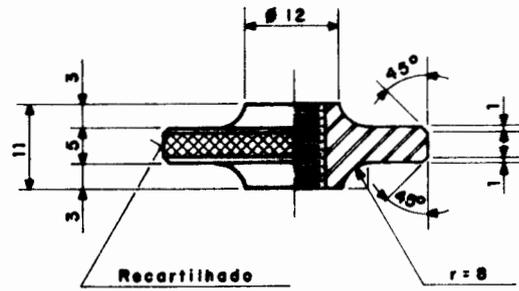




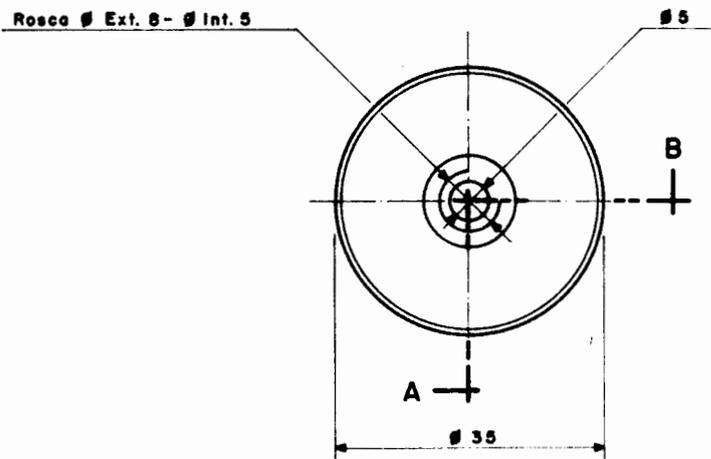
CORTE A - B



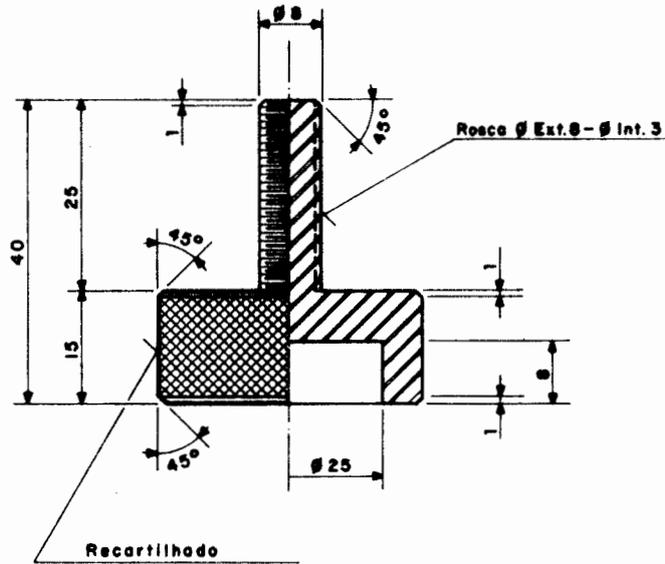
PARTE SUPERIOR DO PÉ		PEÇA - 30
MATERIAL: FERRO	ESCALA : 1/1	FIGURA - 52



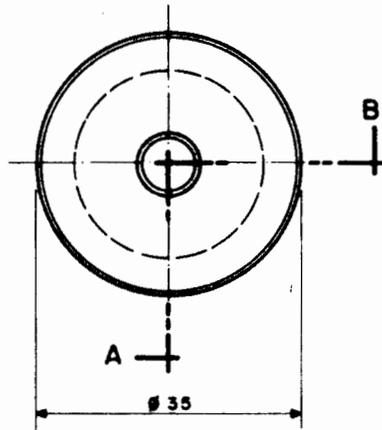
CORTE A - B



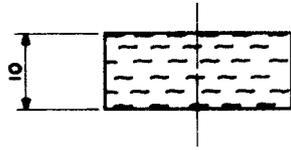
<p>PORCA DE FIXAÇÃO</p>		<p>PEÇA - 31</p>
<p>MATERIAL: ALUMINIO</p>	<p>ESCALA : 1/1</p>	<p>FIGURA - 53</p>



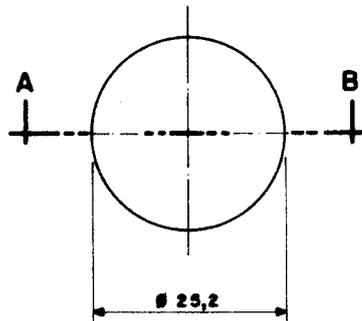
CORTE A - B



PARAFUSO NIVELANTE		PEÇA - 32
MATERIAL: ALUMINIO	ESCALA : 1/1	FIGURA - 54



CORTE A - B



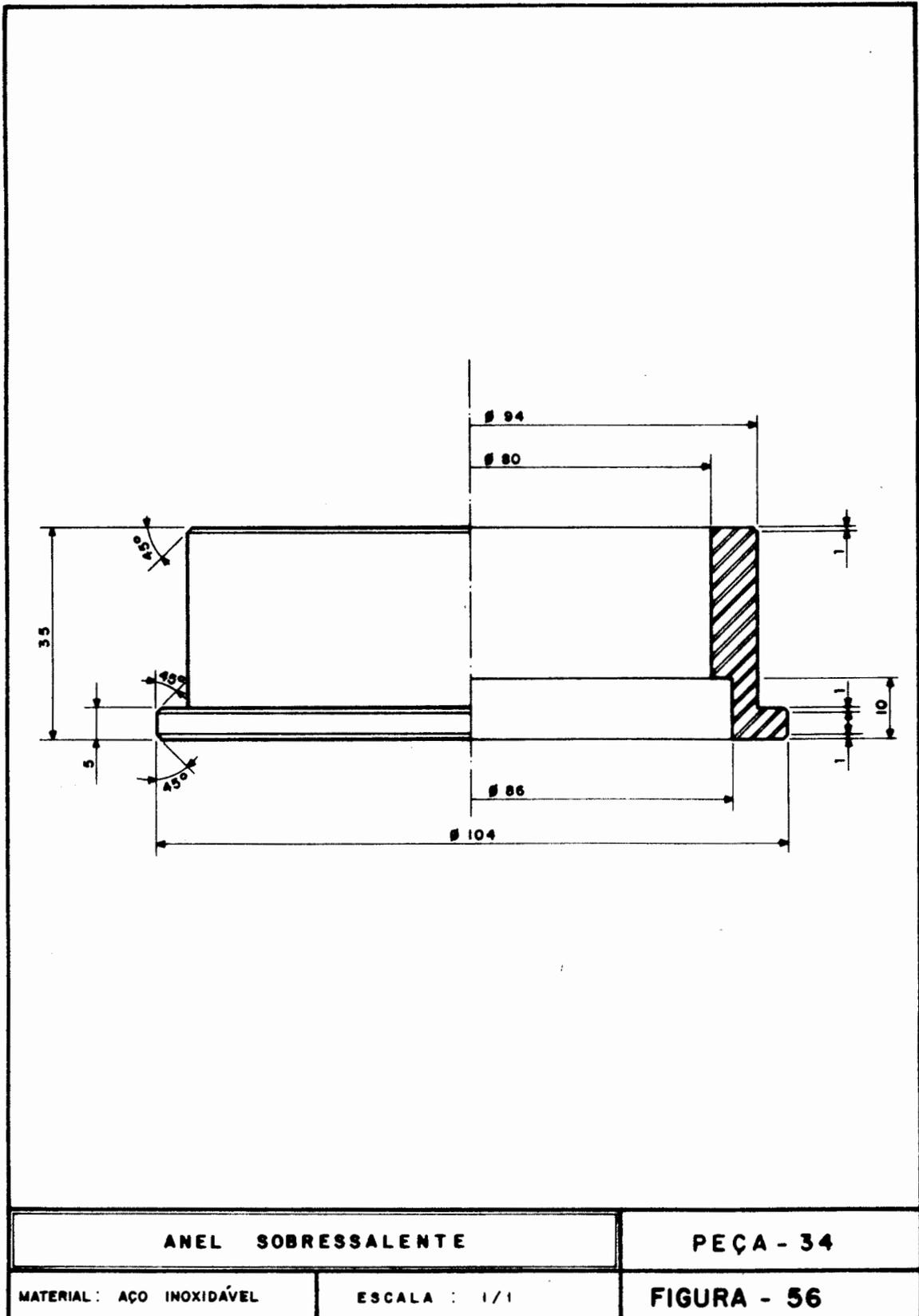
APOIO DE BORRACHA

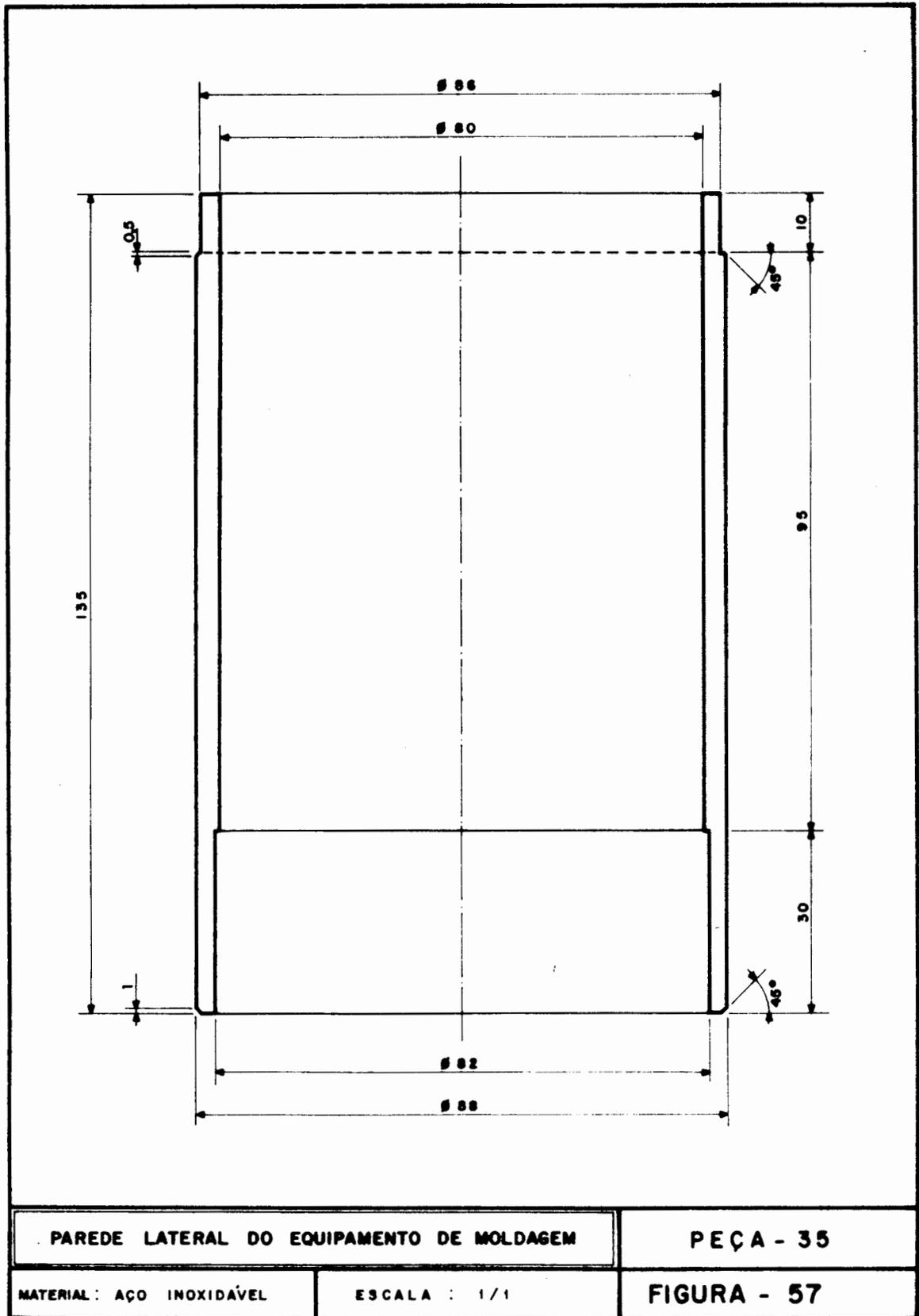
PEÇA - 33

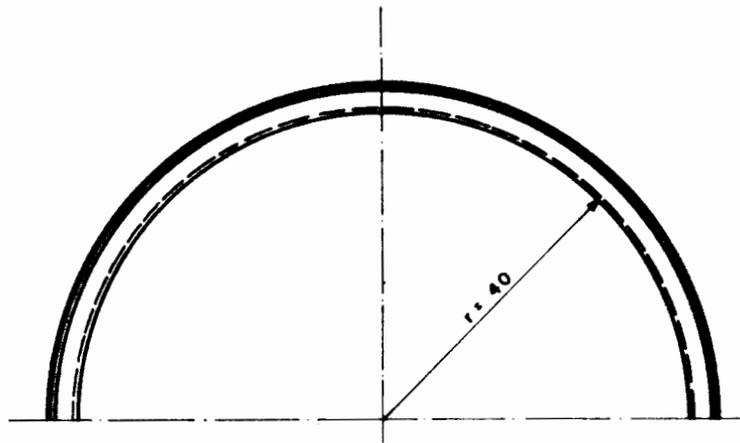
MATERIAL: BORRACHA

ESCALA : 1/1

FIGURA - 55







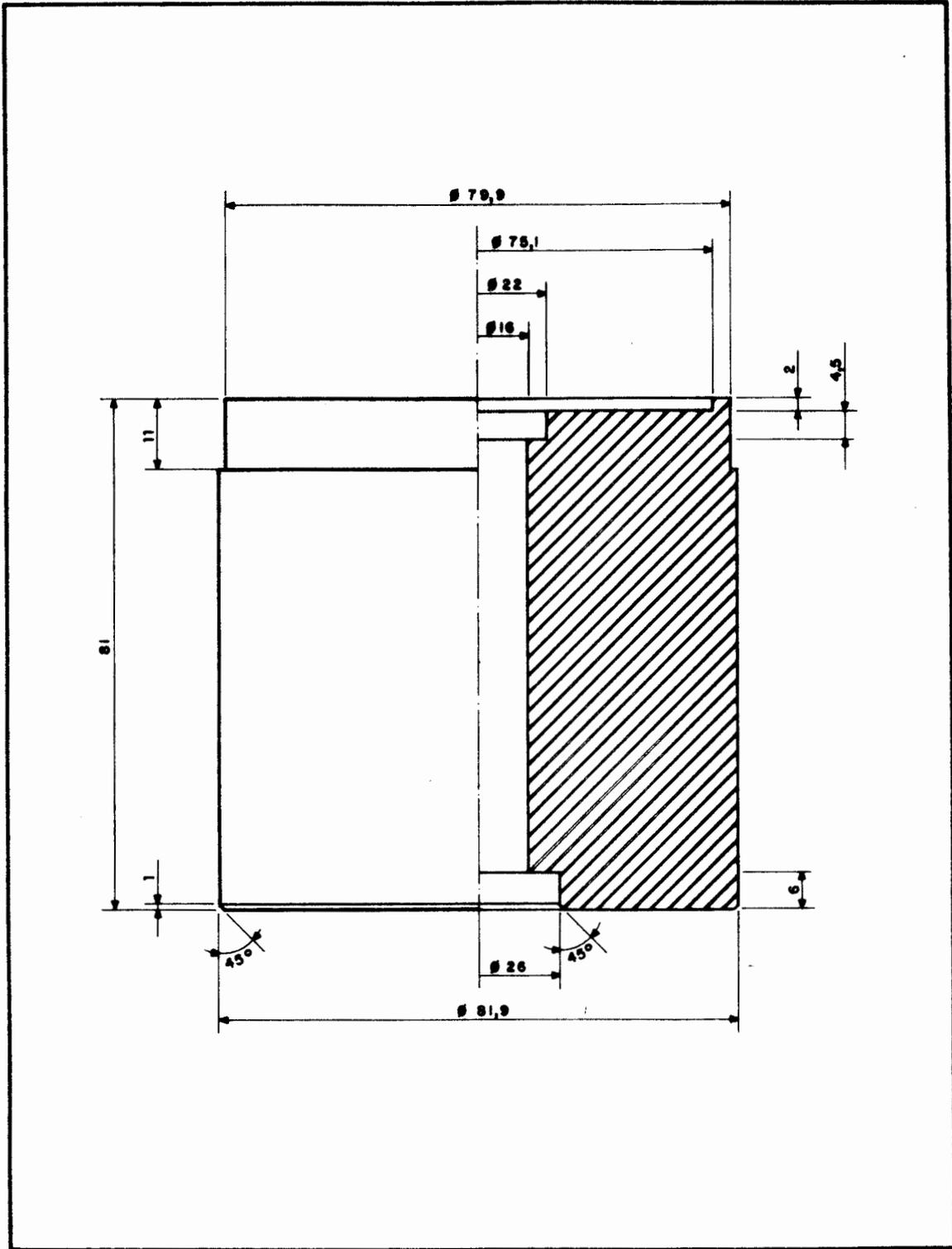
PAREDE LATERAL DO EQUIPAMENTO DE MOLDAGEM

PEÇA - 35

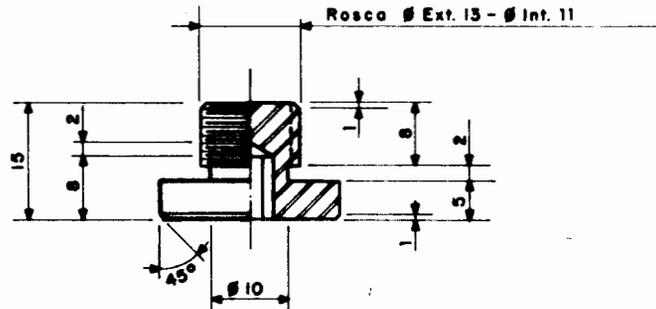
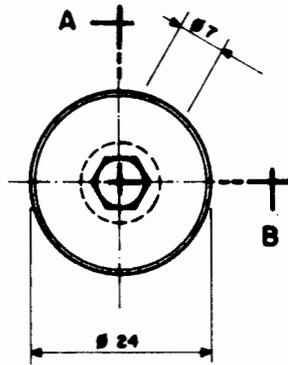
MATERIAL: AÇO INOXIDÁVEL

ESCALA : 1/1

FIGURA - 58



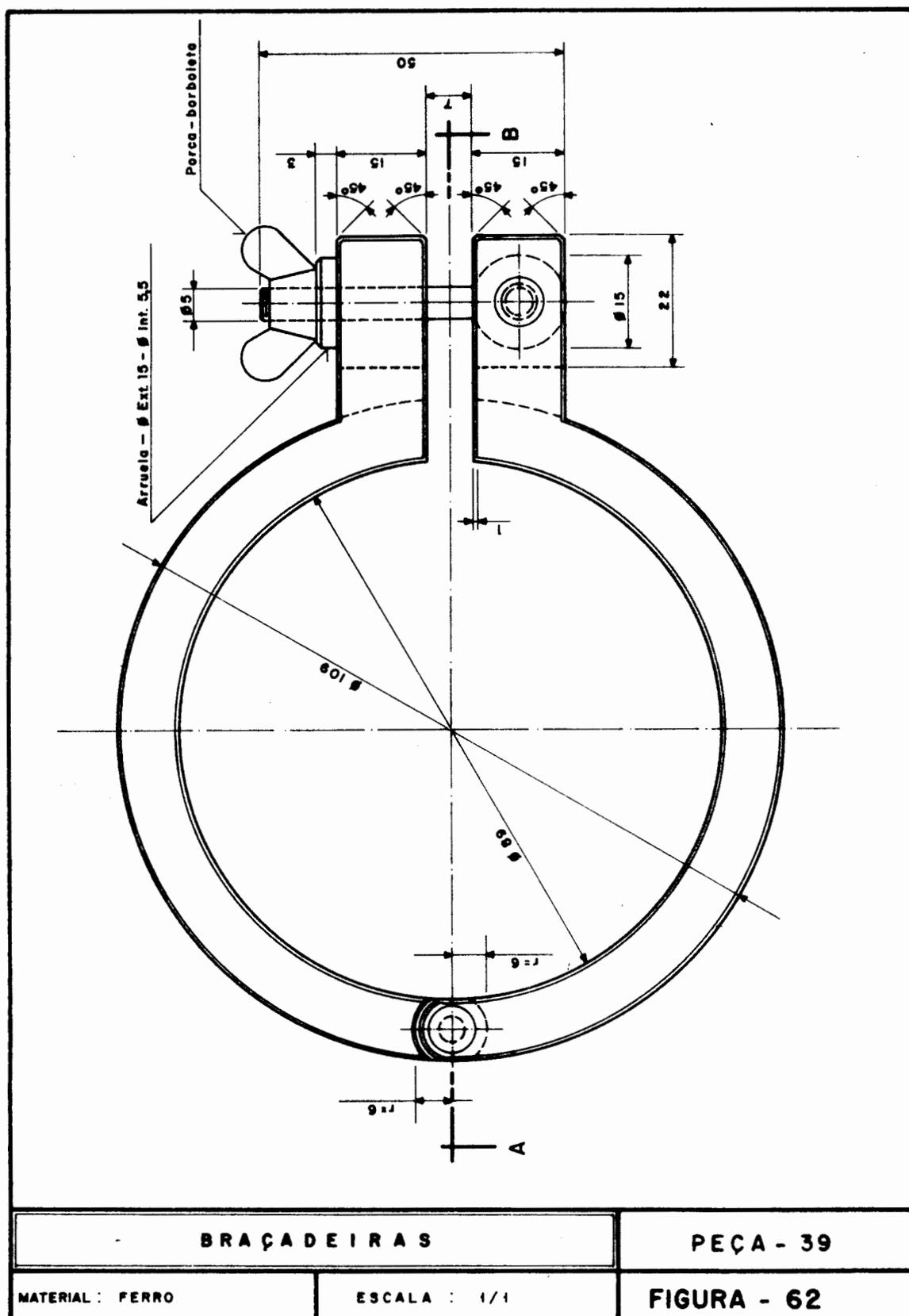
PARTE INFERIOR DO MOLDE		PEÇA - 36
MATERIAL: AÇO INOXIDÁVEL	ESCALA : 1/1	FIGURA - 59

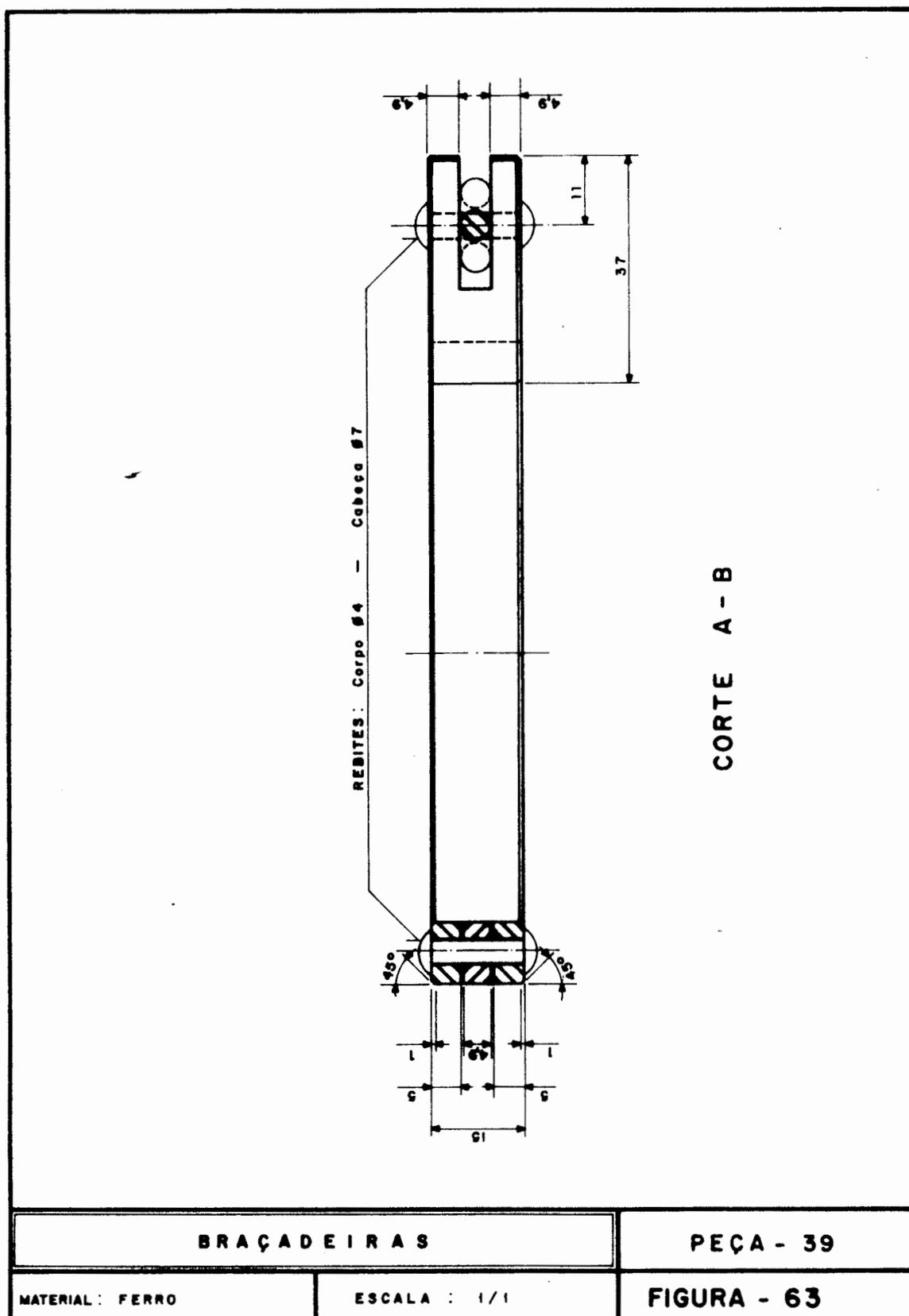


CORTE A - B

<p>PARAFUSO DE FIXAÇÃO</p>		<p>PEÇA - 37</p>
<p>MATERIAL : AÇO LIGA</p>	<p>ESCALA : 1/1</p>	<p>FIGURA - 60</p>







## 10. BIBLIOGRAFIA BÁSICA

1. AKKY, M. & SHEN, C.K. Erodibility of a cement-stabilized sandy soil. In: CONFERENCE-WORKSHOP ON EROSION: causes and mechanisms; prevention and control. Washington, D.C., Jan. 26, 1973. Proceedings. Washington, Highway Research Board, 1973. p.30-41. (Special Report, 135).
2. BERGAGHER, Dirk & LADD, Charles C. Erosion of cohesive soils. Massachusetts Institute of Technology, Department of Civil Engineering, 1964. 36p.
3. CASTRO, Gerson Rodrigues de & FIGUEIREDO, Alinor. Medida em laboratório de resistência à erosão de solos coesivos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA, 2, São Paulo, 1978. Anais. São Paulo, Associação Brasileira de Geologia de Engenharia, 1978. p.173-8.
4. CHOW, Wen Te. Open-channel hydraulics. Tokyo, McGraw-Hill Kogakusha, 1959. 680p.
5. LANE, Emory W. Design of stable channels. Transactions of the American Society of Civil Engineers, New York, 120:1234-60, 1955.
6. LENCASTRE, Armando. Manual de hidráulica geral. 2.ed. São Paulo, Edgard Blücher, 1972. 411p.
7. MASCH Jr., F.D.; ESPEY Jr., W.H.; MOORE, W.L. Measurements of the shear resistance of cohesive sediments. Agricultural Research Service, nº 970, 1965 apud AKKY, M.R. & SHEN, C.K. Erodibility of a cement-stabilized sandy soil. In: CONFERENCE-WORKSHOP ON SOIL EROSION: causes and mechanisms; prevention and control, Washington, D.C., Jan. 26, 1973. Proceedings. Washington, Highway Research Board, 1973. p.32. (Special Report, 135).

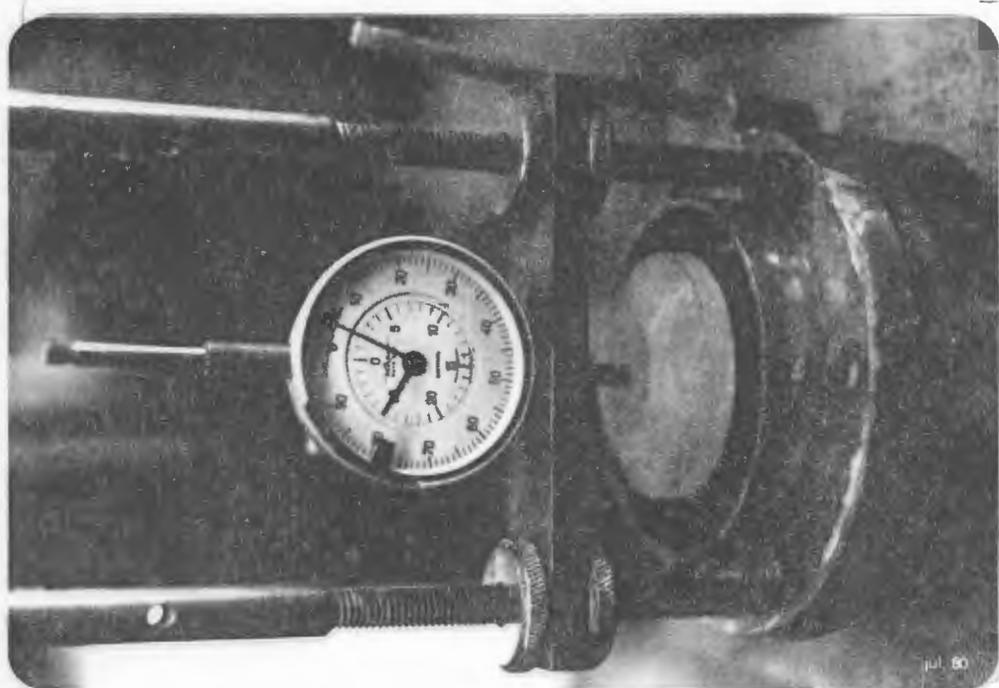
8. PECK, Ralph B. Liquefaction potential: science versus practice. Journal of the Geotechnical Engineering Division, New York, ASCE, 105(3): 393-8, Mar. 1979.
9. PINTO, Carlos Souza & YAMAMOTO, Tatuho. Influência da espessura das camadas na compactação de solos em laboratório. Rio de Janeiro, Instituto de Pesquisas Rodoviárias, 1966. 31p.
10. REKTORIK, Robert J. & SMERDON, Ernest T. Critical shearing forces in cohesive soils from a rotating apparatus. In: MEETING OF THE AMERICAN SOCIETY OF AGRICULTURAL ENGINEERS, Ft. Collins, Colo., June 21-24. 1964. 14p.
11. TAYLOR, G. I. Fluid friction between rotating cylinders. Proceedings of the Royal Society of London, Series A, 157:546-78. 1936.
12. D'Avila, A.L.M. Relatório de Revisão Bibliográfica, 1980
13. DUNN, I.S. Tractive Resistance of Cohesive Channels. Jour. Soil Mech. and found. div., Proc. ASCE, vol.85, No. SM3, Proc. Paper 2062, June 1959.
14. ENGER, P.F. Canal Erosion and Tractive Force Study - Analyses of data taken on boundary shear flume. Bureau of Reclamation, Denver, Hydraulic Branch Rept. Hyd-532, Feb. 1964.
15. FLAXMAN, E.M. Channel Stability in Undisturbed Cohesive Soils. Jour. Hydraulics Div., Proc. ASCE, Vol.89, No Hy2, Proc. Paper 3462, March 1963, pp. 87-96.
16. Grissinger, E.H. Resistance of Selected Clay Systems to Erosion by Water. Water Resources Research, Vol.2, No.1, 1966, pp. 131-138.

17. LAFLEN, J.M. & BEASLEY, R.P. Effects of Compaction on Critical Tractive Forces in Cohesive Soils. Agricultural Experiment Station, Univ. of Missouri, Res. Bull. 749, 1960.
18. MIRTSKHULAVA, Ts. E. Erosional Stability of Cohesive Soils. Jour. Hydraulic Research, No. 1, 1966.
19. MOORE, W.L. & MASCH, F.D., Jr. Experimentos on the Scour Resistance of Cohesive Sediments. Jour. Geophysical Research, Vol. 57, No. 4, April 1962, pp. 1437-1449.
20. PARTHENIADES, E. Erosion and Deposition of Cohesive Soils. Jour. Hydraulics Div., Proc. ASCE, Proc. Paper 4304, Jan. 1965, pp. 105-138.
21. PARTHENIADES, E. & PAASWELL, R.E. Erodibility of Channels With Cohesive Boundary. Jour. Hydraulics Div., Proc. ASCE, No. HY3, 1970, pp. 755-771.

A P Ê N D I C E S

**APÊNDICE I****ENSAIO DE EXPANSÃO COM PRESSÃO CONFINANTE APROXIMADAMENTE  
IGUAL A ZERO**

1. Molda-se a amostra estaticamente em anel de adensamento nos parâmetros de compactação desejados;
2. Coloca-se o anel sobre pedra porosa existente na célula de adensamento;
3. Coloca-se pedra porosa superior;
4. Coloca-se topo de acrílico;
5. Coloca-se defletômetro;
6. Montado o conjunto (fotografia 39), coloca-se água na célula sendo feitas leituras no defletômetro de hora em hora até a estabilização.
7. A expansão será dada pela relação em porcentagem entre a leitura estabilizada e a altura original do corpo-de-prova.



Fotografia 39  
Ensaio de Expansão com Pressão Confinante  
Aproximadamente Igual a Zero

## APÊNDICE II

## ANÁLISE GRANULOMÉTRICA SEM DEFLOCULANTE E SEM DISPERSÃO MECÂNICA

1. Toma-se cerca de 25g. de amostra seca num picnômetro.
2. Adiciona-se 125 cm<sup>3</sup> de água destilada.
3. Submete-se a bomba de vácuo por 10 min. com pressão negativa equivalente a uma coluna de mercúrio de 70 cm.
4. Transfere-se o conteúdo do picnômetro para proveta do ensaio de sedimentação e procede conforme o método MB-32 da ABNT.