

DESENVOLVIMENTO DE UM MODELO MATEMÁTICO
SIMPLES, PARA CÁLCULO DA SUSTENTAÇÃO,
PROVENIENTE DE UM COLCHÃO DE AR.

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS

FACULDADE DE ENGENHARIA DE CAMPINAS

Departamento de Materiais e Mecânica dos Sólidos

DESENVOLVIMENTO DE UM MODELO MATEMÁTICO
SIMPLES, PARA CÁLCULO DA SUSTENTAÇÃO,
PROVENIENTE DE UM COLCHÃO DE AR.

Orlando Govoni Filho

Trabalho apresentado para obtenção do tí
tulo de Mestre em Engenharia Mecânica ,
pela Comissão de Pós-Graduação da Faculda
de de Engenharia de Campinas - UNICAMP.

Este trabalho foi realizado na Fa-
culdade de Engenharia de Campinas
e no Centro de Tecnologia da Uni-
versidade Estadual de Campinas.

A minha esposa Regina

e

Ao amigo Rui Carlos Orlandi

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

Expresso minha gratidão ao Prof. Dr. Jerzy T. Sielawa, pela orientação do trabalho, pelo apoio e incentivo recebido.

Ao Prof. Dr. Dino Ferraresi,

Ao Prof. Dr. Kamal A. R. Ismail,

Ao Eng^o Rui Carlos Orlandi,

A todos os funcionários do Centro de Tecnologia,
em especial:

Ao Econ. Proj. Fleury Cardoso da Cunha,

Ao Econ. Nelson A. P. Camacho, e

Aos técnicos:

Sebastião Cuesta Pallegrin, José Carlos Bosco
Froldi e Aziel Martins da Costa;

Ao Desenhista Marco Antônio Padula,

Ao Fotógrafo Noedi Arnaldo Zangarini,

A minha esposa Regina Cezarino Govoni,

que contribuíram ativamente para a realização desta tese, os
meus sinceros agradecimentos.

Campinas, novembro de 1975.

R E S U M O

Desenvolve-se um modelo matemático simples, para cálculo da sustentação, proveniente de um colchão de ar, gerado por jatos periféricos.

A simplicidade é obtida considerando-se algumas hipóteses simplificadoras dos fenômenos envolvidos no escoamento. A eficácia dos resultados é verificada comparando - se os resultados deste trabalho com os apresentados por Strand em [5] e com valores experimentais extraídos de um banco de ensaios, especialmente projetado para atender esta finalidade.

A B S T R A C T

A simple mathematical model to determine a lift due to an air cushion generated by peripheral jets was developed.

The simplicity is obtained by means of certain simplifying assumptions concerning some flow phenomena. The validity of results is checked by comparing them with the results presented by Strand in [5] and with the experimental data. These were obtained in specially constructed experimental apparatus.

Í N D I C E

1 - INTRODUÇÃO	01
1.1 - RETROSPECÇÃO	01
1.2 - APLICAÇÃO DO COLCHÃO DE AR NO TRANSPORTE IN DUSTRIAL	03
1.3 - SUSTENTAÇÃO AEROSTÁTICA COM JATOS PERIFÉRI- COS (Revisão Bibliográfica)	07
1.4 - OBJETIVO DO TRABALHO	09
2 - CONCEPÇÃO FÍSICA DO MODELO	10
2.1 - GEOMETRIA DO MODELO	10
2.2 - ALGUMAS CONSIDERAÇÕES SOBRE O MODELO	11
3 - ANÁLISE MATEMÁTICA DO MODELO	12
3.1 - DETERMINAÇÃO DA PRESSÃO ATUANTE NO COLCHÃO DE AR	12
3.1.1 - HIPÓTESES SIMPLIFICADORAS	12
3.2 - CÁLCULO DA FORÇA DE SUSTENTAÇÃO ATUANTE NA SUPERFÍCIE DE APOIO	16
3.2.1 - CÁLCULO DA SUSTENTAÇÃO PROVENIENTE DO COLCHÃO	16
3.2.2 - CÁLCULO DA REAÇÃO VERTICAL DO JATO.	17
3.2.3 - EXPRESSÃO FINAL PARA CÁLCULO DA SUSTENTAÇÃO	22

3.3 - DETERMINAÇÃO DA VAZÃO NECESSÁRIA AO <u>SIS</u>	
TEMA	23
3.4 - CÁLCULO DA POTÊNCIA DO BOCAL	25
3.5 - SUMÁRIO DA ANÁLISE MATEMÁTICA	26
4 - ANÁLISE DOS RESULTADOS	30
4.1 - VERIFICAÇÃO DA COERÊNCIA DOS RESULTADOS.	30
4.2 - VERIFICAÇÃO DA ACURACIDADE DOS <u>RESULTA</u>	
DOS	31
4.2.1 - TÉCNICA DE MEDIDA EMPREGADA ...	35
4.2.2 - APRESENTAÇÃO DO BANCO DE ENSAIOS	36
4.2.3 - DESCRIÇÃO FUNCIONAL DO <u>EQUIPA</u>	
MENTO	52
4.2.4 - AFERIÇÃO	53
4.2.4.1 - VERIFICAÇÃO DA <u>LINEA</u>	
RIDADE DA RELAÇÃO: <u>AL</u>	
TURA DO COLCHÃO/ <u>DESLO</u>	
CAMENTO DA PENA DO <u>RE</u>	
GISTRADOR NA DIREÇÃO X	54
4.2.4.2 - AFERIÇÃO DO ANEL <u>DINA</u>	
MOMÉTRICO	54
4.2.5 - CURVAS EXPERIMENTAIS E CURVAS DA	
SIMULAÇÃO DO MODELO	60
5 - CONCLUSÃO	70
- REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA	72

1 - INTRODUÇÃO

1.1 - RETROSPECÇÃO

Recorrendo aos meios de sustentação oferecidos pela natureza, isto é, terra, água e ar, o homem, desde a sua origem, vem desenvolvendo e aprimorando os meios de transporte que lhe assiste, de maneira a adequá-los racionalmente às suas reais necessidades. Deparando-se com as diferentes propriedades físicas desses meios, desenvolveu equipamentos atinentes às propriedades específicas de cada um, nascendo destas ponderações, os veículos aquáticos, aéreos e terrestres.

É fato sabido que, a principal limitação dos veículos aquáticos está na sua incapacidade de adentrar às margens do seu meio de sustentação. Já os veículos aéreos não são capazes de elevar grandes cargas, transportadas com facilidade pelos navios. E os veículos terrestres, não movimentam-se por terrenos acidentados, pantanosos ou, onde não existem estradas.

Destas considerações, nasceu no início da década de 50, a idéia arrojada de desenvolver um veículo que se movesse independentemente da superfície de sustentação.

Na verdade, um veículo com tais características, já fora experimentado em 1935, pelo finlandês Toivo J. Kaario. Seu trabalho, interrompido pela Segunda Guerra Mundial, foi retomado pelo suíço Carl Weiland. Este construiu uma embarcação que se erguia a 20 centímetro da superfície da água e que alcançava, ainda que com dificuldade, uma velocidade de 120 quilômetros horários.

Mas, o verdadeiro criador dos veículos que utilizam o colchão de ar, como meio de sustentação, foi o engenheiro inglês Christópher Sidney Cockerell que entre 1954 e 1959, realizou vários trabalhos experimentais que outorgaram-lhe o título de "Pai das Máquinas de Efeitos sobre o Chão", também reconhecidas mundialmente por "HOVERCRAFT" ou simplesmente "GEM (Ground Effect Machinery)".

Devido a atual importância dos "GEMs" nos meios produtivos modernos, vários países, tais como: a Inglaterra, França, Itália, União Soviética e Estados Unidos, vêm dispensando grandes investimentos em estudos e aprimoramento desses veículos. A França e a Itália, desenvolvem o "Naviplane" com capacidade de 200 toneladas, operável a 150 Km/h. A Inglaterra, aperfeiçoa um Hovercraft para 400 toneladas de capacidade de carga, que se locomoverá a 4 metros de altura da superfície de sustentação, a uma velocidade de 150 Km/h. A Rússia, restringiu suas pesquisas, à utilização do colchão de ar, como meio de sustentação de cargas pesadas, em seu sistema de transporte interno. Enquanto nos Estados Unidos, encontra-se em projeto um veículo exclusivamente marítimo, denominado "Surface Effect Ship" que, deslocará 5000 toneladas (o máximo atingido até hoje) a uma velocidade de aproximadamente 170 Km/h.

Apesar desses veículos apresentarem os mesmos objetivos comuns, isto é, terem seus pesos ou frações deles, sustentados por um colchão de ar, diferenciam-se de acordo com suas aplicabilidades e tipo de sustentação que utilizam. Assim, os veículos que transportam grandes cargas, ou atuam sobre diferentes tipos de superfícies, empregam uma sustentação que independe de sua velocidade operacional, por isto, denominada de "Sustentação Aerostática". Nesta, o acréscimo de pressão é gerado e mantido pela ação de um compressor, que succionando

o ar do meio externo ao veículo, o impele sob pressão, para o interior do colchão. Já, os veículos que operam exclusivamente nos meios aquáticos, utilizam muitas vezes, além desta sustentação, um outro tipo, denominada "Sustentação Aerodinâmica", na qual, o acréscimo de pressão do colchão de ar, deve-se à velocidade relativa, existente entre o veículo e a superfície de apoio. É uma sustentação destinada a veículos leves, que elevando-o total ou parcialmente sobre superfície de apoio, permite que se diminua consideravelmente a resistência ao movimento, apresentada pela água.

A figura 1.1, apresenta de maneira compacta e ilustrativa, as principais variâncias de projeto, que envolvem essas duas sustentações. Convém salientar que, alguns nomes permaneceram em inglês, devido a falta, em nossa literatura técnica, de termos que os substituam adequadamente.

1.2 - APLICAÇÃO DO COLCHÃO DE AR NO TRANSPORTE INDUSTRIAL

Sendo o transporte industrial um dos responsáveis pela produtividade das empresas, é sem sombra de dúvida o elemento propulsor do seu desenvolvimento econômico; o que tem exigido dos projetistas de sistemas e equipamentos de transporte, imaginação e constante desenvolvimento de novos projetos.

Entre as novas proposições, tem-se observado a crescente utilização do colchão de ar como meio de sustentação, principalmente no manuseio de unidades pesadas, onde se tem mostrado econômico e funcional.

Devido às características funcionais do transporte industrial, como: baixa velocidade operacional e intermitência de funcionamento, a sustentação aerostática é

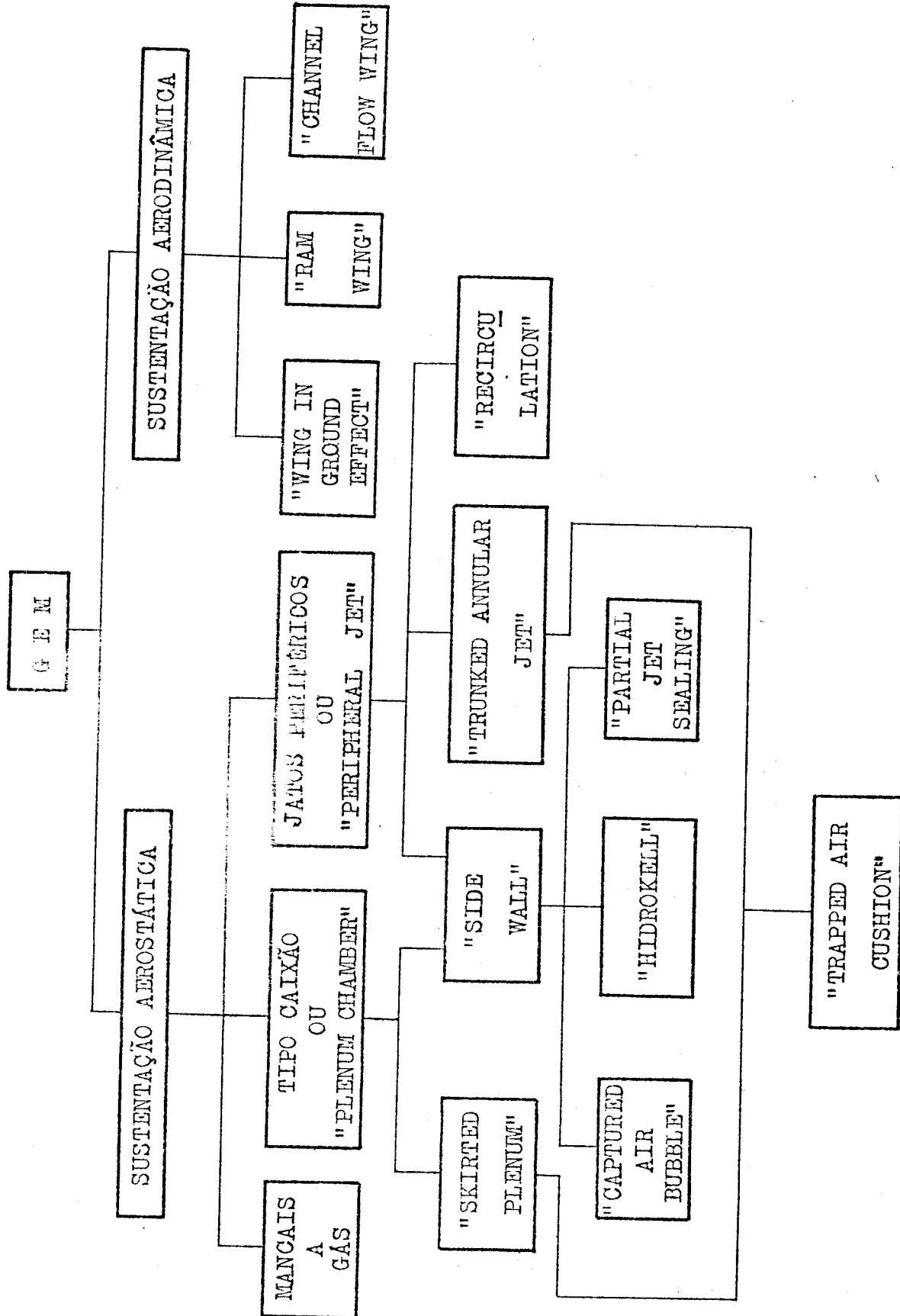


Fig. 1.1 - VARIÂNCIAS DE PROJETOS DAS SUSTENTAÇÕES AEROSTÁTICAS E AERODINÂMICAS.

De conformidade com a figura 1.1 , pode-se notar que, esta sustentação tanto pode ser obtida por jatos periféricos, como por sistemas "plenum chamber".

Sustentação plenum chamber ou tipo caixão

Como o próprio nome está afirmando, assemelha-se a um caixão, que desprovido de uma das faces e voltado para a superfície de apoio, confina uma região de alta pressão, gerada e mantida pela ação de um compressor (figura 1.2).

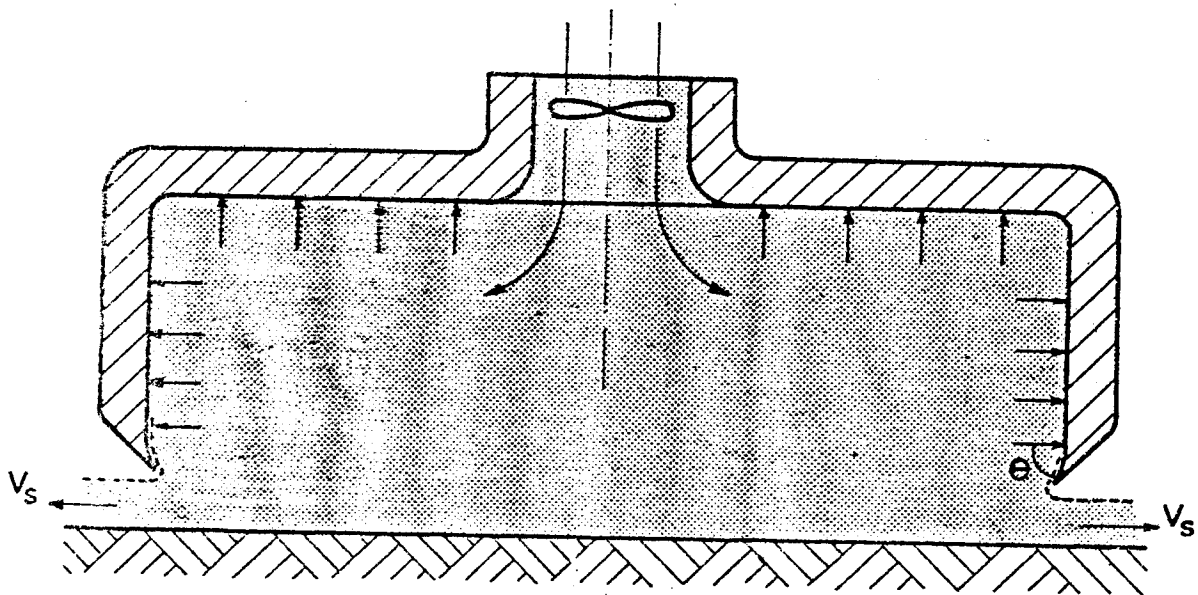


Figura 1.2 - SUSTENTAÇÃO AEROSTÁTICA "PLENUM CHAMBER"
OU TIPO CAIXÃO

Sustentação com jatos periféricos

Tem sua região de alta pressão gerada e mantida pela ação de jatos periféricos envolventes à área de sustentação, os quais, além de fornecerem energia ao colchão, impedem seu afluxo para o meio exterior, (figura 1.3).

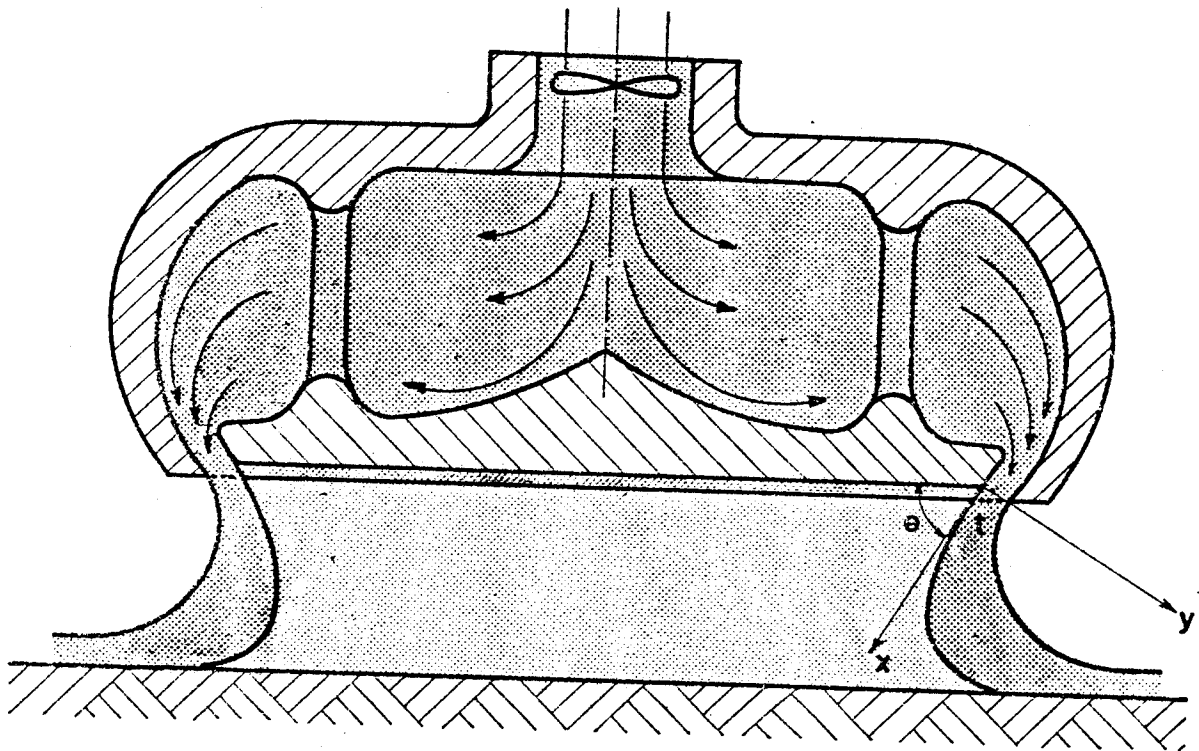


Figura 1.3 - SUSTENTAÇÃO AEROSTÁTICA COM JATOS PERIFÉRICOS

Embora a sustentação "plenum chamber" tenha sido a primeira a ser utilizada nos veículos que empregam o colchão de ar como meio de sustentação, constata-se nas referências [8], [9] e [10], que a sustentação com jatos periféricos, em igualdade de condições operacionais, tem-se mostrado funcionalmente mais eficiente. Fato que tem induzido sua utilização na maioria dos projetos modernos, relegando à "plenum chamber", somente algumas aplicações.

Em função dessas conclusões e do propósito de se desenvolver um trabalho voltado às aplicações gerais do colchão de ar, decidiu-se por estudar a sustentação com jatos periféricos.

1.3 - SUSTENTAÇÃO AEROSTÁTICA COM JATOS PERIFÉRICOS (Revisão Bibliográfica)

A primeira teoria sobre sustentação com jatos periféricos, foi desenvolvida, independentemente, por Boehler e Chaplin, nas referências [1] e [2] ; admitindo-se que a sustentação pudesse ser calculada com suficiente acuracidade, desprezando a espessura do jato.

Testes subsequentes vieram mostrar a improcedência desta hipótese, uma vez que, os valores predeterminados na região de validade da teoria, corresponderam a menos de 80 por cento dos valores reais, levantados experimentalmente.

Uma teoria mais elaborada, que considera a espessura do jato no cálculo da sustentação e mostra corretamente que a pressão do colchão não pode exceder à do bocal, foi desenvolvida subsequentemente por Pinnes e Rethorst, em [3], e [4] .

De conformidade com os autores, a teoria é válida para valores da relação espessura do jato (t) e altura do colchão (h), menores ou igual à unidade. Demonstrou-se posteriormente, na referência [5] , que esta teoria só é válida para valores de t/h , menores ou igual a 0.3, mesmo assim, um valor aceitável, uma vez que, pertence à faixa de aplicabilidade da maioria dos "GEMs".

Strand apresenta em [5], uma teoria que diz ser "exata" para cálculo da sustentação com jatos periféricos bi-dimensionais, inviscido e incompressível, aplicável à todos os valores da relação " t/h " (espessura do jato/ altura do colchão), contradizendo as duas teorias anteriormente apresentadas.

Considerando o escoamento fisicamente representado na figura (1.3), restringiu seu trabalho na determinação do "potencial de velocidade" atuante no interior do jato, em função da altura do colchão e da sua espessura.

Especificamente, interessou-se pela determinação do "perfil de velocidade" na saída do bocal e da velocidade atuante no limite entre o jato e o colchão, uma vez que, o cálculo da sustentação esta diretamente relacionada com esses elementos. Tratou o problema, como sendo, de escoamento potencial, recorrendo às transformações conformes para obter a solução.

Uma outra teoria "exata" é apresentada por Cohen em [6]. Apoiando-se em considerações puramente teóricas, estudou a performance de uma sustentação com jatos periféricos bi-dimensionais, inviscido e incompressível, objetivando obter algumas relações paramétricas, de importância para projetos. Assim, examinou detalhadamente a dependência existente entre a sustentação e três parâmetros básicos, a saber: altura do colchão, espessura do jato e ângulo de inclinação da saída do bocal.

Embora a teoria de Cohen [6], assemelha-se com a desenvolvida por Strand [5], diferenciam-se em seus objetivos, pois, enquanto uma se preocupa especificamente com o jato, a outra examina a performance da sustentação, em função de parâmetros geométricos relacionados com o sistema.

Do levantamento bibliográfico realizado, estas duas últimas teorias são

sobre o assunto, e também as de aplicabilidade mais complexa, restringindo em muito, suas utilizações práticas.

1.4 - OBJETIVO DO TRABALHO

Conhecidas as dificuldades de aplicações práticas dos equacionamentos matemáticos apresentados pelas teorias "exatas" comentadas anteriormente, referências [5] e [6], verificou-se a necessidade de se "desenvolver um modelo físico que permitisse a obtenção de um equacionamento matemático simples, para o cálculo da sustentação, proveniente de um colchão de ar". Objetivou-se com isto, fornecer aos projetistas desses sistemas, uma sistemática de cálculo simples, para rápidas verificações de projetos.

A principal dificuldade encontrada na concepção física do modelo, recaiu na adoção das hipóteses simplificadas, uma vez que, mesmo não representando os fenômenos reais envolvidos no escoamento, deveriam possibilitar a obtenção de resultados numéricos, aceitáveis a projetos desta natureza. Tornou-se conveniente salientar que, o cálculo da sustentação não se prende exclusivamente à determinação da força proveniente da ação do colchão de ar, envolve também, a determinação de outras grandezas físicas com ela relacionada, tais como:- pressão do colchão, reação do jato, vazão e potência do bocal.

Definindo o modelo e obtido o equacionamento matemático desejado, a solicitação seguinte recaiu na comprovação da coerência e acuracidade dos resultados. Para esta verificação, utilizou-se dos resultados apresentados por Strand [5] e Cohen [6], em suas teorias "exatas", bem como, de valores experimentais extraídos de um banco de ensaios, especialmente projetado para atender esta finalidade.

2 - CONCEPÇÃO FÍSICA DO MODELO

2.1 - GEOMETRIA DO MODELO

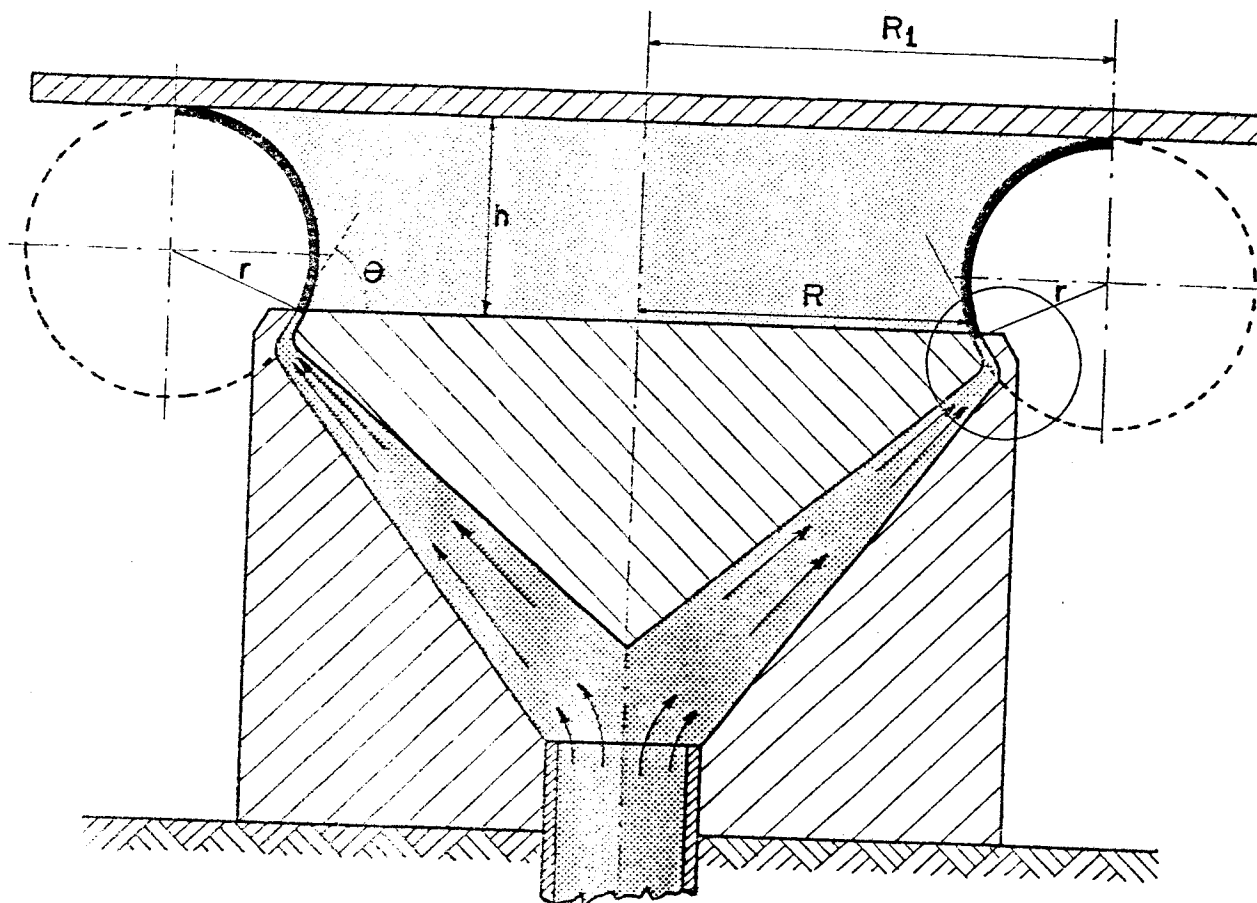


Figura 2.1.a - ASPECTO GLOBAL DO SISTEMA

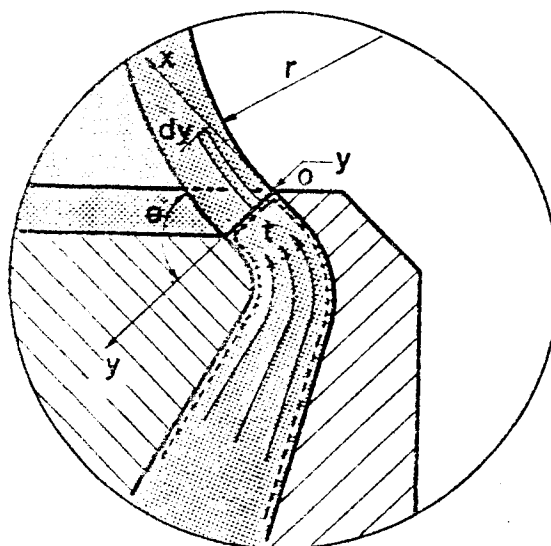


Figura 2.1.b
SAÍDA DO JATO

2.2 - ALGUMAS CONSIDERAÇÕES SÔBRE O MODELO

Observando-se o modelo físico utilizado no desenvolvimento das teorias apresentadas pelas referências [5] e [6] (figura 1.3) e o adotado neste trabalho (figura 2.1), verifica-se uma diferença funcional entre eles. Assim sendo, enquanto no modelo empregado pelas teorias, tem-se um veículo, sustentado por um colchão de ar, ao qual está incorporado a unidade geradora do colchão, observa-se, no modelo deste trabalho, que o elemento de transporte sustentado pelo colchão, move-se sôbre a unidade geradora (bocal), que permanece estacionária, fixa a um elemento estrutural. Um exemplo de aplicação deste modelo, constitui a utilização do colchão de ar, como meio de sustentação de uma correia transportadora.

Para conseguir os resultados desejados, desenvolveu-se o cálculo da sustentação, apoiando-se em duas análises distintas do modelo (figura 2.1). A primeira, utilizada para o cálculo da pressão do colchão, reação do jato, vazão e potência do bocal, prendeu-se exclusivamente à saída do jato, figura 2.1.b, levando em consideração todos os parâmetros físicos e geométricos com êle relacionado. A segunda, empregada no cálculo da força de sustentação proveniente da ação do colchão, focalizou o sistema no seu aspecto global, figura 2.1.a, considerando desprezível a espessura do jato.

3 - ANÁLISE MATEMÁTICA DO MODELO

3.1 - DETERMINAÇÃO DA PRESSÃO ATUANTE NO COLCHÃO DE AR

3.1.1 - HIPÓTESES SIMPLIFICADORAS

1ª - "O colchão é formado por uma massa de ar estática e homogênea, com pressão constante em todos os seus pontos".

2ª - "O jato periférico envolvente ao colchão de ar, atua no sistema de maneira semelhante a um Toróide". De conformidade com a figura 2.1.a, pode-se observar que o raio R_1 e a geratriz r desse toróide, são definidos por:

R_1 = Raio da área de sustentação

$$r = \frac{h}{1 + \cos \theta}, \dots\dots\dots (3.1)$$

sendo " θ " o ângulo de inclinação do jato na saída do bocal.

3ª - "A variação da pressão transversal ao jato, próximo à saída do bocal, é equilibrada pela ação da força centrífuga".

De acordo com esta hipótese, a equação de equilíbrio para um pequeno elemento de jato, situado a uma distância y da linha de corrente externa do jato (figura 2.1.b), é dada por:

$$(p + dp) ds - p ds = \left(\int dy ds \right) \frac{v_j^2}{r + y} \dots\dots\dots (3.2)$$

que simplificada, resulta em:

$$dp = \frac{\int v_j^2}{r + y} dy \dots\dots\dots (3.3)$$

4ª - "Admitir a pressão interna ao bocal constante e o escoamento inviscido e incompressível".

Logo, aplicando o teorema de Bernoulli entre o bocal e a saída do jato, tem-se:

$$\int v_j^2 = 2 (H - p) \dots\dots\dots (3.4)$$

Associação-se as equações (3.3) e (3.4) obtém-se:

$$\frac{dp}{(H - p)} = \frac{2 dy}{r + y} \dots\dots\dots (3.5)$$

5ª - "Considerar a geratriz r muito maior que y , de modo que se possa desprezar a influência deste último, na equação (3.5)".

Desta consideração e com a substituição da equação (3.1) em (3.5), segue que:

$$\frac{dp}{(H - p)} = \frac{2 (1 + \cos \theta)}{h} dy \dots\dots\dots (3.6)$$

Integrando-se a equação (3.6) entre o ponto $y = 0$ com pressão p_0 e um ponto genérico y , com pressão p , obtem-se a distribuição de pressão atuante na saída do bocal. Assim sendo, tem-se:

$$\int_{p_0}^p \frac{dp}{(H - p)} = \int_0^y \frac{2 (1 + \cos \theta)}{h} dy \dots (3.7)$$

Desenvolvendo estas integrais separadamente ,
tem:

$$\begin{aligned} \text{a)} \quad \int_{p_0}^p \frac{dp}{(H - p)} &= \ln (H - p_0) - \ln (H - p) = \ln \left(\frac{H - p_0}{H - p} \right) = \\ &= \ln \frac{(H - p_0)}{(H - p_0) - (p - p_0)} = \ln \frac{H^*}{H^* - p^*} \dots (3.8) \end{aligned}$$

OBS: os termos H^* e p^* , representam pressões relativas ,
ao passo que, H e p , pressões absolutas.

$$\text{b)} \quad \int_0^y \frac{2 (1 + \cos \theta)}{h} dy = \frac{2y (1 + \cos \theta)}{h} \dots (3.9)$$

Substituindo-se (3.8) e (3.9) em (3.7),obtem-se:

$$\ln \frac{H^*}{H^* - p^*} = \frac{2 y (1 + \cos \theta)}{h} \dots\dots\dots (3.10)$$

Esta equação na forma exponencial, pode ser ex
pressa por:

$$\frac{H^*}{H^* - p^*} = \exp \left[\frac{-2y (1 + \cos \theta)}{h} \right] \dots\dots\dots (3.11)$$

ou ainda,

$$p^* = H^* \left\{ 1 - \exp \left[\frac{-2y (1 + \cos \theta)}{h} \right] \right\} \dots\dots\dots (3.12)$$

Fazendo-se $y = t$ e substituindo-o na equa
ção (3.12), obtém-se a expressão final para a pressão do col
mão:

$$p_c^* = H^* \left\{ 1 - \exp \left[\frac{-2t (1 + \cos \theta)}{h} \right] \right\} \dots\dots\dots (3.13)$$

$$\text{ou, definindo-se } k = \frac{t (1 + \cos \theta)}{h} \dots\dots\dots (3.14)$$

e substituindo-o em (3.13),

$$p_c^* = H^* \cdot (1 - e^{-2k}) \dots\dots\dots (3.15)$$

3.2 - CÁLCULO DA FORÇA DE SUSTENTAÇÃO ATUANTE NA SUPERFÍCIE DE APOIO. (elemento de transporte)

A sustentação resultante da ação de um colchão de ar gerado por jatos periféricos, provém das forças de pressão do colchão e da reação vertical do jato. Expressando-se a sustentação em função desses elementos, tem-se:

$$F = p_c^* \cdot S + J \cdot \sin \theta \dots\dots\dots (3.16)$$

na qual:

$$p_c^* \cdot S \quad \text{sustentação proveniente do colchão} \dots(3.17)$$

$$J \cdot \sin \theta \quad \text{reação vertical do jato,} \dots\dots\dots (3.18)$$

3.2.1 - CÁLCULO DA SUSTENTAÇÃO PROVENIENTE DO COLCHÃO

De acordo com a equação (3.17) a sustentação devido ao colchão de ar, que para efeito de identificação será denominada de F_1 , é dada por:

$$F_1 = p_c^* \cdot S \dots\dots\dots (3.19)$$

aonde, p_c^* é a pressão do colchão e S a área de sustentação.

assim sendo, de conformidade com a equação (3.15), tem-se que:

$$p_c^* = H^* \cdot (1 - e^{-2k})$$

e da observação da figura 2.1.a, conclui-se que:

$$S = \pi R_1^2 = \pi (R + r \sin \theta)^2$$

Logo, substituindo-se êsses valores na equação (3.19), obtem-se a sustentação devido ao colchão em sua forma final, dada por:

$$F_1 = \pi (R + r \sin \theta)^2 \cdot H^* (1 - e^{-2k})$$

cu-

$$F_1 = \pi R_1^2 H^* (1 - e^{-2k}) \dots\dots\dots (3.20)$$

3.2.2 - CÁLCULO DA REAÇÃO VERTICAL DO JATO

Aplicando-se a equação da quantidade de movimento ao volume de controle representado na figura 2.1.b, tem-se que:

$$J = \oint_{vc} \vec{V} (\vec{V} \cdot d\vec{A}), \dots\dots\dots (3.21)$$

sendo J a reação total do jato.

Considerando, a velocidade do escoamento no interior do bocal desprezível em relação ao seu valor na saída do jato e o escoamento em regime permanente, a equação 3.21 transforma-se em :

$$J = \iint_A \rho V^2 dA \dots\dots\dots(3.21a)$$

Constata-se por observação da figura 3.1, que a área da saída do bocal, corresponde a área lateral do tronco de cône formado pelos seguintes parâmetros geométricos:

- base menor = R (raio interno do bocal)
 - geratriz = t (espessura do jato, na saída do bocal)
 - base maior = $R_o = R + t \sin \theta$ (raio externo do bocal)
- ... (3.22)

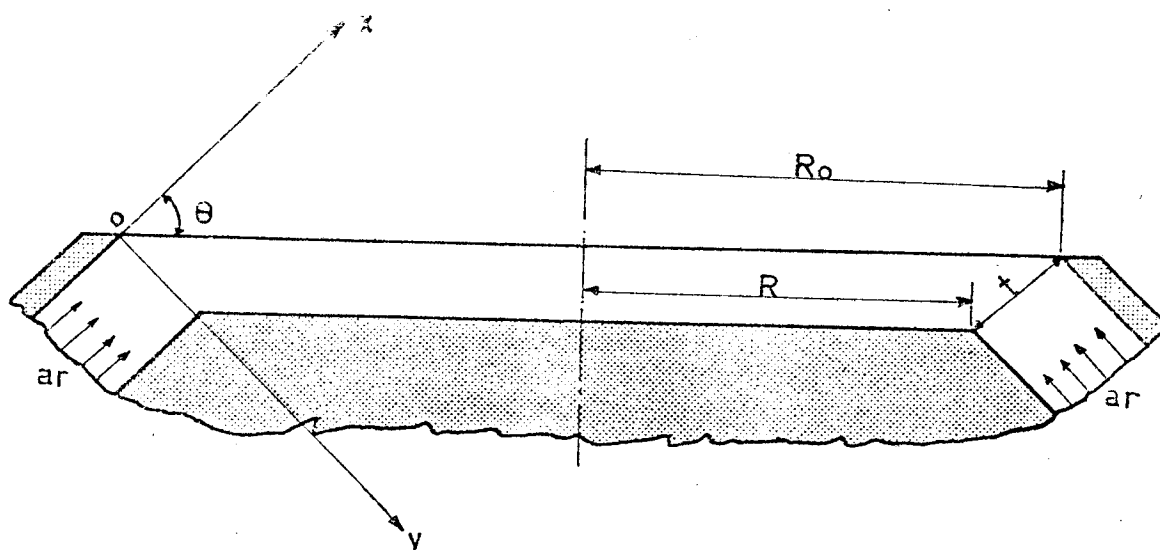


Figura 3.1 - SAÍDA DO BOCAL

Sendo dA a variação elementar da área lateral do tronco de cône, pode ser expressa em função da variação elementar da geratriz, por:

$$dA = 2 \pi (R_o - y \operatorname{sen} \theta) dy \dots\dots\dots (3.22)$$

Combinando-se as equações (3.4) e (3.12),
obtem-se:

$$V^2 = 2 H^* \left\{ \exp \left[\frac{-2y (1 + \cos \theta)}{h} \right] \right\} \dots (3.23)$$

Substituindo-se as equações (3.22) e (3.23)
em (3.21a), obtem-se:

$$J = \int_0^t 4 \pi H e^{-2ay} (R_o - y \operatorname{sen} \theta) dy, \dots\dots\dots (3.24)$$

sendo: $a = \frac{(1 + \cos \theta)}{h}$

Aplicando-se a propriedade da soma de integrais,
à equação (3.24), obtem-se:

$$J = 4 \pi H \left[\int_0^t R_o e^{-2ay} dy - \operatorname{sen} \theta \int_0^t y e^{-2ay} dy \right] \dots\dots\dots (3.25)$$

e desenvolvendo cada uma dessas integrais separadamente, tem-se:

$$a) \int_0^t R_0 e^{-2ay} dy = \frac{R_0}{2a} (e^{-2k} - 1) = \frac{R_0}{2a} (1 - e^{-2k}) \dots (3.26)$$

aonde k é dado pela equação (3.14).

$$b) \int_0^t y e^{-2ay} dy = u \cdot v - \int v du, \dots (3.27)$$

fazendo-se:

$$u = y \longrightarrow du = dy \dots (3.28)$$

$$dv = e^{-2ay} dy \longrightarrow v = -\frac{1}{2a} e^{-2ay} \dots (3.29)$$

obtem-se:

$$\int_0^t y e^{-2ay} dy = -\frac{1}{2a} y e^{-2ay} \Big|_0^t - \left(-\frac{1}{2a}\right) \int_0^t e^{-2ay} dy =$$

$$= -\frac{1}{2a} y e^{-2ay} \Big|_0^t + \left(\frac{1}{2a}\right) \left(-\frac{1}{2a} e^{-2ay}\right) \Big|_0^t =$$

$$= -\frac{1}{2a} t e^{-2k} - \frac{1}{4a^2} e^{-2k} + \frac{1}{4a^2} =$$

ou seja,

$$\int_0^t y e^{-2ay} dy = \frac{1}{2a} \left[-t e^{-2k} + \frac{1}{2a} (1 - e^{-2k}) \right] \dots (3.30)$$

Substituindo-se as equações (3.26) e (3.30) em (3.25). obtem-se a reação total do jato sôbre o bocal, da da por:

$$J = \frac{2 \pi H}{a} \left[R_o \cdot (1 - e^{-2k}) + \text{sen } \theta t e^{-2k} - \frac{\text{sen } \theta}{2a} \cdot (1 - e^{-2k}) \right] \dots (3.31)$$

De acôrdo com a equação (3.18) a reação ver tical do jato, que para efeito de identificação será denominada de J_v , é dada por:

$$J_v = J \cdot \text{sen } \theta$$

aonde: J = reação total do jato e

θ = ângulo de inclinação da saída do bocal

Assim, de conformidade com a equação (3.31), obtem-se a reação vertical do jato, em sua forma final, dada por:

$$J_v = \frac{2 \pi H}{a} \sin \theta \left[R_o (1 - e^{-2k}) + \sin \theta t e^{-2k} - \frac{\sin \theta}{2a} \cdot (1 - e^{-2k}) \right] \dots\dots\dots (3.32)$$

3.2.3 - EXPRESSÃO FINAL PARA CÁLCULO DA SUSTENTAÇÃO

Sabendo-se que a sustentação, de conformidade com a equação (3.16), é dada por:

$$F = F_l + J_v \quad , \quad \dots\dots\dots (3.33)$$

e conhecendo-se as expressões que permitem calcular F_l e J_v em função dos elementos geométricos do bocal e dos parâmetros relacionados com o escoamento, equações (3.20) e (3.31), tem-se como expressão final, para o cálculo da sustentação, as seguintes equações:

$$F = \frac{2 \pi H \sin \theta}{a} \left[t \sin \theta e^{-2k} + \left(\frac{R_l^2 a}{2 \sin \theta} + R_o - \frac{\sin \theta}{2a} \right) \cdot (1 - e^{-2k}) \right] \dots\dots\dots (3.34)$$

ou, substituindo-se R_o por $R + t \sin \theta$,

$$F = \frac{2 \pi H \sin \theta}{a} \left[t \sin \theta + \left(\frac{R_l^2 a}{2 \sin \theta} + R - \frac{\sin \theta}{2a} \right) (1 - e^{-2k}) \right] \dots\dots\dots (3.35)$$

3.3 - DETERMINAÇÃO DA VAZÃO NECESSÁRIA AO SISTEMA

Como se sabe, a "vazão" através de uma superfície é calculada por:

$$Q = \iint_A \vec{V} \cdot d\vec{A} , \dots\dots\dots (3.36)$$

que aplicada a saída do bocal, resulta em:

$$Q = \iint_A V dA \dots\dots\dots (3.37)$$

Recorrendo às equações (3.23) e (3.4), tem-se que:

$$dA = 2 \pi (R_o - y \sin \theta) dy \dots\dots\dots (3.23)$$

$$V^2 = \frac{2}{\rho} (H^* - p^*) \dots\dots\dots (3.4)$$

Mas, de acordo com a equação (3.12), sabe-se que:

$$p^* = H^* \left\{ 1 - \exp \left[\frac{-2y (1 + \cos \theta)}{h} \right] \right\} \dots\dots\dots (3.12)$$

Logo, combinando-se as equações (3.4) e (3.12), obtém-se a seguinte expressão para a velocidade do jato na saída do bocal:

$$v = \left(\frac{2 H^*}{\rho} \right)^{1/2} \cdot \exp \left[-y \left(\frac{1 + \cos \theta}{h} \right) \right], \dots\dots\dots (3.38)$$

que substituída juntamente com a equação (3.23), em (3.37), permite que se expresse a vazão do bocal por:

$$Q = \int_0^t 2 \pi \left(\frac{2 H^*}{\rho} \right)^{1/2} \cdot (R_0 - y \sin \theta) \cdot \exp \left[\frac{-y (1 + \cos \theta)}{h} \right] \cdot dy \dots\dots (3.39)$$

ou, fazendo-se $a = \frac{(1 + \cos \theta)}{h}$ e reorganizando os termos da equação (3.39), obtém-se:

$$Q = 2 \pi \left(\frac{2 H^*}{\rho} \right)^{1/2} \left[\int_0^t R_0 e^{-ay} dy - \sin \theta \int_0^t y e^{-ay} dy \right] \dots\dots \dots (3.40)$$

Desenvolvendo as integrais separadamente e aplicando a técnica de integração por partes na 2ª integral, obtém-se:

$$a) \quad \int_0^t R_0 e^{-ay} dy = -\frac{R_0}{a} (e^{-k} - 1) = \frac{R_0}{a} (1 - e^{-k}) \dots\dots \dots (3.41)$$

$$b) \int_0^t y e^{-ay} dy = -\frac{1}{a} \left[t e^{-k} - \frac{1}{a} (1 - e^{-k}) \right] \dots (3.42)$$

Da combinação das equações (3.40), (3.41) e (3.42), resulta:

$$Q = \frac{2\pi}{a} \left(\frac{2 H^*}{f} \right)^{1/2} \left[t \operatorname{sen} \theta e^{-k} + (R_o - \frac{\operatorname{sen} \theta}{a}) (1 - e^{-k}) \right] \dots (3.43)$$

ou, fazendo-se $R_o = R + t \operatorname{sen} \theta$,

$$Q = \frac{2\pi}{a} \left(\frac{2 H^*}{f} \right)^{1/2} \left[t \operatorname{sen} \theta + (R - \frac{\operatorname{sen} \theta}{a}) (1 - e^{-k}) \right] \dots (3.44)$$

3.4 - CÁLCULO DA POTÊNCIA DO BOCAL

Define-se a potência do bocal, por:

$$N = H^* \cdot Q \dots (3.45)$$

Utilizando os resultados obtidos no item 3.3, ou seja, as equações (3.43) ou (3.44), obtem-se para a potência do bocal, a seguinte expressão:

$$N = \frac{2\pi}{a} \left(\frac{2}{f} \right)^{1/2} \cdot H^{3/2} \left[t \operatorname{sen} \theta e^{-k} + (R_o - \frac{\operatorname{sen} \theta}{a}) (1 - e^{-k}) \right] \dots (3.46)$$

ou,

$$N = \frac{2\pi}{a} \left(\frac{2}{f} \right)^{1/2} \cdot H^{3/2} \left[t \sin \theta + \left(R - \frac{\sin \theta}{a} \right) (1 - e^{-k}) \right] \dots$$

... (3.47)

OBS: Embora a geometria do colchão adotado neste trabalho, apresenta uma configuração circular, deve-se ressaltar - que, o procedimento de cálculo apresentado é válido para uma outra qualquer.

3.5 - SUMÁRIO DA ANÁLISE MATEMÁTICA

Objetivando facilitar as aplicações práticas dos resultados contidos nos itens anteriores, elaborou-se um sumário, afim de proporcionar um rápido acesso a tais informações. Assim sendo, tem-se:

- Distribuição da pressão na saída do bocal

$$p^* = H^* \left\{ 1 - \exp \left[- \frac{-2y (1 + \cos \theta)}{h} \right] \right\} \dots \dots (3.12)$$

- Pressão atuante no colchão de Ar

$$p_c^* = H^* (1 - e^{-2k}) \dots\dots\dots (3.15)$$

$$\text{sendo } k = \frac{-2t (1 + \cos \theta)}{h} \dots\dots\dots (3.14)$$

- Fôrça de sustentação proveniente do colchão de ar

$$F_l = p_c^* \cdot S = \pi R_l^2 H (1 - e^{-2k}) \dots\dots\dots (3.20)$$

- Reação total do jato

$$J = \frac{2 \pi H}{a} \left[t \sin \theta e^{-2k} + \left(R_o - \frac{\sin \theta}{2a} \right) \cdot (1 - e^{-2k}) \right] \dots\dots\dots (3.31)$$

- Reação vertical do jato

$$J_v = \frac{2 \pi H}{a} \sin \theta \left[t \sin \theta e^{-2k} + \left(R_o - \frac{\sin \theta}{2a} \right) (1 - e^{-2k}) \right] \dots\dots\dots (3.32)$$

- Sustentação total fornecida pelo sistema

$$F = \frac{2\pi H \operatorname{sen} \theta}{a} \left[t \operatorname{sen} \theta e^{-2k} + \left(\frac{R_1^2 a}{2 \operatorname{sen} \theta} + R_o - \frac{\operatorname{sen} \theta}{2a} \right) \cdot (1 - e^{-2k}) \right] \dots\dots\dots (3.34)$$

ou,

$$F = \frac{2\pi H \operatorname{sen} \theta}{a} \left[t \operatorname{sen} \theta + \left(\frac{R_1^2 a}{2 \operatorname{sen} \theta} + R - \frac{\operatorname{sen} \theta}{2a} \right) \cdot (1 - e^{-2k}) \right] \dots\dots\dots (3.35)$$

- Vazão necessária ao sistema

$$Q = \frac{2\pi}{a} \left(\frac{2H}{f} \right)^{1/2} \left[t \operatorname{sen} \theta e^{-k} + \left(R_o - \frac{\operatorname{sen} \theta}{a} \right) \cdot (1 - e^{-k}) \right] \dots\dots\dots (3.43)$$

ou,

$$Q = \frac{2\pi}{a} \left(\frac{2H}{f} \right)^{1/2} \left[t \operatorname{sen} \theta + \left(R - \frac{\operatorname{sen} \theta}{a} \right) \cdot (1 - e^{-k}) \right] \dots\dots\dots (3.44)$$

- Potência do bocal

$$N = \frac{2\pi}{a} \left(\frac{2}{f} \right)^{1/2} \cdot H^{3/2} \left[t \operatorname{sen} \theta e^{-k} \left(R_0 - \frac{\operatorname{sen} \theta}{a} \right) \cdot \right. \\ \left. \cdot (1 - e^{-k}) \right] \dots\dots\dots (3.46)$$

ou,

$$N = \frac{2\pi}{a} \left(\frac{2}{f} \right)^{1/2} \cdot H^{3/2} \left[t \operatorname{sen} \theta + \left(R - \frac{\operatorname{sen} \theta}{a} \right) \cdot \right. \\ \left. \cdot (1 - e^{-k}) \right] \dots\dots\dots (3.47)$$

4 - ANÁLISE DOS RESULTADOS

Obtido o modelo matemático com a simplicidade desejada, resta agora, comprovar a concordância do seu equacionamento com o sistema real, bem como, a acuracidade dos seus resultados.

A verificação da coerência, foi realizada, observando-se a concordância do equacionamento matemático com o comportamento funcional do banco de ensaios (ver item 4.1). Enquanto, a acuracidade dos resultados, foi comprovada, comparando-os com os resultados fornecidos por Strand em [5] e com os obtidos experimentalmente, por intermédio do banco de ensaios (ver item 4.2).

4.1 - VERIFICAÇÃO DA COERÊNCIA DOS RESULTADOS

Analisando-se o sistema real (banco de ensaios) em funcionamento, pôde-se constatar experimentalmente, a influência das principais grandezas físicas e geométricas, na sustentação. Assim sendo, verificou-se que:

- A pressão do colchão converge para a pressão do bocal, quando a sua altura tende à zero;
- A força de sustentação apresenta um decremento semelhante ao exponencial, quando se aumenta a altura do colchão; e que,
- Há um aumento da força de sustentação, quando se diminui o ângulo de inclinação do jato.

Voltando-se agora, para o modelo deste trabalho e analisando o seu equacionamento matemático, chega-se a se

- A pressão do colchão converge para a pressão do bocal, quando "h" tende a zero (equação 3.12);

- A força de sustentação apresenta um decréscimo exponencial, quando se aumenta a altura do colchão (equação 3.35) e ainda,

- Diminuindo-se o ângulo de saída do jato, verifica-se um aumento da força de sustentação (equação 3.35).

De posse desses resultados, conclui-se que, apesar do modelo apoiar-se em algumas considerações simplificadas, seu equacionamento mantém-se coerente com o sistema real.

4.2 - VERIFICAÇÃO DA ACURACIDADE DOS RESULTADOS

Importantes conclusões, foram obtidas por intermédio de análises comparativas, entre os resultados deste trabalho e os apresentados por Strand em [5] .

A primeira, relacionada com a figura 4.1, permite constatar que, nem só a pressão do colchão, em ambos os modelos, converge para a pressão do bocal, quando "h" tender à zero, como também, estas curvas apresentam-se bastante próximas, excetuando-se quando o jato sai perpendicularmente à superfície de apoio.

Observando-se as figuras 4.2 e 4.3, que apresentam os fatores de amplificação dos dois modelos, para diferentes valores de " θ " (ângulo de inclinação do jato), verifica-se também uma aceitável concordância de formas entre as curvas, devendo-se salientar que, as divergências entre as mesmas, relacionam-se com os parâmetros geométricos dos modelos. Enquanto em [5] , considerou-se a área do bocal para o

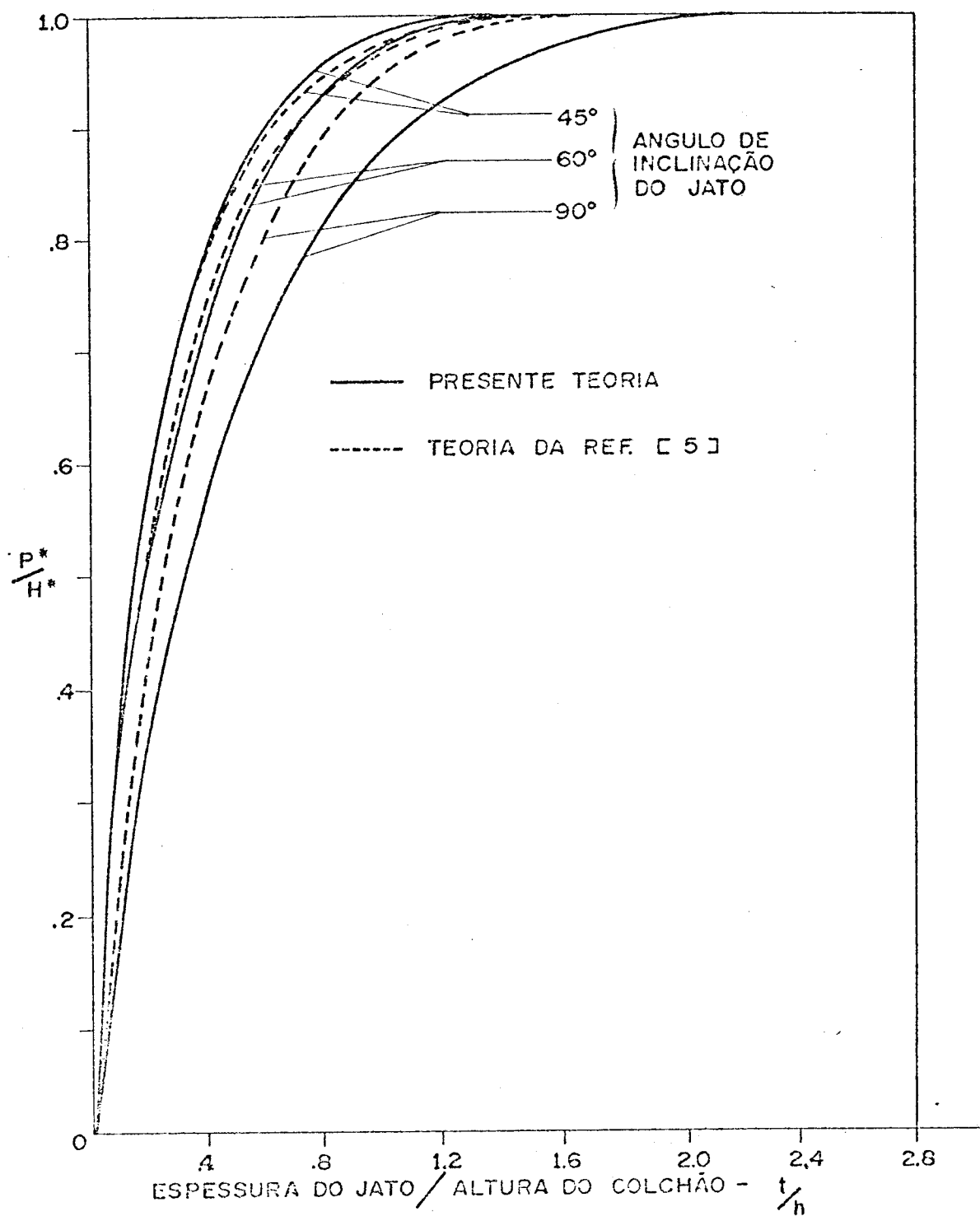


Figura 4.1 - VARIAÇÃO DA PRESSÃO DO COLCHÃO

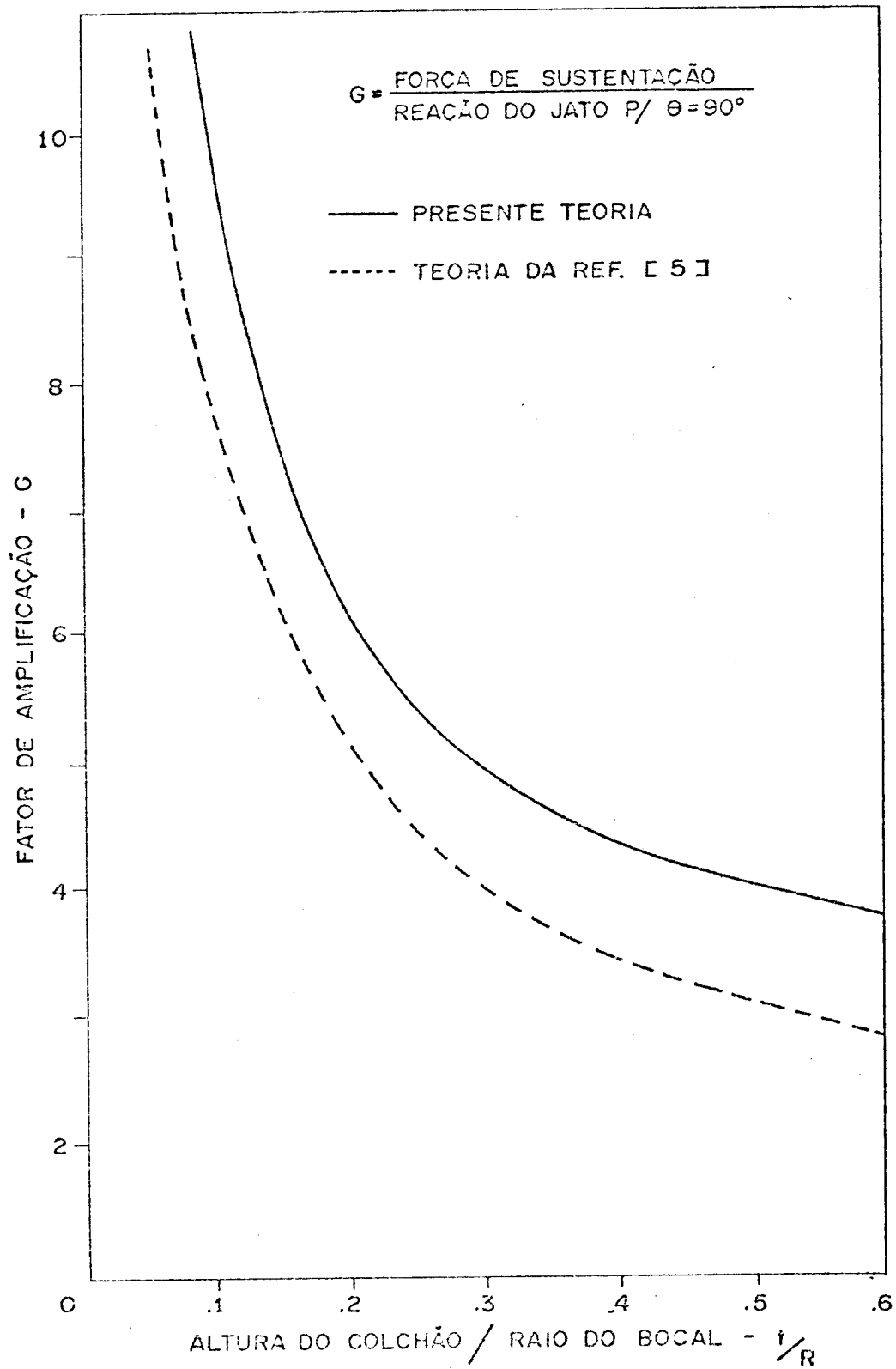


Figura 4.2 - FATOR DE AMPLIFICAÇÃO - $\theta = 90^\circ$

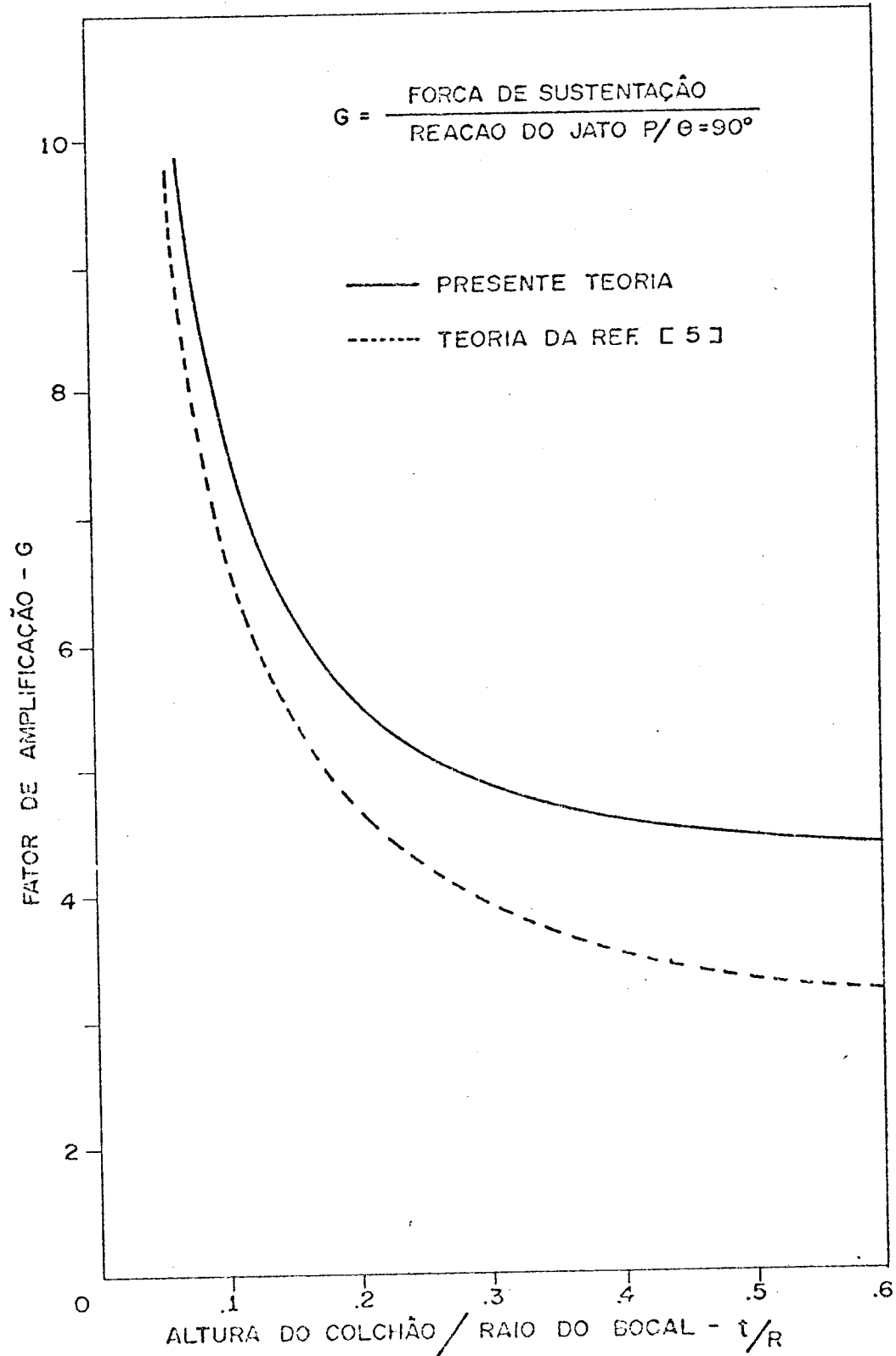


Figura 4.3 - FATOR DE AMPLIFICAÇÃO - $\theta = 60^\circ$

cálculo da sustentação, neste trabalho, utilizou-se a área sob a superfície de apoio, que de conformidade com a figura 2.1.a, é sempre maior que a do bocal e crescente com "h" .

Verifica-se também, por observação das figuras 4.24 à 4.32, uma notável concordância entre os resultados fornecidos pelo equacionamento e os obtidos experimentalmente, mantendo-se o erro entre os mesmos, dentro de limites aceitáveis para projetos. Deve-se salientar que, a confiabilidade desta análise depende diretamente da técnica de medida adotada, bem como, dos equipamentos utilizados, julgando-se de todo conveniente discorrer sobre esses elementos.

4.2.1 - TÉCNICA DE MEDIDA EMPREGADA

Sabendo-se que o manuseio de dados sempre facilita a distorção dos resultados, procurou-se comprovar a acuracidade, de maneira a haver a mínima interferência pessoal em sua computação. Assim, utilizando o equacionamento matemático desenvolvido nos itens anteriores, elaborou-se um programa de computador, para simular funcionalmente o modelo adotado. Traçou-se, diferentes curvas teóricas, relacionando as grandezas: - pressão do colchão (figura 4.1), fator de amplificação (figuras 4.2 e 4.3) e força de sustentação (figura 4.24 à 4.32) com a altura do colchão.

Para análise das curvas das figuras 4.1, 4.2 e 4.3 recorreu-se aos resultados publicados por Strand em [5]. Já, para a verificação da força de sustentação, figura 4.24 à 4.32, recorreu-se ao levantamento de curvas experimentais.

Para a obtenção das curvas experimentais, teve-se que projetar e construir um banco de ensaios de funcionamento

mento semelhante ao modelo físico adotado (figura 2.1), que equipado com instrumentos de medida de alta precisão, permitis se controlar isoladamente, todas as grandezas envolvidas na sustentação.

Com o equipamento pronto, colocou-se as curvas teóricas no registrador X - Y , figura 4.6, traçando-se com auxílio das informações obtidas na simulação, as curvas experimentais, diretamente sobre as curvas teóricas (figuras 4.24 à 4.32).

4.2.2 - APRESENTAÇÃO DO BANCO DE ENSAIOS

O projeto e a construção do banco de ensaios ocupou a grande parte do tempo gasto com este trabalho.

No início, as dificuldades eram inúmeras, pois as premissas a serem satisfeitas eram tantas e as informações técnicas que se dispunha, praticamente inexistiam. Mas aos pouco, em função das pesquisas bibliográficas e da orientação recebida do Dr. Kamal A.R. Ismail, até então, orientador do trabalho, adquiriu-se os conhecimentos básicos necessários à definição dos principais parâmetros geométricos do sistema.

Das referências bibliográficas [10] , [11] , [12] , obteve-se as seguintes recomendações práticas para as relações:

- Espessura do jato/diâmetro do bocal (t/D) = 0,02 $\longrightarrow$ 0.08
- Altura do colchão/diâmetro do bocal (h/D) = 0.05 $\longrightarrow$ 0.20

Apoiando-se nessas relações e na orientação do Dr. Kamal, adotou-se as seguintes dimensões para os elementos

abaixo relacionados: -

- Diâmetro do bocal - $D = 60$ (mm).
- Espessura do jato, na saída do bocal - $t = 2$ (mm).
- Altura máxima do colchão - $h_{\max.} = 10$ (mm).

Com os quais, verifica-se: -

$$\frac{t}{D} = \frac{2}{60} = 0.033$$

e

$$\frac{h}{D} = \frac{10}{60} = 0.167,$$

valores estes, pertencentes aos intervalos acima definidos.

Como o objetivo principal do projeto estava voltado para a verificação da acuracidade dos resultados fornecidos pelo equacionamento matemático, várias alternativas construtivas foram analisadas. Procurando-se uma de maior identidade com o modelo adotado (figura 2.1), desenvolveu-se o sistema apresentado pelas figuras 4.4 à 4.19, que se seguem:

DESCRIÇÃO DOS ELEMENTOS COMPONENTES DO BANCO DE ENSAIOS

- 1 - Condutor do sinal elétrico para a ponte amplificadora nº 2.
- 2 - Elemento estrutural para fixação do bocal.
- 3 - Bocal.
- 4 - Colchão de Ar.
- 5 - Superfície de apoio.
- 6 - Haste deformadora do anel dinamométrico.
- 7 - Dinamômetro.
- 8 - Anel dinamométrico.
- 9 - Captador Indutivo Hottinger - KW - 10.
- 10 - Condutor do sinal elétrico para uma ponte amplificadora nº 1.
- 11 - Variador da altura do colchão - porca-parafuso.
- 12 - Captador Indutivo Hottinger - KW - 50.
- 13 - Mancal deslizando com esfera recirculante.
- 14 - Elemento estrutural.
- 15 - Torre de sustentação do dinamômetro.
- 16 - Nivelador do dinamômetro.
- 17 - Rolamento de esferas recirculantes.
- 18 - Mancal guia da haste de deformação do anel.
- 19 - Suporte do mancal e anel dinamométrico.
- 20 - Fixador do mancal no suporte.

- 21 - Tubo de Pitot.
- 22 - Canalização proveniente do compressor nº 2.
- 23 - Manômetro do compressor nº 2.
- 24 - Registro.
- 25 - Filtro de ar.
- 26 - Manômetro para controle da pressão no filtro.
- 27 - Registro para controle da vazão do circuito.
- 28 - Registro.
- 29 - Manômetro para controle da pressão no circuito.
- 30 - Canalização proveniente do compressor nº 1.
- 31 - Manômetro com tubo inclinado com leitura max. = 5 [mm] .
- 32 - Corpo interno do bocal.
- 33 - Saída do bocal.

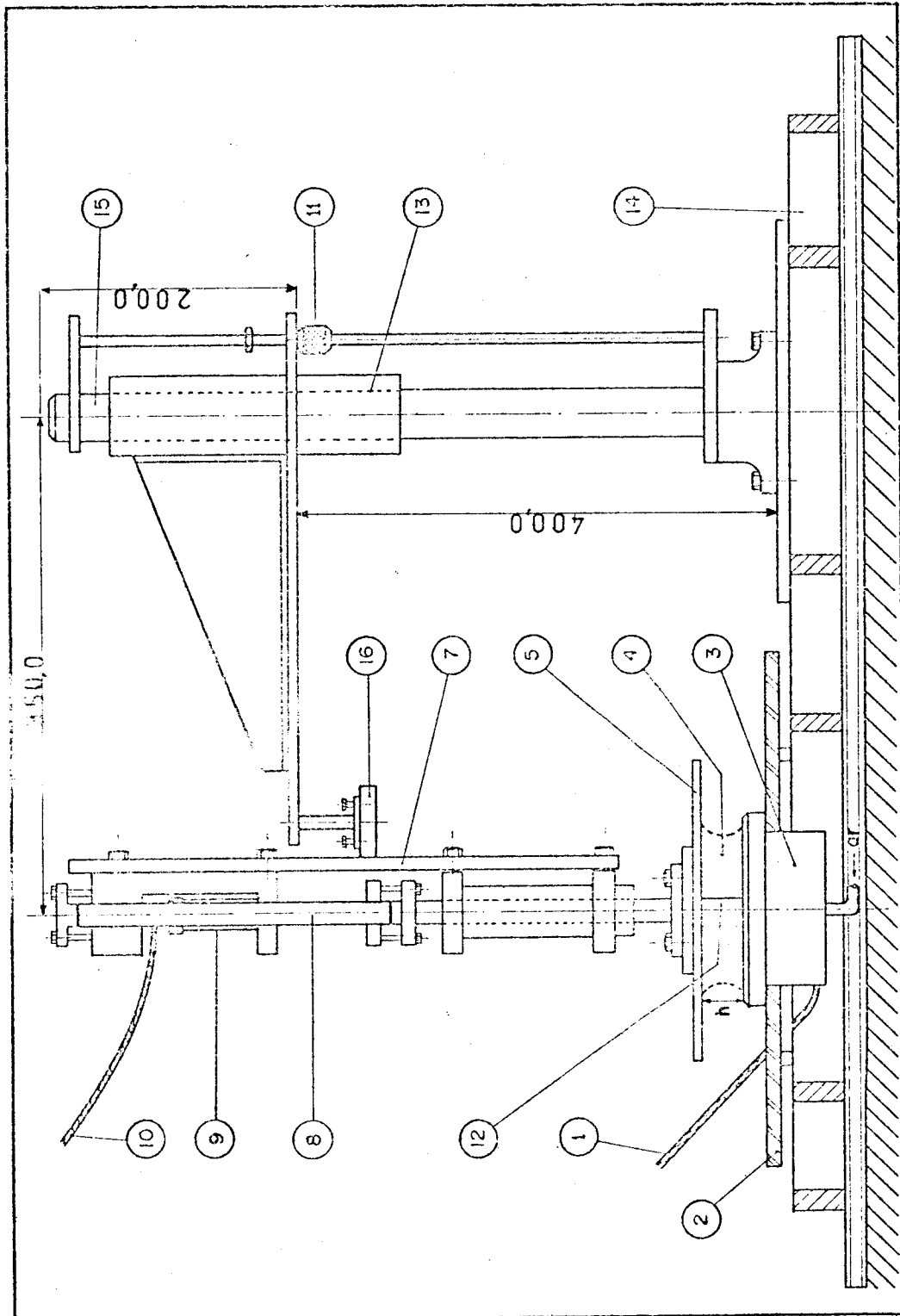
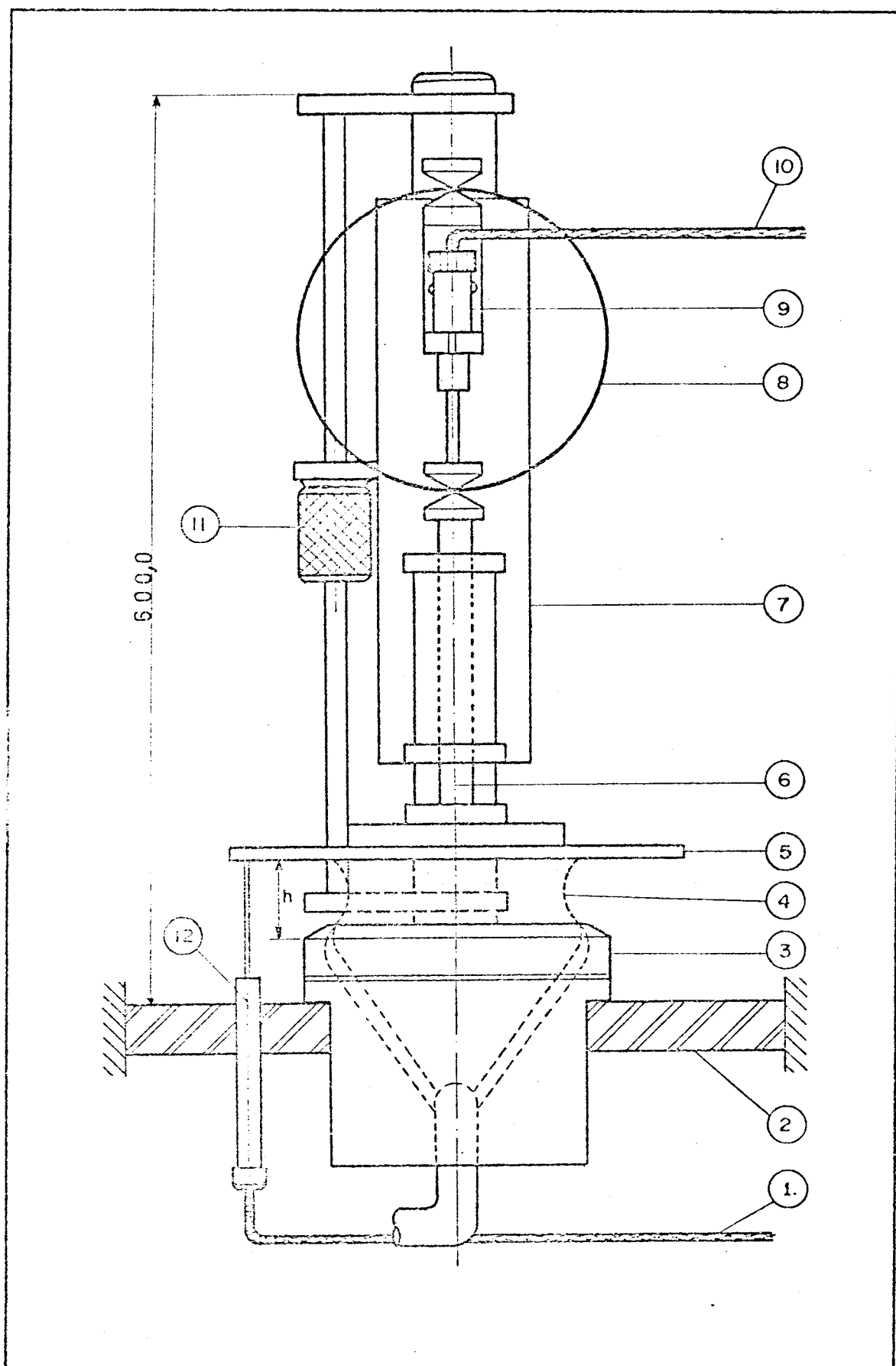


Figura 4.4 - BANCO DE ENSAIOS - VISTA LATERAL



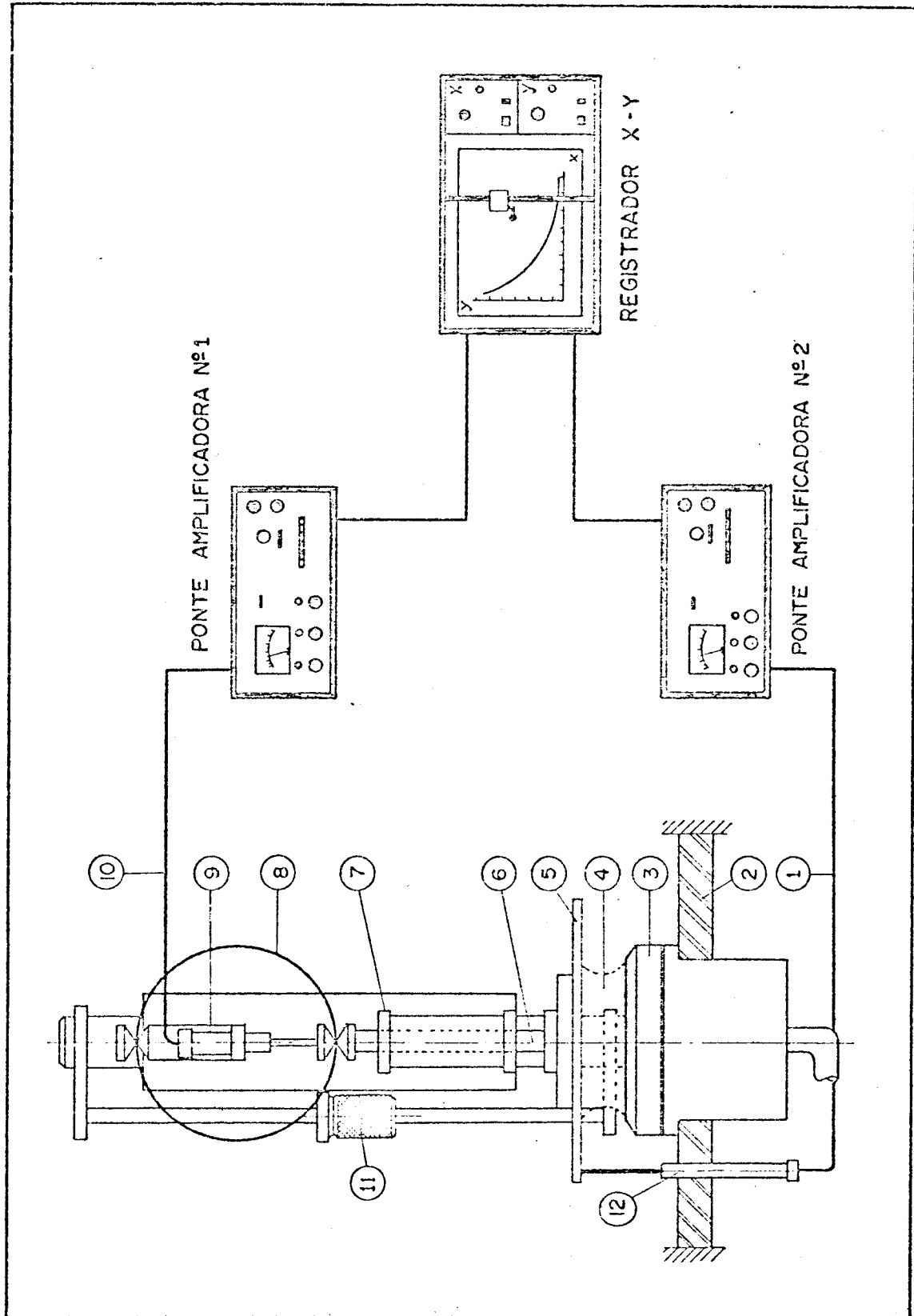


Figura 4.6 - BANCO DE ENSAIOS - INSTRUMENTOS DE MEDIDAS

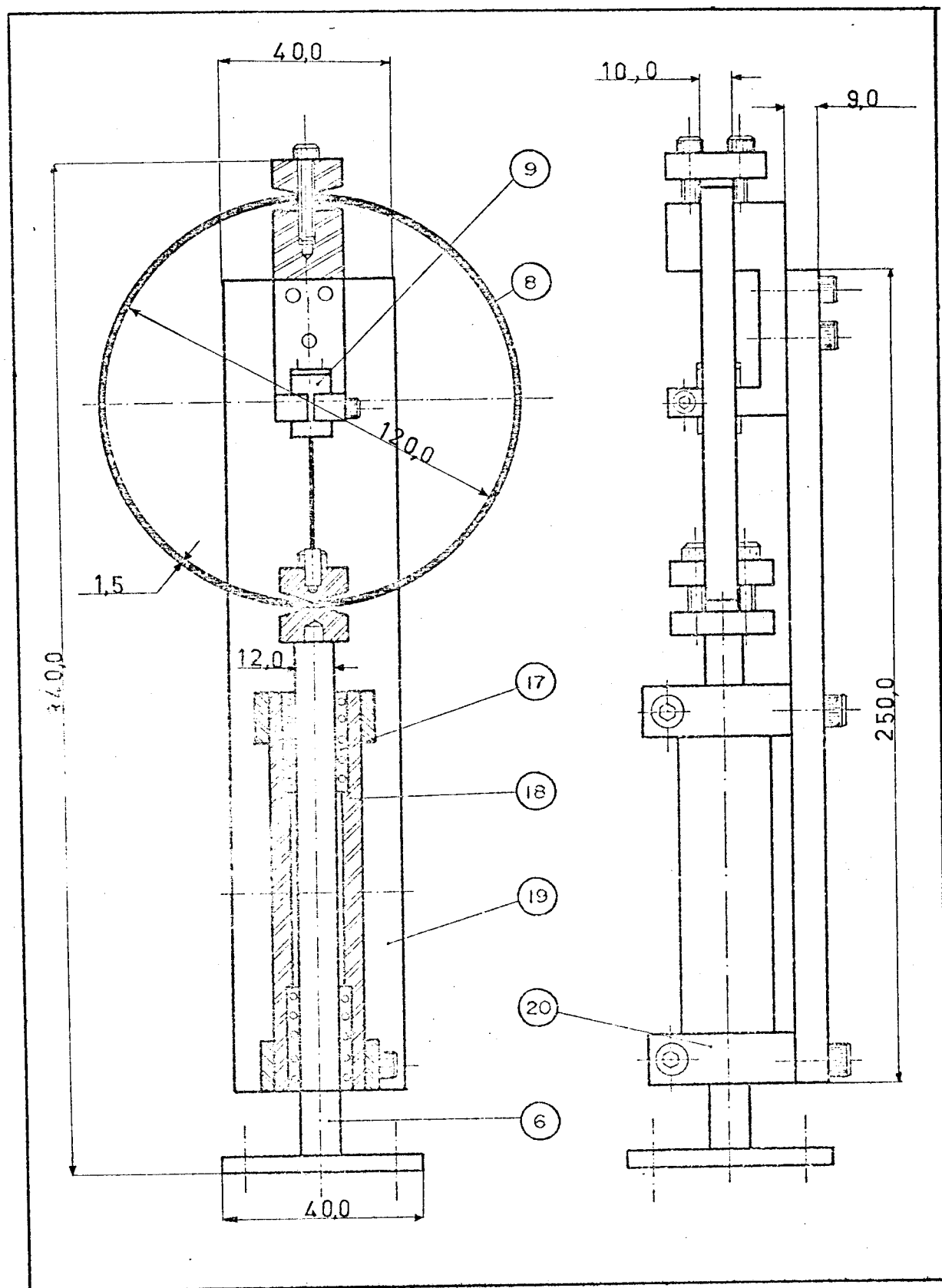
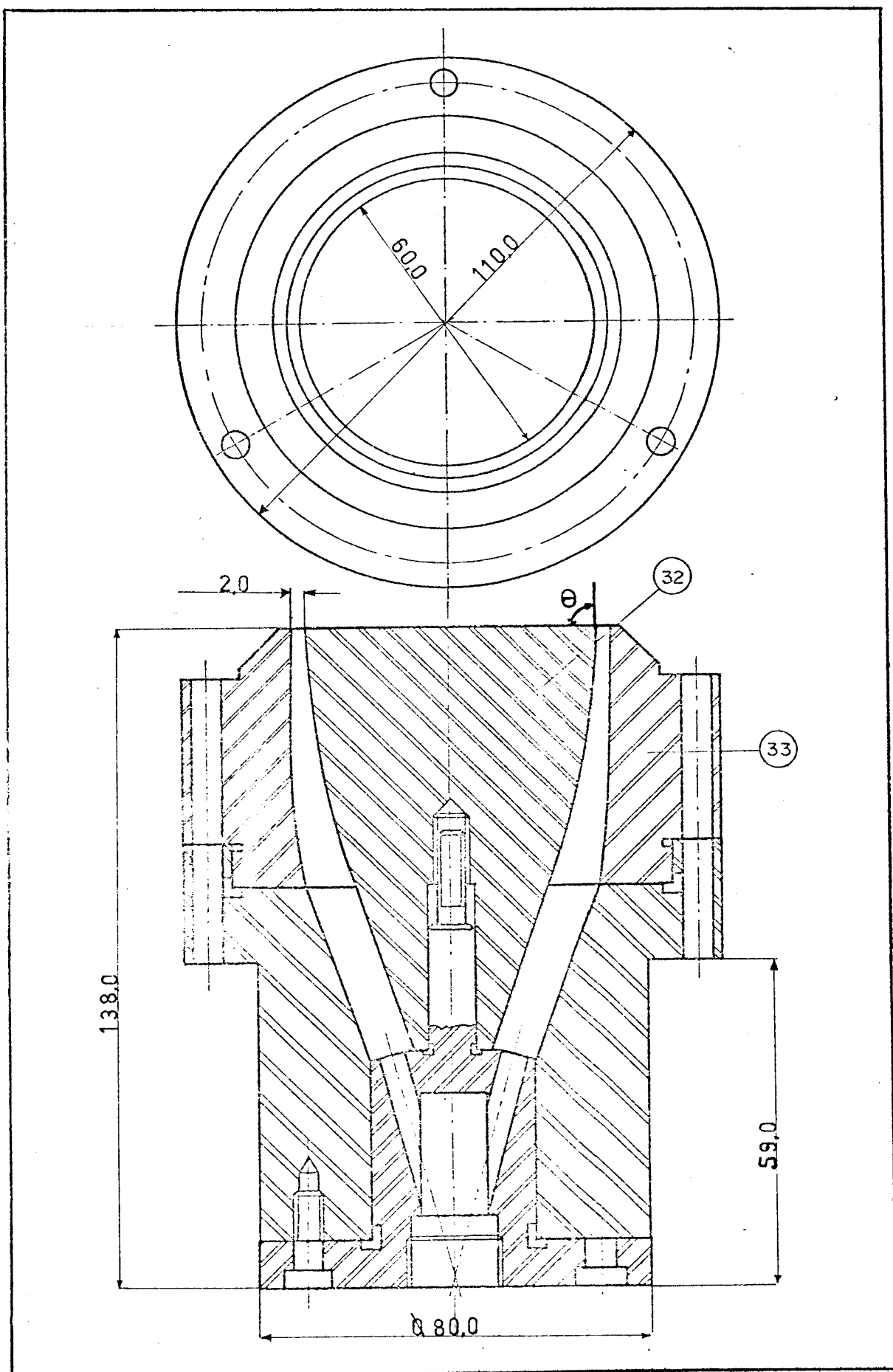


Figura 4.8 - BANCO DE ENSAIOS - DINAMÔMETRO



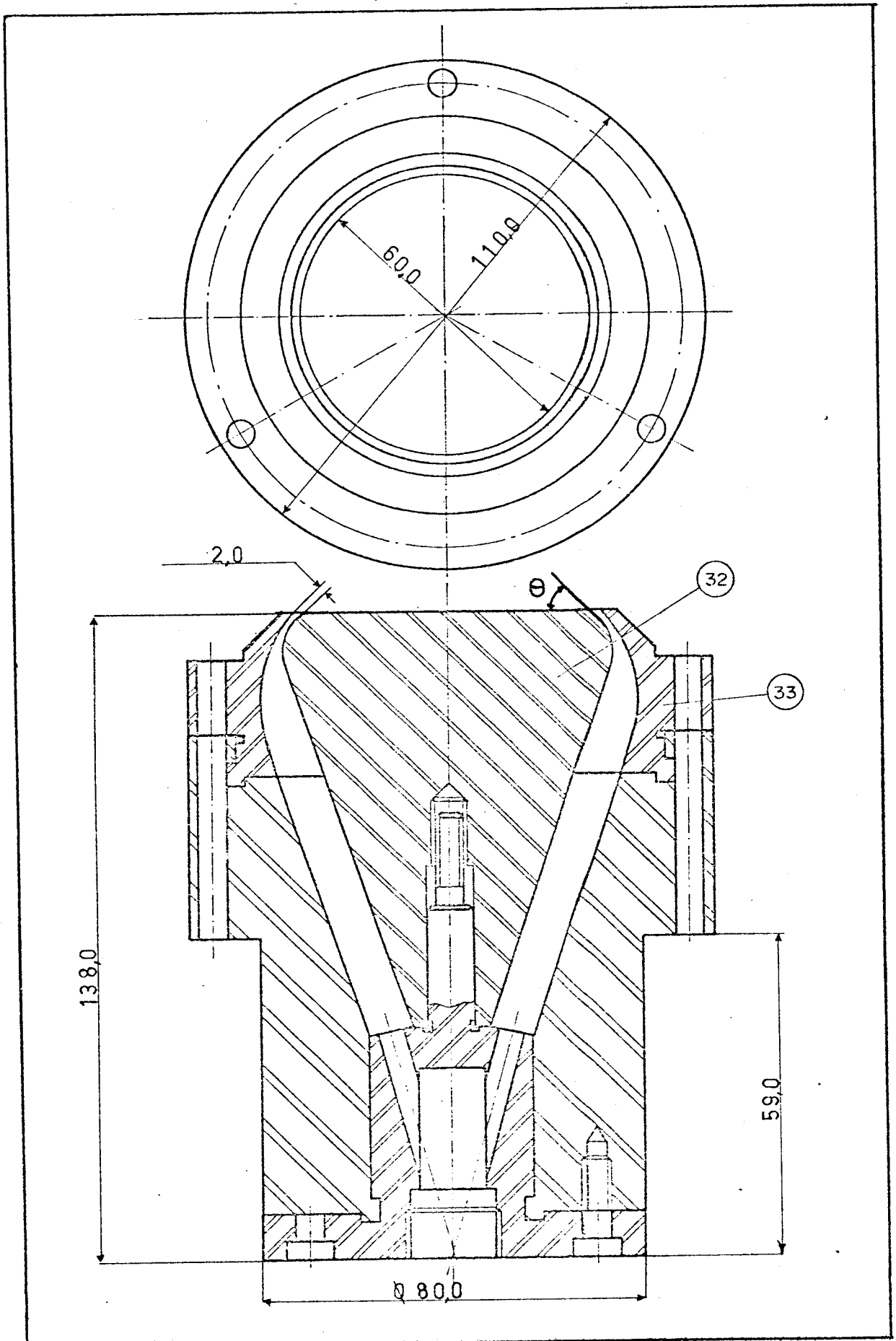
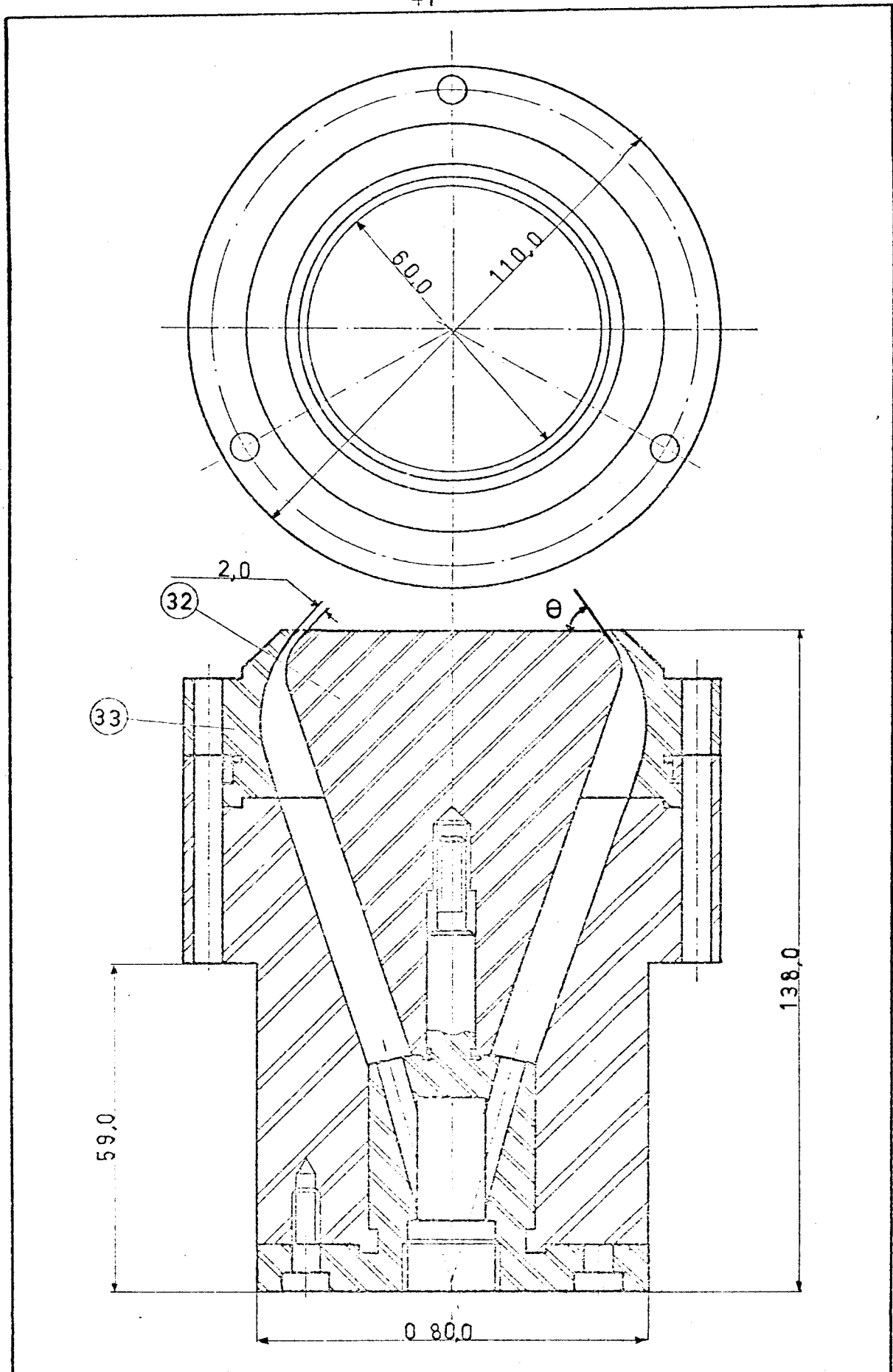


Figura 4.10 - BANCO DE ENSAIOS - BOCAL - $\theta = 60^\circ$



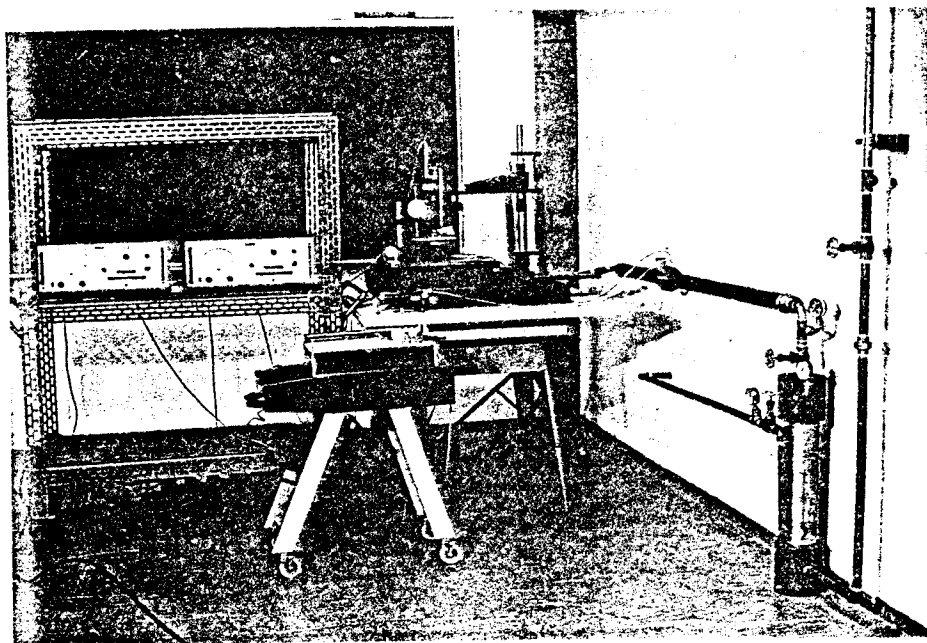


Figura 4.12 - VISTA GERAL DO BANCO DE ENSAIOS

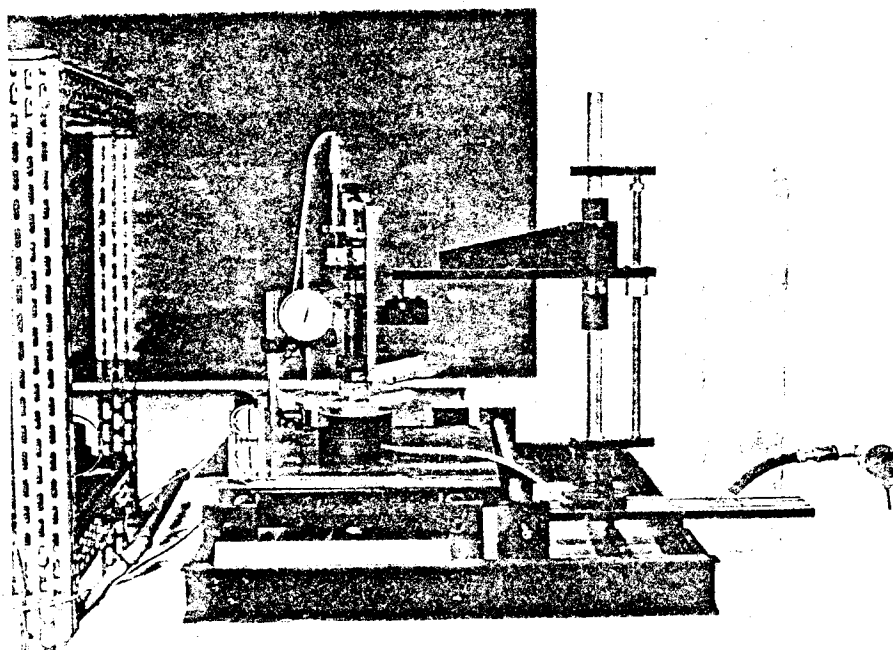


Figura 4.13 - BANCO DE ENSAIOS - VISTA LATERAL

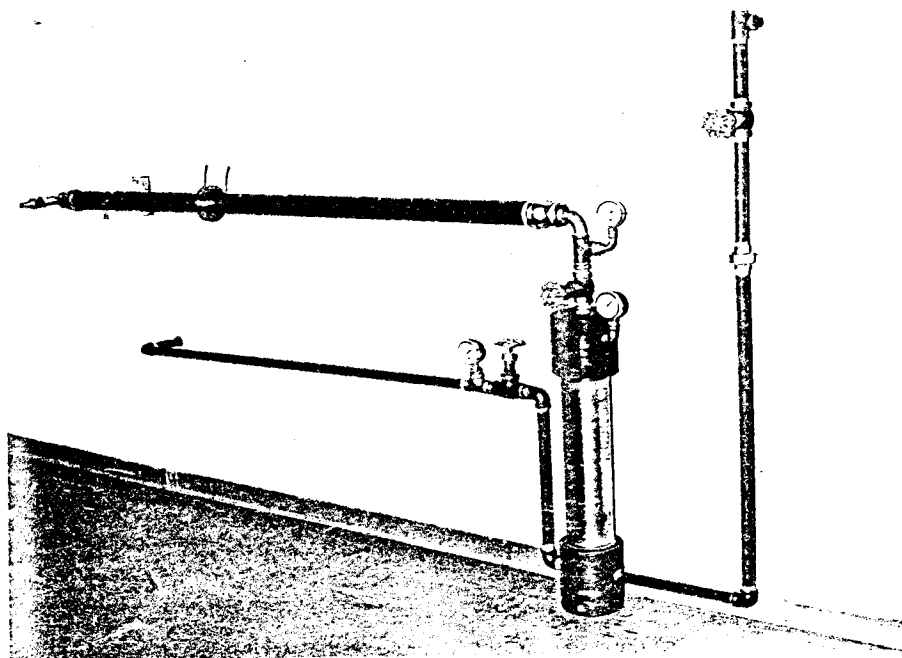


Figura 4.14 - CIRCUITO PNEUMÁTICO

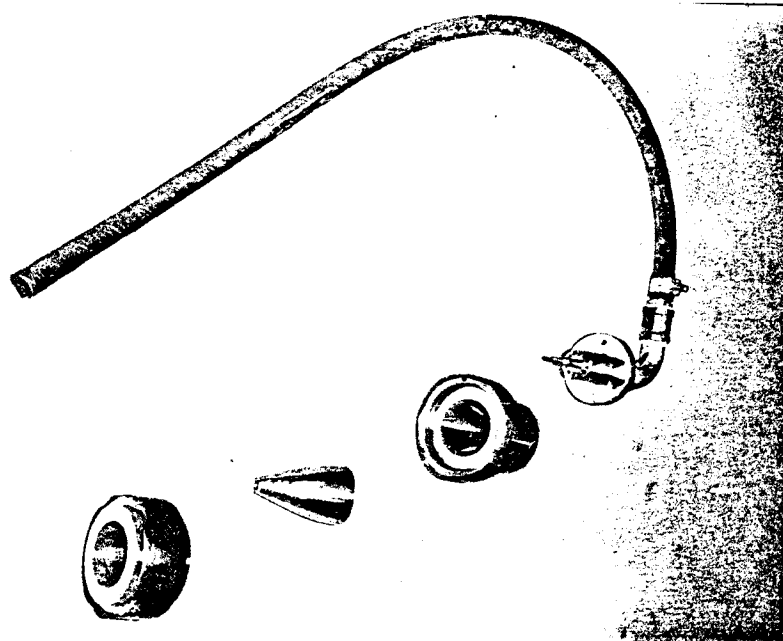


Figura 4.15 - BOCAL

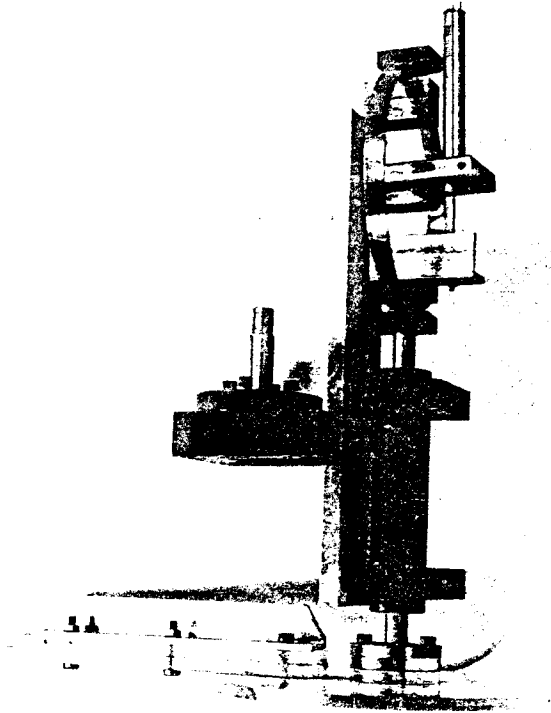
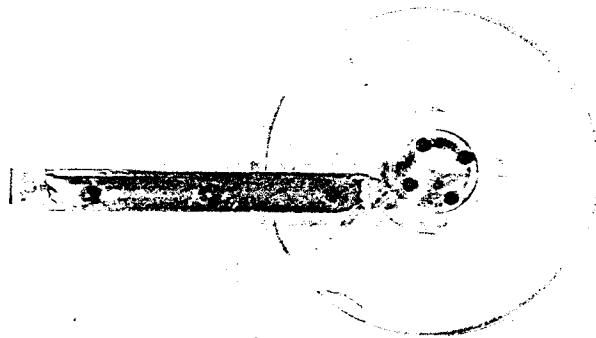


Figura 4.16 - DINAMOMETRO



4.0.

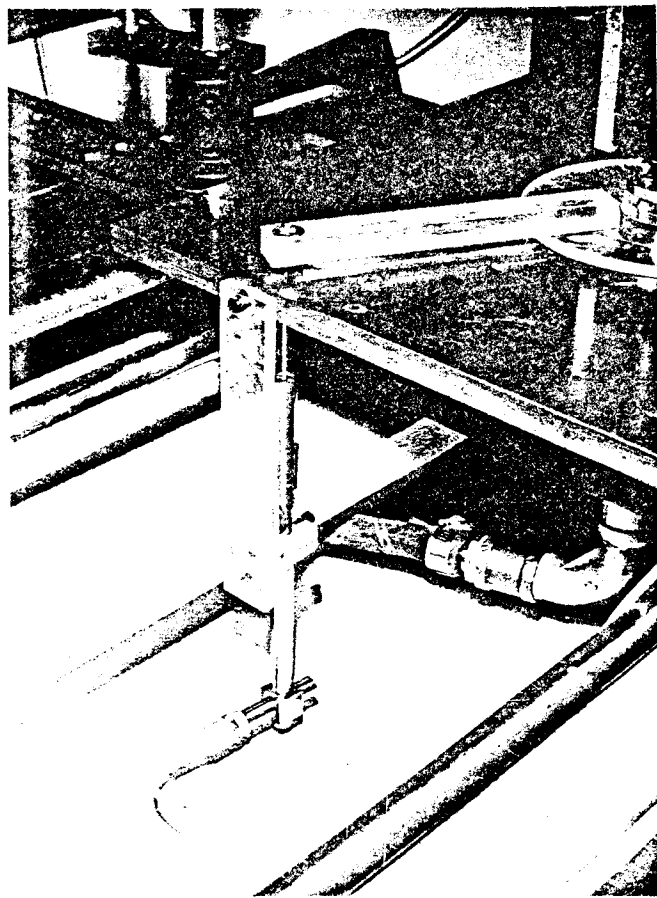
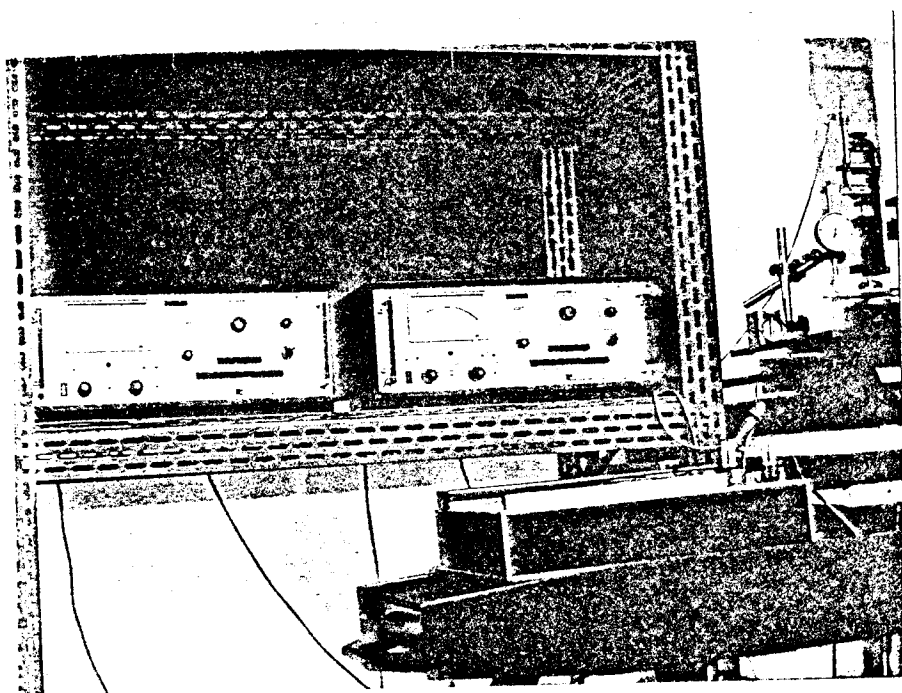


Figura 4.18 - CAPTADOR PARA MEDIDA DA
ALTURA DO COLCHÃO



4.2.3 - DESCRIÇÃO FUNCIONAL DO EQUIPAMENTO

A descrição funcional do equipamento, será desenvolvida baseando-se nas figuras 4.4, 4.5, 4.6 e 4.7; devendo-se salientar que um único numeral será utilizado para representar cada componente do sistema, em todas as figuras.

De conformidade com as figuras 4.4 e 4.5, observa-se que o colchão de ar (4), gerado por jatos periféricos provenientes do bocal (3), atua na superfície de apoio (5) provocando uma deformação no anel dinamométrico (8), por intermédio da haste metálica (6). Esta deformação aciona o captador indutivo (9), gerando um "sinal elétrico" que é enviado à ponte amplificadora nº 1 (figura 4.6), e desta para a coordenada Y do registrador (figura 4.6). Simultaneamente, o captador (12), também indutivo, envia um "sinal elétrico" para a ponte amplificadora nº 2, registrando o afastamento da superfície de apoio de saída do bocal (altura do colchão). Desta ponte, o sinal é enviado para a coordenada X do registrador, tornando-se possível registrar desta maneira, a força de sustentação em função da altura do colchão.

Convém ressaltar que, para se conseguir registros contínuo destas grandezas, recorreu-se ao sistema "porca-parafuso" (11) (figura 4.4), que apesar de ser um mecanismo simples, funcionou a contento no levantamento dos resultados experimentais.

Como seria difícil de analisar a influência de todos os parâmetros na sustentação, tomou-se em consideração, somente as variações da inclinação do jato e da vazão do escoamento.

Assim sendo, a variação do ângulo de saída do jato, figura 4.9, 4.10 e 4.11, foi conseguida substituindo-se os elementos (32) e (33) do bocal, desenvolvendo-se para isto, os três conjuntos mostrados pelas referidas figuras.

O fluxo de ar, proveniente dos compressores (22) e (30), chega até o bocal passando pelo filtro (25), registro regulador da vazão (27) e pelo "tubo de Pitot" (21), utilizado como medidor da vazão. Convém salientar ainda, que os registros (24) e (28), bem como, os manômetros (27) e (29), são utilizados para manter o sistema o mais estável possível, permitindo-se controlar individualmente cada compressor e também manter constante a pressão na saída do elemento filtrante. O "tubo de Pitot", ligado ao manômetro de coluna (31), fornece ao "controlador de vazão" as informações necessárias, para se obter um escoamento com vazão praticamente constante, entorno de um valor previamente estabelecido.

4.2.4 - AFERIÇÃO DOS INSTRUMENTOS DE MEDIDAS

Observando-se a figura 4.6, constata-se que, dos instrumentos de medidas utilizado no equipamento, somente o anel dinamométrico (8) necessita de uma calibração, uma vez que, os outros instrumentos como: - pontes amplificadoras, registrador X - Y e captadores de deslocamento, dispensam tal procedimento, a não ser um ajuste de impedâncias, necessário ao seus acoplamentos. Assim, a primeira etapa da aferição basicamente se prendeu na instalação dos instrumentos, suas ligações e ajustagens das impedâncias.

A segunda etapa, a mais importante, deteve-se na seleção das escalas de trabalho, verificação da linearidade da relação "altura real do colchão / deslocamento na direção X, indicado pelo registrador" e o estabelecimento da relação "força de sustentação / deslocamento na direção Y, indicado pelo registrador". Devido a importância de cada uma das operações desta etapa e objetivando fornecer detalhes do procedimento utilizado, desenvolver-se-á cada uma delas isoladamente.

4.2.4.1 - VERIFICAÇÃO DA LINEARIDADE DA RELAÇÃO: ALTURA DO COLCHÃO / DESLOCAMENTO DA PENA DO REGISTRADOR NA DIREÇÃO X.

Para esta verificação, o único equipamento auxiliar utilizado foi um relógio comparador, que fixado a um elemento estrutural estático e posto em contacto com a superfície de apoio (base de deslocamento), registrava a altura do colchão com precisão de centésimo de milímetro (figura 4.13). Desse modo, com todo o sistema funcionando, variava-se a altura do colchão, de uma distância conhecida (leitura no relógio) e verificava-se seu valor correspondente no registrador. Esta verificação serviu somente para confirmar os ajustes dos equipamentos, realizados na primeira etapa da aferição.

4.2.4.2 - AFERIÇÃO DO ANEL DINAMOMÉTRICO

Tendo-se fixado as escalas de trabalho, para os instrumentos de medidas, bem como, verificado a linearidade da altura do colchão com o correspondente deslocamento da pe

na do registrador, na direção X , restou a determinação da relação existente entre a força de sustentação, proveniente do colchão de ar e o respectivo deslocamento da pena do registrador na direção Y .

Nesta aferição, levantou-se duas curvas de calibração: - uma para forças menores que 1 Kg^* e outra, para forças até 5 Kg^* . Montando o sistema conforme a figura 4.20, e após ter "zerado" todo o sistema de medidas, com a superfície de apoio tocando levemente o prato da balança ($\pm 0.1 \text{ grama}^*$), iniciou-se o levantamento de dados para as curvas de aferições. As tabelas e figuras que se seguem, vem demonstrar o levantamento realizado, bem como, o tratamento estatístico que receberam, para fornecer a curva de calibração do anel.

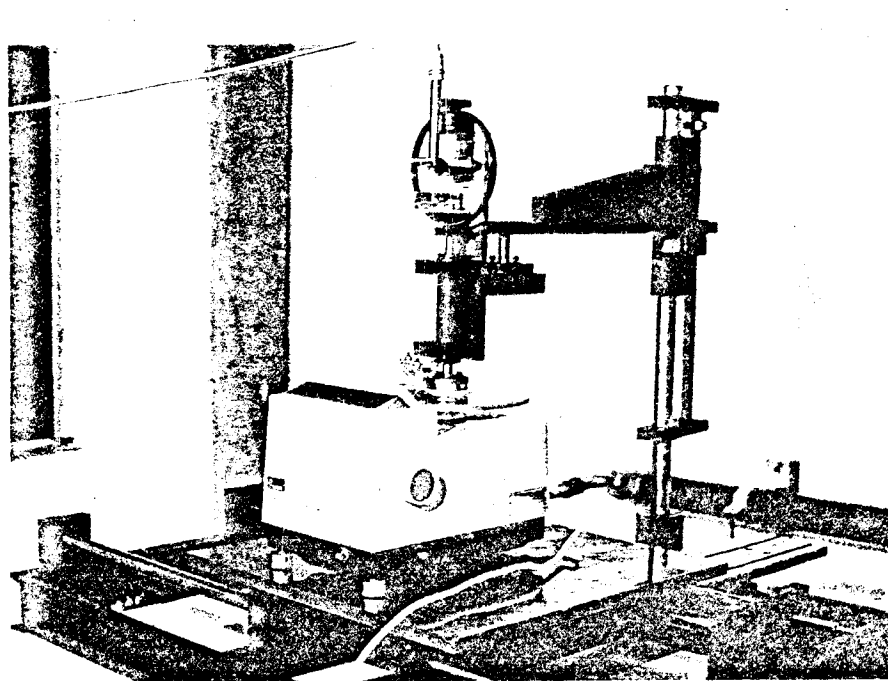


Figura 4.20 - AFERIÇÃO DO ANEL DINAMOMÉTRICO

TABELA - 4.2 - VALORES EXPERIMENTAIS OBTIDOS NA AFERIÇÃO DO ANEL DINAMOMÉTRICO (Força max. = 5 Kg*)

F (Kg*)	DESLOCAMENTO DA PENA DO REGISTRADOR - DIREÇÃO X "h" (mm)			
0,5	22,5	27,5	22,5	25,0
1,0	52,5	55,0	52,5	52,5
1,5	80,0	85,0	80,0	82,5
2,0	120,5	122,5	105,0	110,0
2,5	140,0	140,0	135,0	140,0
3,0	165,0	172,5	162,5	167,5
3,5	195,0	200,0	192,5	197,5
4,0	225,0	230,0	220,0	222,5
4,5	252,5	255,0	250,0	255,0
5,0	285,0	285,0	280,0	280,0
OBSERVAÇÕES: 1) F = Força de sustentação 2) Escala da Ponte Amplificadora - 200 μ m 3) Escala do Registrador 0,1 Volt/cm 4) Balança de Aferição - Mecânica - Tipo: Comercial				
ANÁLISE DE REGRESSÃO				
1) Regressão Linear				
$F = 0,0176.h + 0,1080$				
2) Coeficiente de Correlação - $r^2 = 0,994$				

TABELA - 4.1 - VALORES EXPERIMENTAIS OBTIDOS NA AFERIÇÃO
DO ANEL DINAMOMÉTRICO (Força max. =1 Kg*)

F (Kg*)	d (mm)	F (Kg*)	d (mm)	F (Kg*)	d (mm)
0,0514	1,0	0,0660	1,0	0,1080	6,0
0,1014	4,0	0,1042	3,0	0,1616	9,0
0,1785	8,0	0,1490	7,0	0,2126	11,0
0,2270	10,0	0,2186	11,0	0,2643	13,0
0,2991	14,0	0,2914	14,0	0,3280	17,0
0,3650	17,0	0,3735	19,0	0,3694	18,0
0,4099	21,0	0,4400	22,0	0,4088	22,0
0,4863	25,0	0,4878	26,0	0,4612	24,0
0,5369	27,0	0,5520	30,0	0,5272	28,0
0,6055	32,0	0,6324	33,0	0,5881	32,0
0,6633	35,0	0,7160	39,0	0,6509	34,0
0,7185	39,0	0,7931	44,0	0,7089	39,0
0,8335	44,0	0,8719	47,0	0,7732	42,0
0,9223	50,0	0,9637	54,0	0,8516	46,0

OBSERVAÇÕES: 1) F = Força de sustentação
2) d = Deslocamento na direção Y
3) Escala da Ponte Amplificadora - 200 μ m
4) Escala do Registrador.....0,1 Volt/cm
5) Balança de Aferição - Digital - Tipo:
Laboratório

ANÁLISE DE REGRESSÃO

1) Regressão Linear

$$F = 0,01763.d + 0,03627$$

2) Coeficiente de Correlação: $r^2 = 0,997$

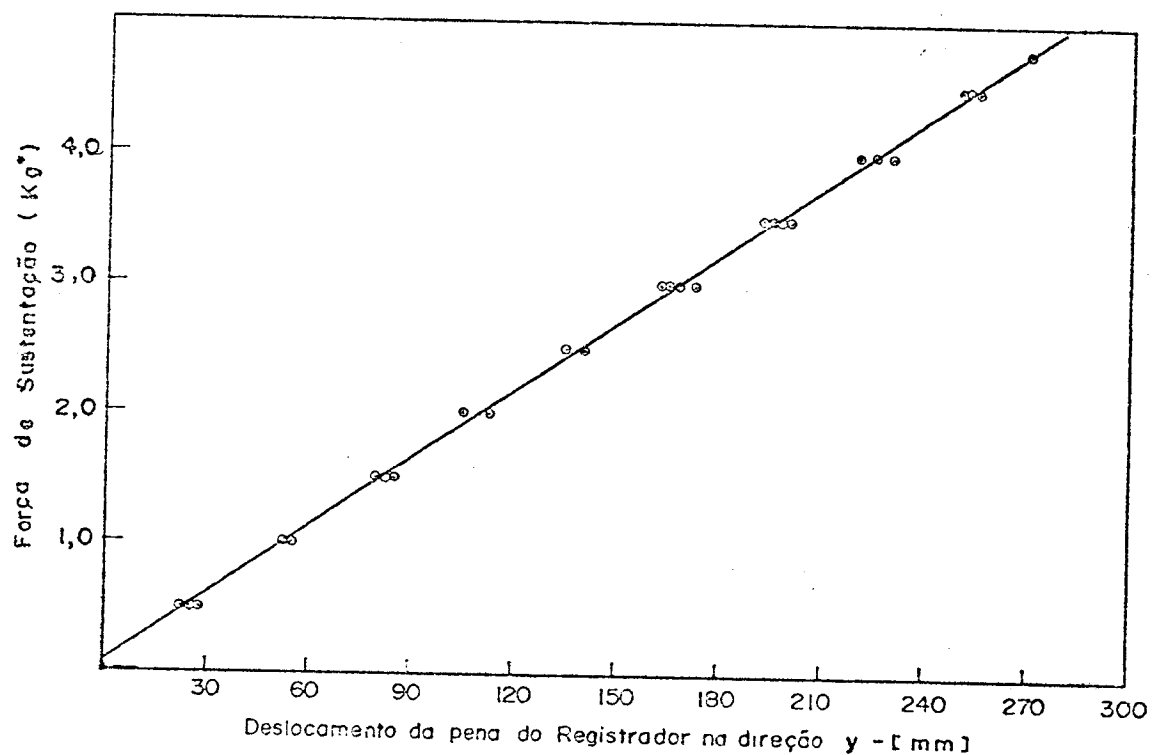


Figura 4.21 - CURVA DE AFERIÇÃO DO ANEL DINAMOMÉTRICO
F max. = 5 Kg*

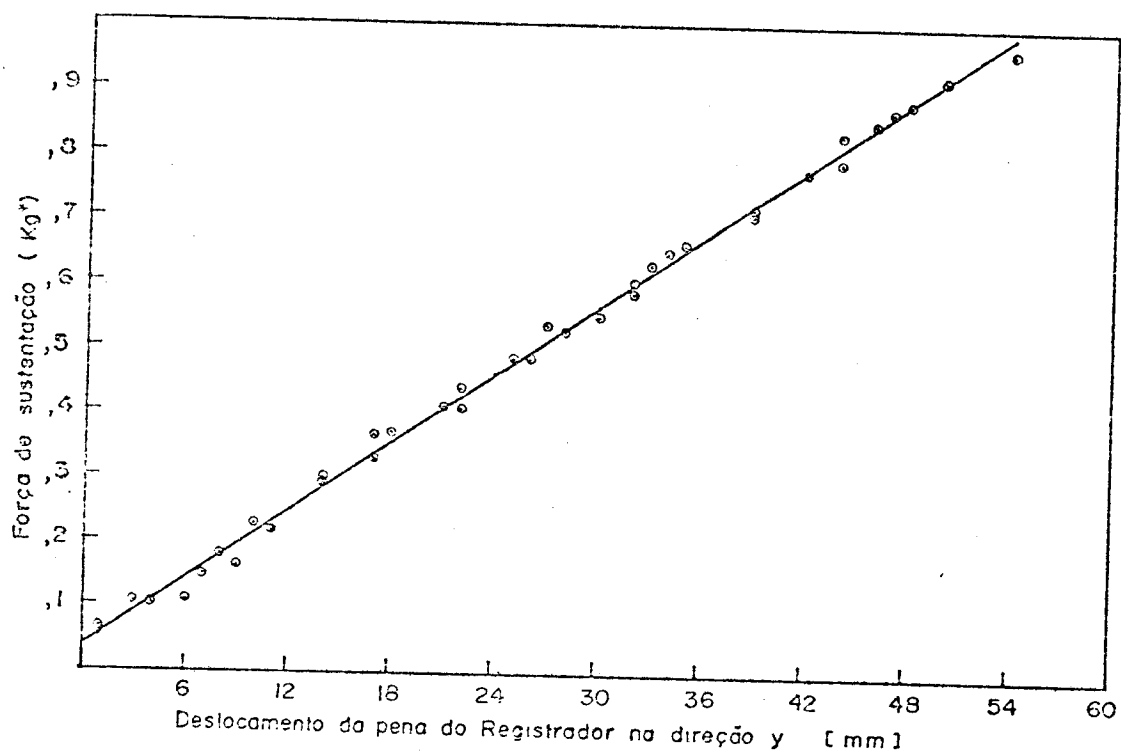
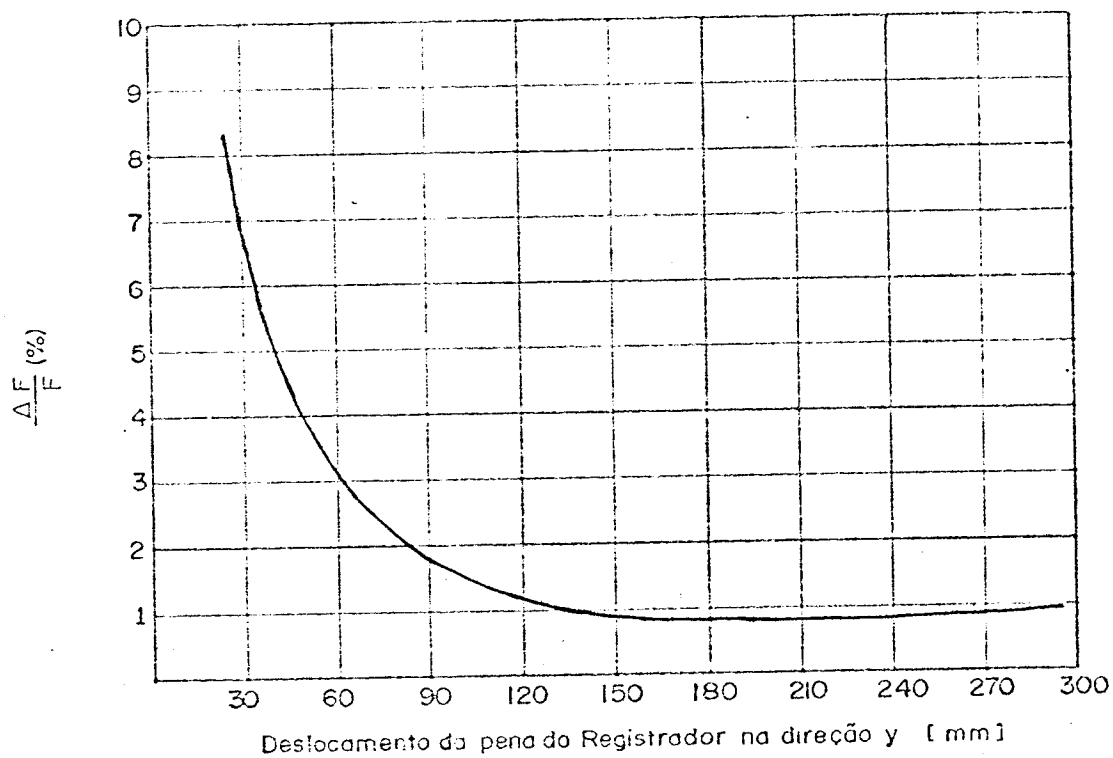


Figura 4.22 - CURVA DE AFERIÇÃO DO ANEL DINAMOMÉTRICO

(a)



(b)

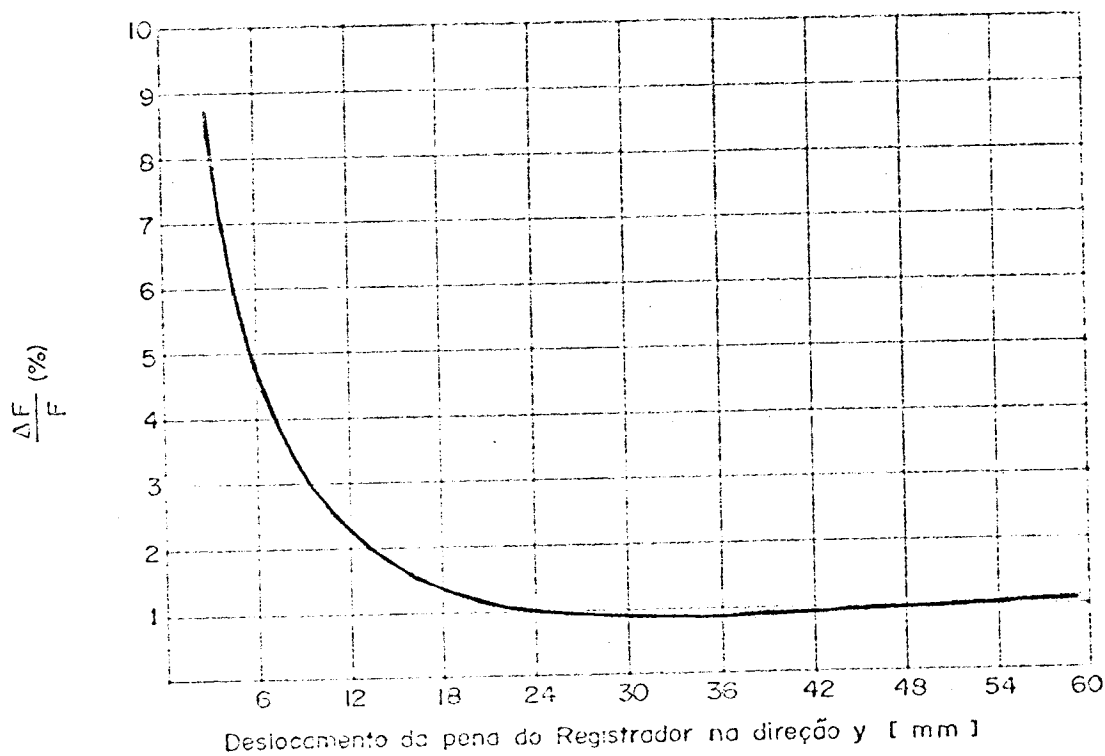


Figura 4.23 - VARIAÇÃO DO ERRO RELATIVO DO ANEL DINAMOMÉTRICO EM FUNÇÃO DO DESLOCAMENTO DA PENA DO

— — — — — (a) — — — — — (b)

4.2.5 - CURVAS EXPERIMENTAIS

E

CURVAS DA SIMULAÇÃO DO MODELO

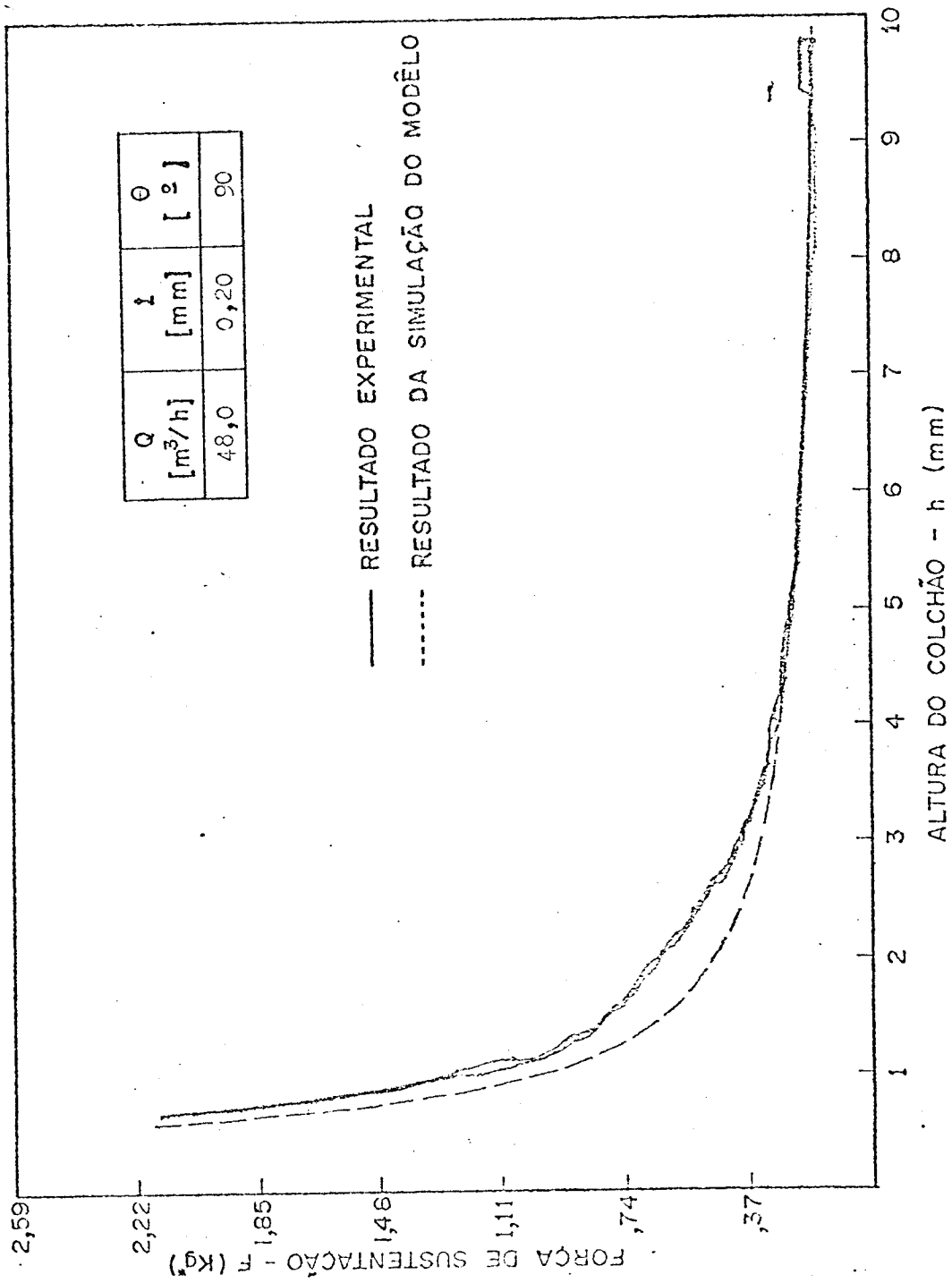


Figura 4.24

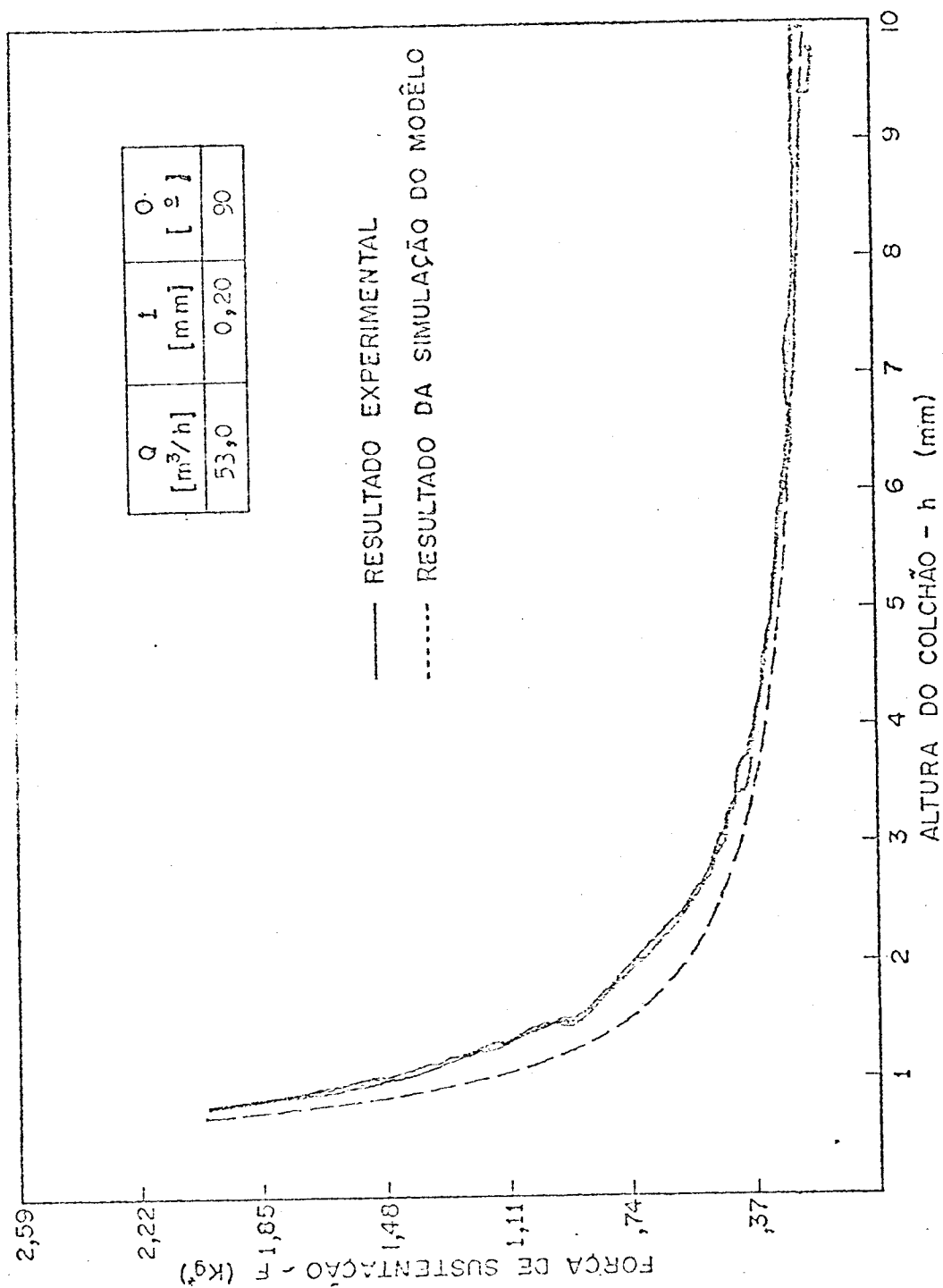


Figura 4.25

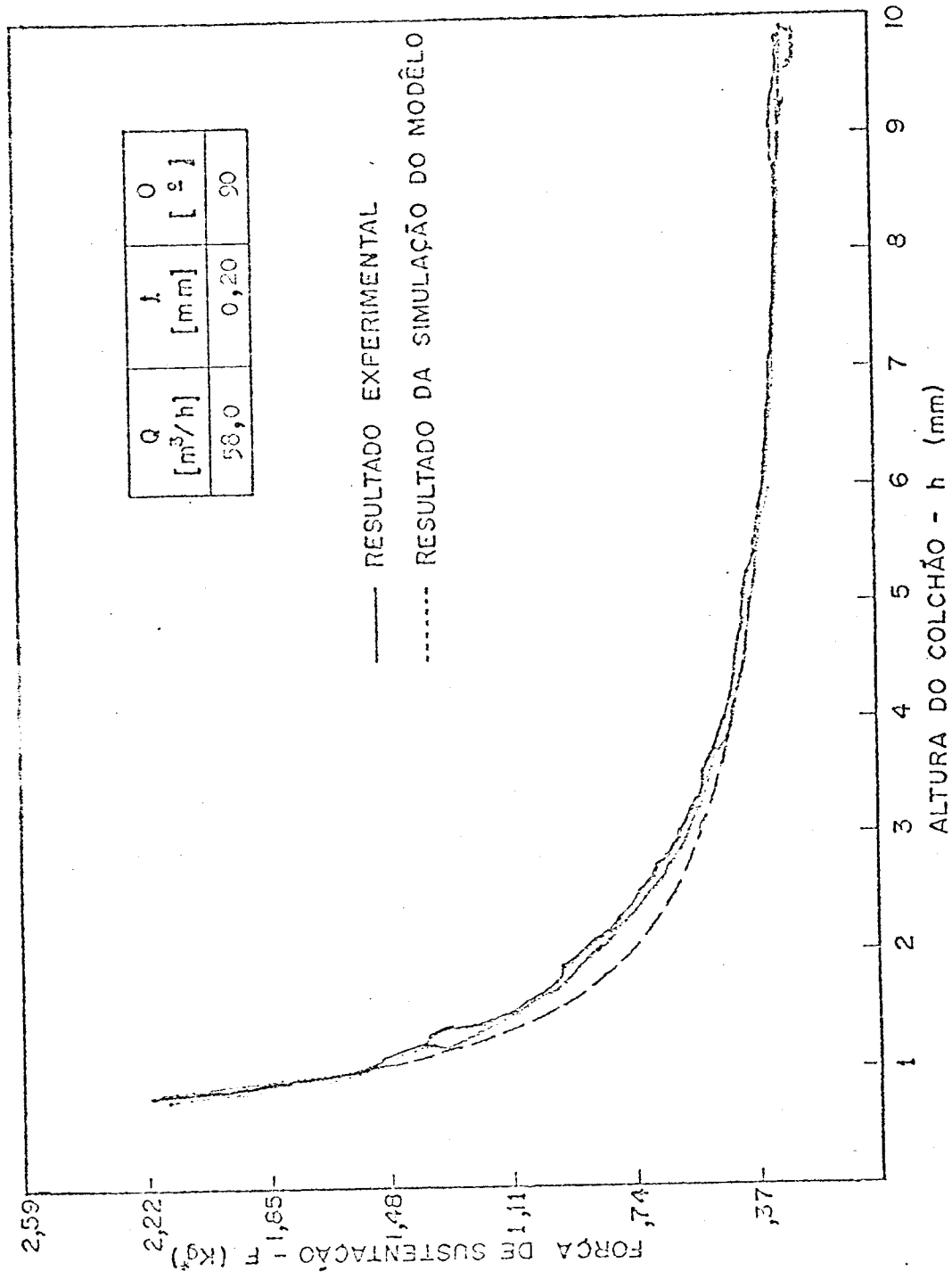


Figura 4.26

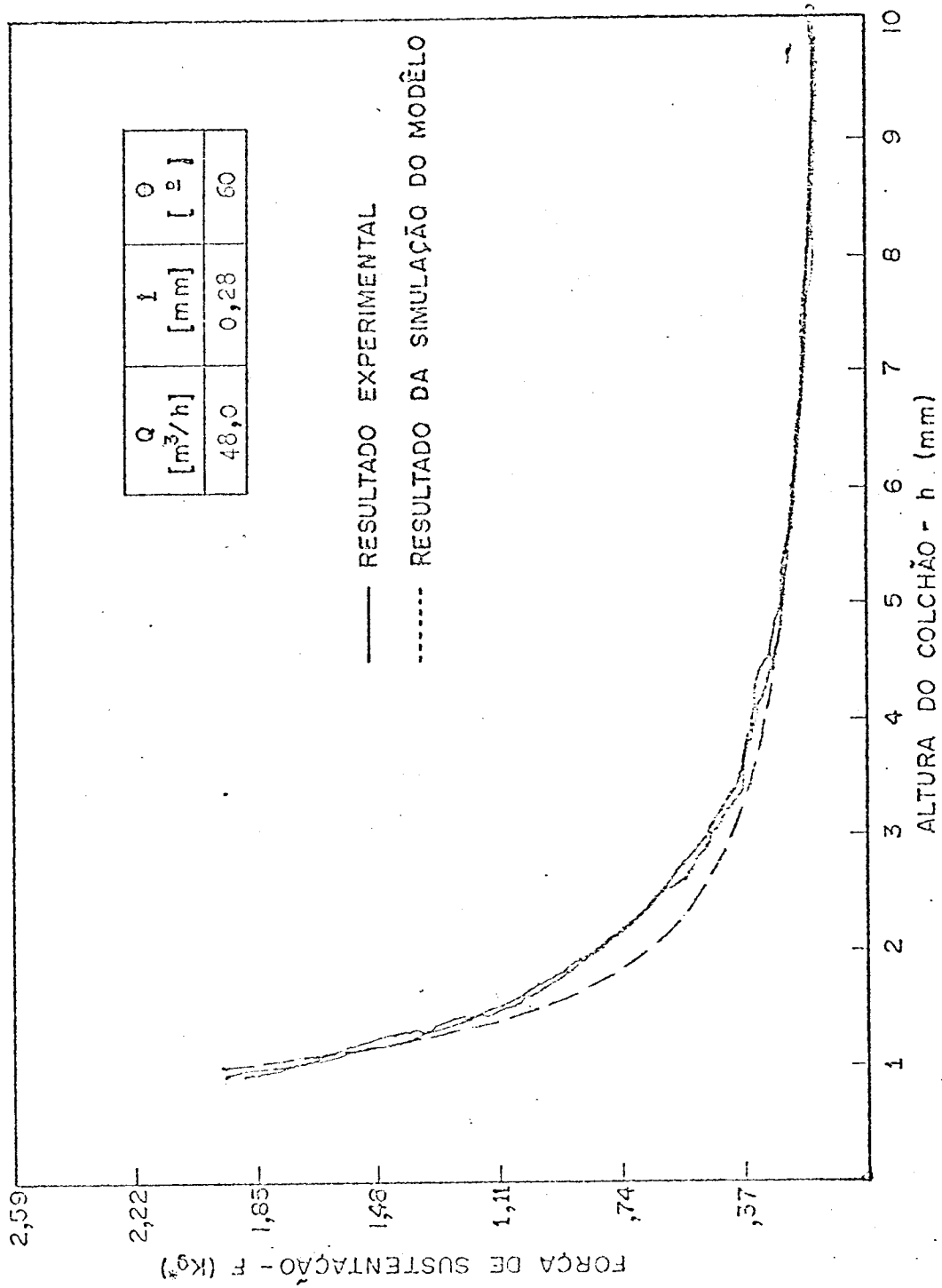


Figura 4.27

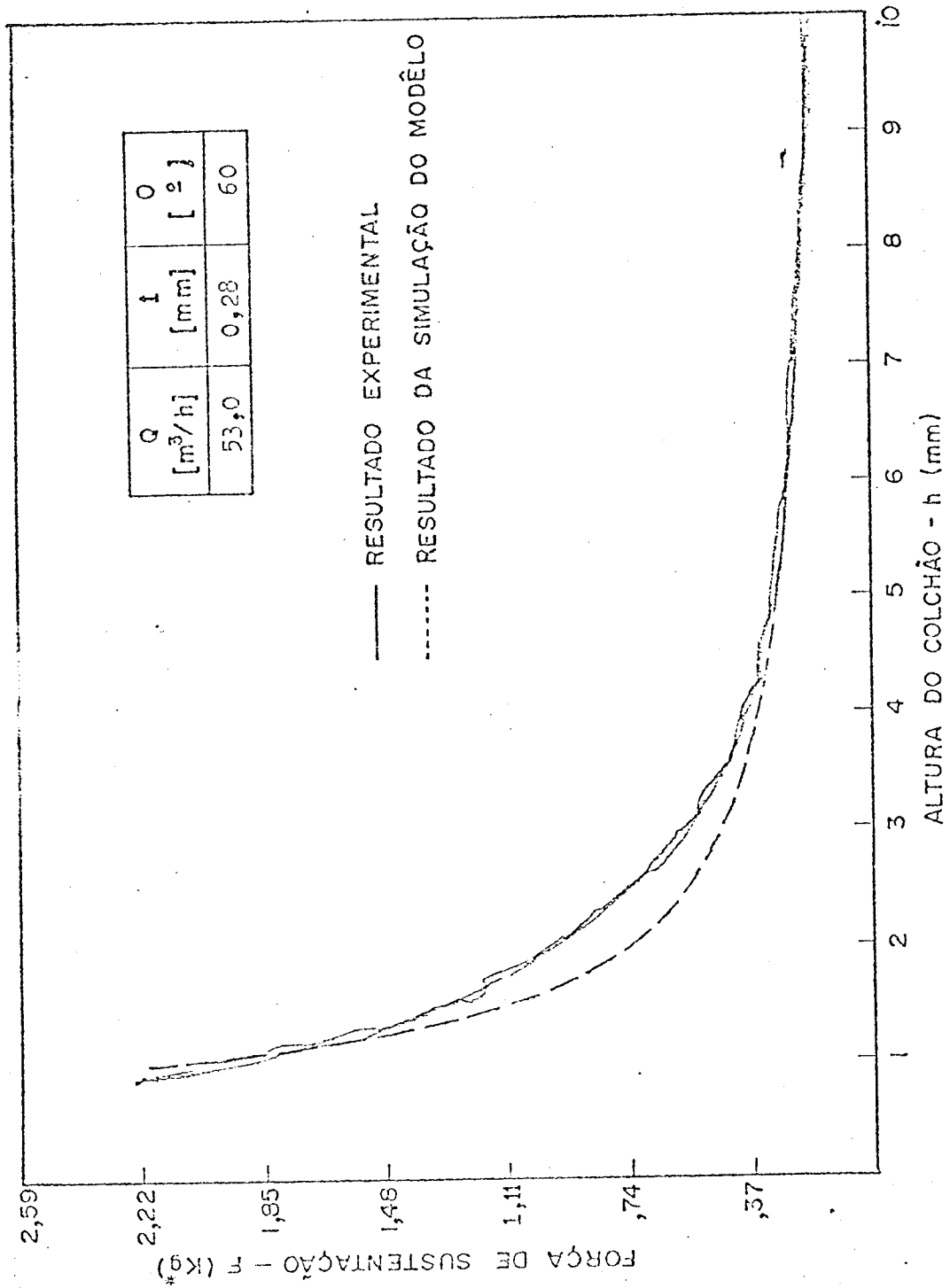


Figura 4.28

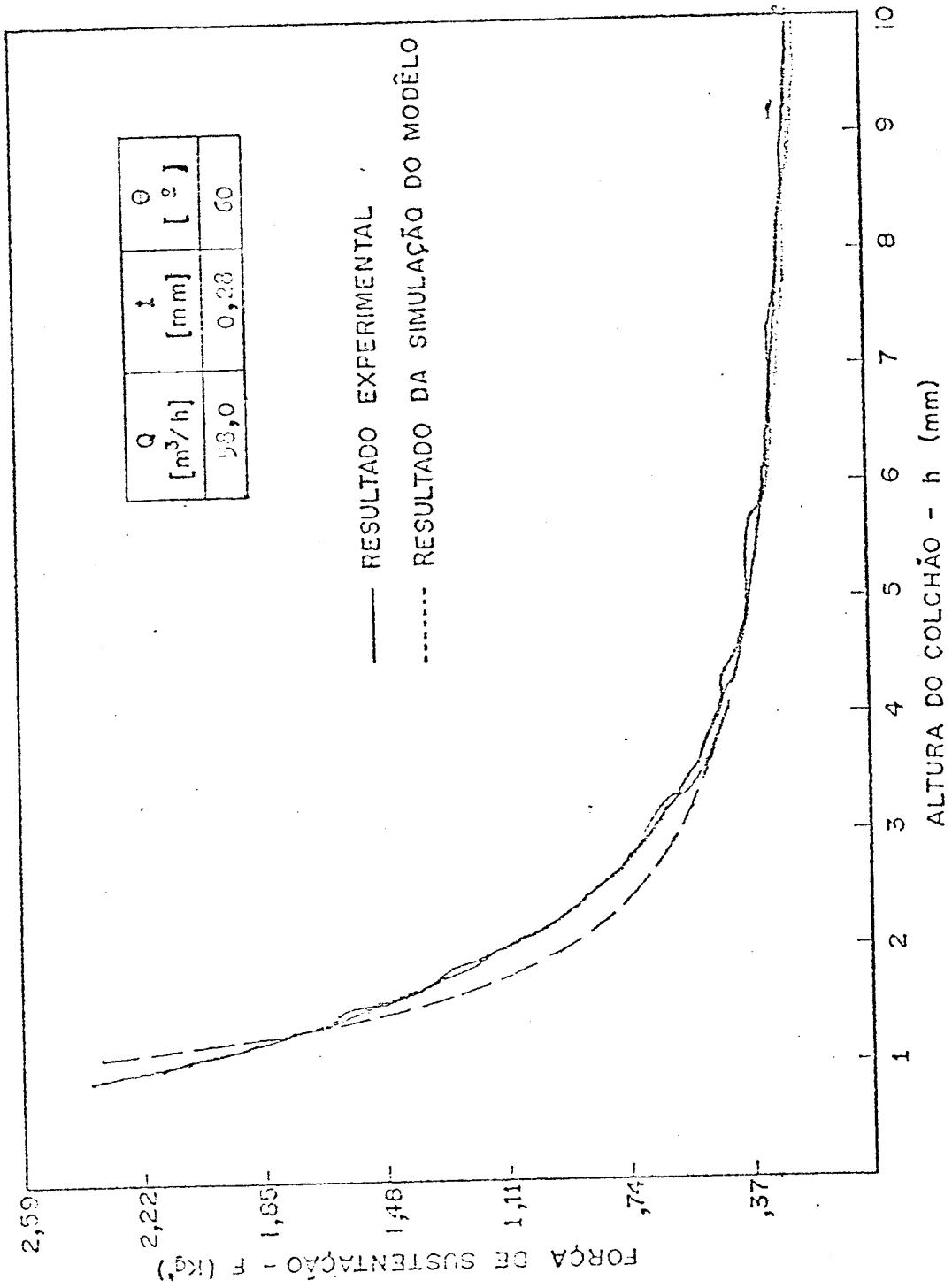


Figura 4.29

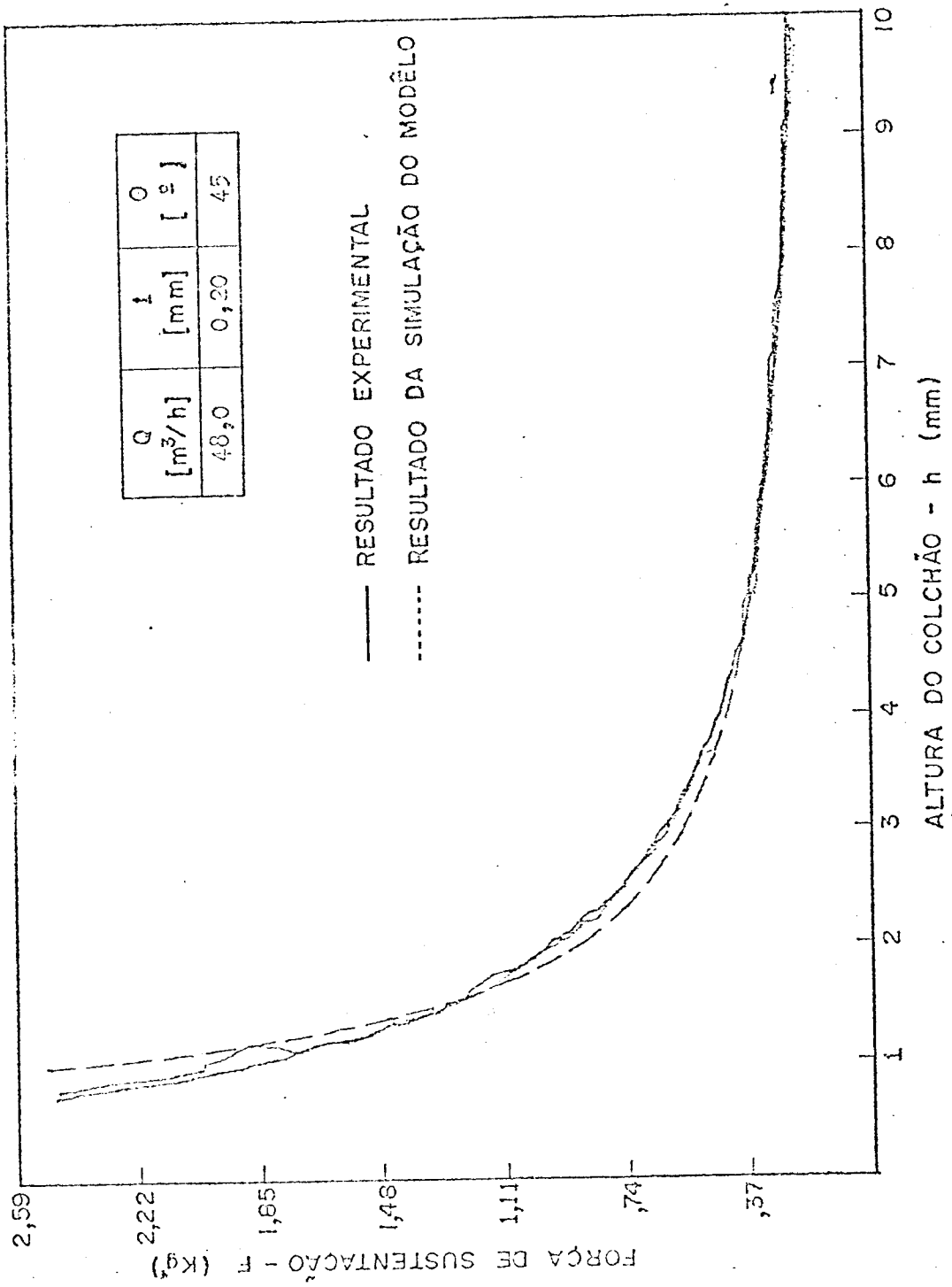


Figura 4.30

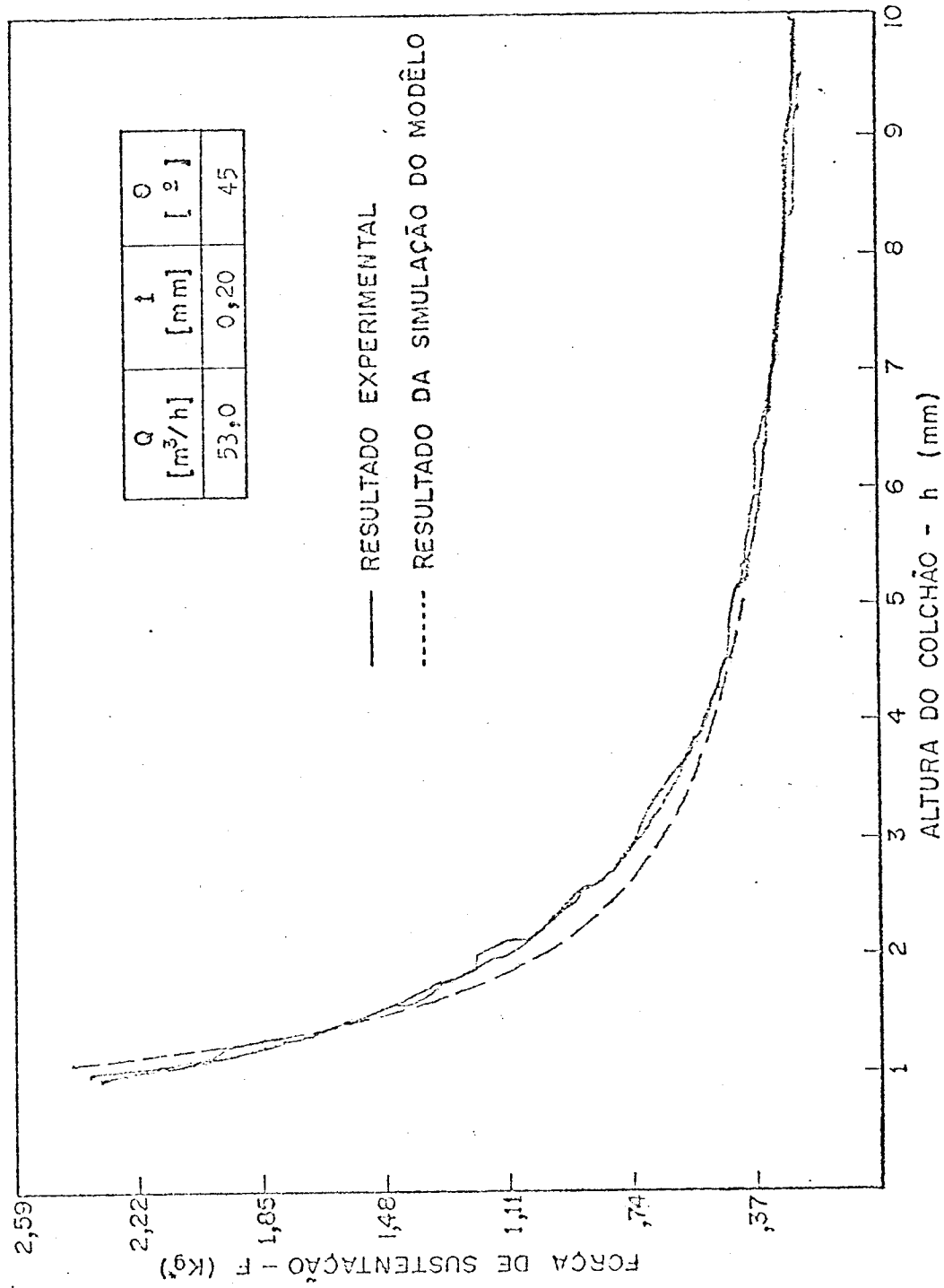


Figura 4.31

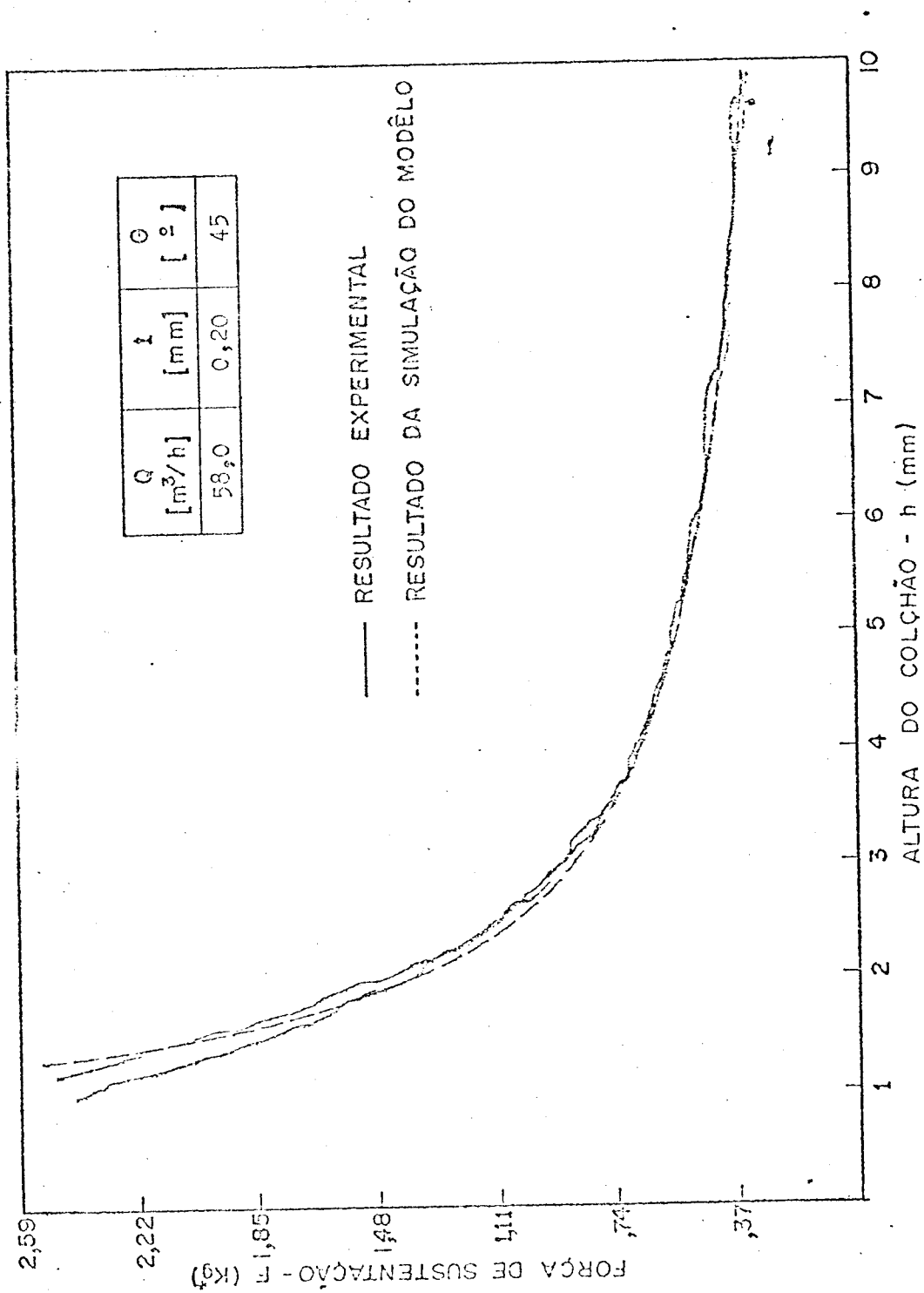


Figura 4.32

5 - CONCLUSÕES E SUGESTÕES DE NOVAS PESQUISAS

Considerando-se os resultados das análises realizadas nos itens anteriores, constata-se que o objetivo deste trabalho "Desenvolver um Modelo Matemático Simples, para Cálculo de Sustentação de um Colchão de Ar", foi integralmente alcançado. Além de se ter conseguido um equacionamento matemático de fácil aplicabilidade, constata-se também, observando-se os resultados contidos nas figuras 4.24 à 4.32, uma notável aproximação dos resultados da teoria com os valores experimentais; podendo-se admitir uma concordância total entre eles, para valores de "h" maior que 150% da espessura do jato.

Um outro resultado importante, relaciona-se com as hipóteses simplificadoras. Embora, tenham sido adotadas, para permitir a análise matemática do modelo, sem se prenderem ao comportamento real do sistema, conclui-se que não fugiram à realidade, sem o que, não se teria obtido os resultados apresentados.

No desenvolvimento do trabalho experimental, observou-se o seguinte:

(i) - A dimensão da superfície de apoio, desde que tenha um diâmetro $D \geq R + r \sin \theta$, não influencia na força de sustentação;

(ii) - A parede externa à saída do bocal, deve ser tão fina quanto possível, para se evitar o efeito de "sucção" entre a superfície de apoio e o bocal;

(iii) - A falta de paralelismo entre a superfície de apoio e o bocal, acarreta significativos decréscimos na força de sustentação.

Visando uma continuidade deste trabalho, apresenta-se em seguida, algumas sugestões para novas pesquisas:

(i) - Levantamento de curvas experimentais relacionando a força de sustentação com a altura do colchão, fazendo-se com que, um dos elementos, bocal ou superfície de apoio, se movimente horizontalmente em relação ao outro.

(ii) - Desenvolver um dinamômetro para medir a resistência ao movimento entre os dois elementos (bocal e superfície de apoio), registrando exclusivamente a presença do colchão de ar.

(iii) - Estudar a influência da espessura do jato, na sustentação.

(iv) - Estudar a influência do ângulo de inclinação do jato, na sustentação.

(v) - Construção de um novo bocal com jatos circulantes e verificar suas influências na força de sustentação.

(vi) - Realizar novas comprovações do modelo deste trabalho, utilizando-se bocais de diferentes configurações.

(vii) - Analisar a distribuição da pressão no interior do colchão de ar.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] BOEHLER, G. D. "The Airborne Ground Vehicle". A New Device for Improving Tactical Mobility of Ground Based Military Units, Proposal Submitted to the Army Ordnance Research Office, January, 8, 1957.

- [2] CHAPLIN, H. R. "Theory of the Annular Nozzle in Proximity to the Ground", Aerodynamics Laboratory, David Taylor Model Basin, Navy Department, Aero Report 923, July, 1957.

- [3] PINNES, R. W. "A Power Plant Man's Look at the Ground Effect Machine", Bureau of Aeronautics, Navy Department, Research Division Report Nº DR - 1958, April, 1959.

- [4] RETHORST, S. & ROYCE, W. W. "Lifting Systems for VTOL Vehicles", Paper presented at the National Summer Meeting, Institute of the Aeronautical Sciences, June 16 - 19, 1959.

- [5] STRAND, T. "Inviscid - Incompressible - Flow Theory of Static Peripheral Jets in Proximity to the Ground, Convair, A Division of General Dynamics Corporation, Journal of the Aerospace Sciences, vol. 28, 1961, p. 27 - 33.

- [6] COHEN, M. J. "Peripheral Jets in Proximity of the Ground", Department of Aeronautics And Space Technology, Northampton College of Advanced Technology, Journal of Applied Mechanics, Trans. A S M E, December 1966, p. 721 - 727.

- [7] COHEN, M. J. "Analysis of Lift - Augmentation of Vertical Solid Jets in Proximity of the Ground", Journal of Applied Mechanics, vol. 32, Trans. A S M E, vol. 87, Series E, 1965, p. 533 - 548.

- [8] WILLIAMS, G. H. "Homebuilt Hovercraft", Air Cushion Vehicles, Flight International supplement, 1965 - 1967 (total de 17 artigos).

- [9] ELSLEY & DEVEREUX "Hovercraft Design and Construction", David & Charles, London, 1967.

- [10] BECHER, H., ROEDEL, J.P. & HICKS, T. G. "Air Cushion Vehicle Proportions and Power Requirements" Aeronautical and Astronautical Engineering, Standard Handbook of Engineering Calculations, London, 1969.

- [11] McCORMICK, BARNES W. Jr. "Aerodynamics of V / S T O L Flight", Academic Press, New York, 1967.

- [12] HOUGHTON & BROCK "Aerodynamics for Engineering Students", Edward Arnold (Publishers) Ltd , London 1969.

- [13] SHAMES, I. H. "Mecânica dos Fluidos", Edgar Blücher, São Paulo, 1973.

- [14] SPIEGEL, M. R. "Estatística", McGRAW - HILL do Brasil, São Paulo, 1972.

- [15] BARANENKOV, G.; DEMIDOVICH, B. & OUTROS " Problemas y Ejercícios de Analisis Matematico", Editorial Mir, Moscú, 1967.