

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS
DIVISÃO DE ENGENHARIA NAVAL

SÉRIE SISTEMÁTICA DE LEMES-PROJETO DE LEMES E DETERMINAÇÃO
DE ESFORÇOS

JOSÉ ANTONIO CRISTOVÃO BALAU

49 CONGRESSO PANAMERICANO DE ENGENHARIA NAVAL, ENGENHARIA
PORTUÁRIA E TRANSPORTES MARÍTIMOS - LIMA

1 9 7 5

RESUMO

Este trabalho é o resultado de uma grande série de ensaios com modelos de lemes, realizados no Túnel de Circulação de água e no Tanque de Provas do IPT. O objetivo final do trabalho, é auxiliar o Engenheiro Naval a selecionar de forma racional o leme mais adequado para uma determinada embarcação, determinar os esforços no leme e dimensionar a madre do leme.

Os resultados dos ensaios são apresentados sob forma de gráficos e de expressões matemáticas que traduzem os gráficos e permitem uma sistematização no dimensionamento de lemes.

ABSTRACT

The work presents the results of a extensive set of tests with a family of rudders in the IPT Water Tunnel and Towing Tank.

The ultimate goal of the work is helping the Naval Architect using a rational methodology, in the selection of the more rational rudder for a specific ship. The process includes the evaluation of forces and moments acting on a rudder, and the design of the rudder stock. The samples are plotted in form of graphs and algebraic expressions that permit a easy rudder design methodology.

* Trabalho patrocinado pelo Convênio GEIPOT - SUNAMAM - IPT

I N D I C E

	Pag.
1.1. INTRODUÇÃO.....	3
2.2. CONCEITOS FÍSICOS.....	5
3.3. PARÂMETROS GEOMÉTRICOS E COEFICIENTES HIDRODINÂMI- COS DO LEME.....	7
4.4. SÉRIE DE LEMES ENSAIADOS.....	8
5.5. RESULTADOS OBTIDOS PARA LEME OPERANDO EM ESCOAMEN- TO UNIFORME.....	9
6.6. RESULTADOS OBTIDOS PARA LEME OPERANDO NO JATO DO HÉLICE.....	12
7.7. LEME SEMI-MÓVEL TIPO "HORN".....	16
8.8. DISPOSITIVOS ESPECIAIS PARA AUMENTAR A SUSTENTA- ÇÃO NO LEME.....	16
8.1. Leme com "End-Plates".....	17
8.2. Leme com "Flap" de movimento condicionado...	17
9.9. CRITÉRIO PARA DETERMINAÇÃO DA ÁREA DO LEME DE UMA EMBARCAÇÃO.....	20
10.10. CONSIDERAÇÕES SOBRE O CÁLCULO DO DIÂMETRO DA MA- DRE DO LEME.....	21
BIBLIOGRAFIA.....	25
SIMBOLOGIA.....	23.1

APÊNDICES

APÊNDICE I - Gráficos de 1 a 17 e Tabela 1.....	24
APÊNDICE II - Fotos dos modelos e ensaios realizados....	37

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS

1. - INTRODUÇÃO

Este trabalho foi desenvolvido com o intuito de auxiliar o Engenheiro Naval a selecionar racionalmente o leme mais adequado para uma determinada embarcação, determinar os esforços no leme e dimensionar a madre do leme.

Para tanto foram realizadas provas experimentais com uma série de lemes que abrangem toda a faixa usualmente utilizada em embarcações.

Os modelos de lemes foram testados no Túnel de Circulação de água e no Tanque de Provas do IPT, com os modelos de Leme em escoamento uniforme e principalmente com os modelos de leme operando no jato do hélice. Para esta última condição de operação, poucas informações são conhecidas, uma vez que a maioria das informações divulgadas sobre superfícies de sustentação (asas, lemes, etc.) são obtidas em túneis de vento pela indústria aeronáutica, para asas de alta razão de aspecto, e em escoamento uniforme, enquanto que o leme de uma embarcação é uma asa de baixa razão de aspecto e atua em escoamento não uniforme (jato do hélice).

Para maior facilidade de uso das informações por parte do projetista, são fornecidas expressões matemáticas que traduzem o comportamento de um determinado parâmetro para toda a série de lemes ensaiados.

As expressões matemáticas apresentadas procuram suprir deficiências de expressões como a de Joessel, reconhecidamente superada.

Este trabalho traduz as observações experimentais e está voltado inteiramente para a aplicação prática.

Todos os ensaios foram realizados para um número de Reynolds da ordem de $0,6 \times 10^6$.

Não foram feitas correções em C_s devido a diferença entre o número de Reynolds de leme protótipo e do modelo ensaiado. De acordo com referência (10) é pequeno o aumento de C_s máximo para número de Reynolds maior que $0,5 \times 10^6$; contraposição a rugosidade da superfície do leme protótipo é maior que a do modelo, o que acarreta uma diminuição de C_s máximo.

Devido a dificuldade em se avaliar estes efeitos no protótipo, foi admitido que os dois efeitos aproximadamente se compensam.

2. - CONCEITOS FÍSICOS

A Fig. 1 mostra o que ocorre num leme (uma superfície de sustentação de uma maneira geral).

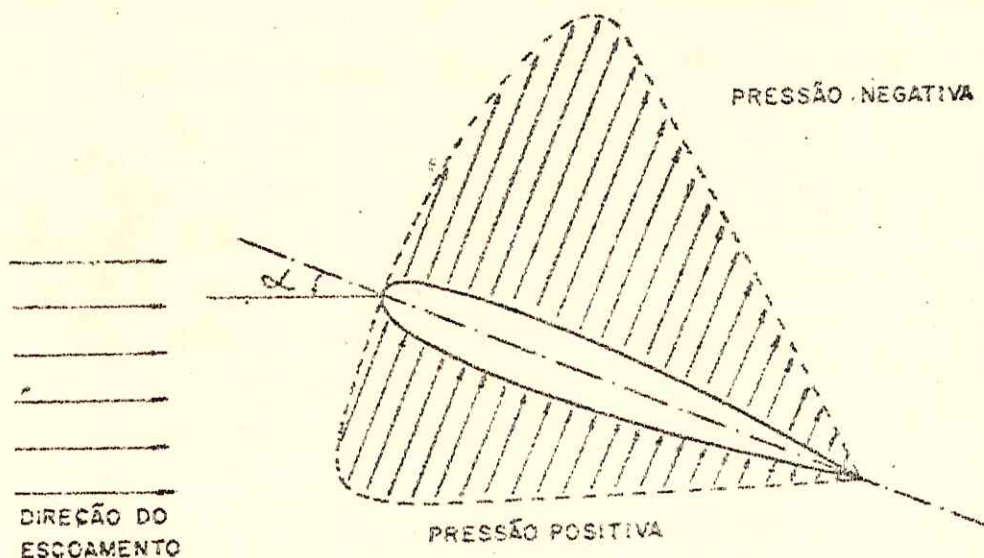


FIG 1

Quando o leme é posicionado com um ângulo de ataque α tem-se uma distribuição de pressões na superfície como a indicada na Fig. 1.

A presença desse campo de pressões e forças de atrito na superfície do leme dá origem ao aparecimento da força resultante (F_R) no leme.

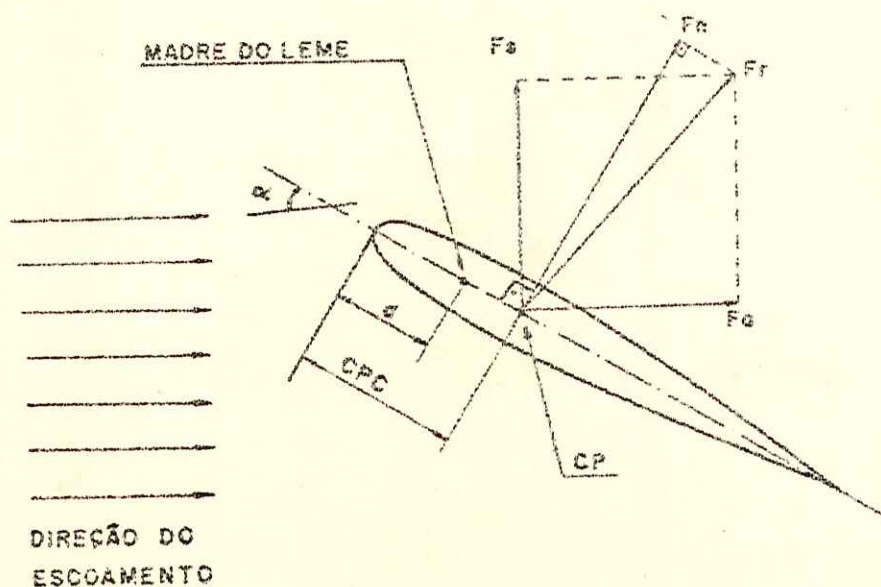


FIG- 2

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS

Projetando a força F_R na direção normal ao escoamento tem-se a força de sustentação F_S , que é a componente da força resultante e que atua diretamente sobre o controle direcional da embarcação. A componente da força resultante na direção do escoamento, é a força de arrasto F_A ; a componente da força resultante na direção normal à superfície do leme é a força normal (F_n).

De uma maneira geral à medida que o ângulo de ataque do leme aumenta, a força de sustentação também aumenta, até atingir-se o ângulo de "stall" onde um aumento no ângulo do leme, provoca uma diminuição de força de sustentação. Para um ângulo de ataque maior que o ângulo de "stall" o campo de pressões mostrados na Fig. 1 assume o aspecto mostrado na Fig. 3.

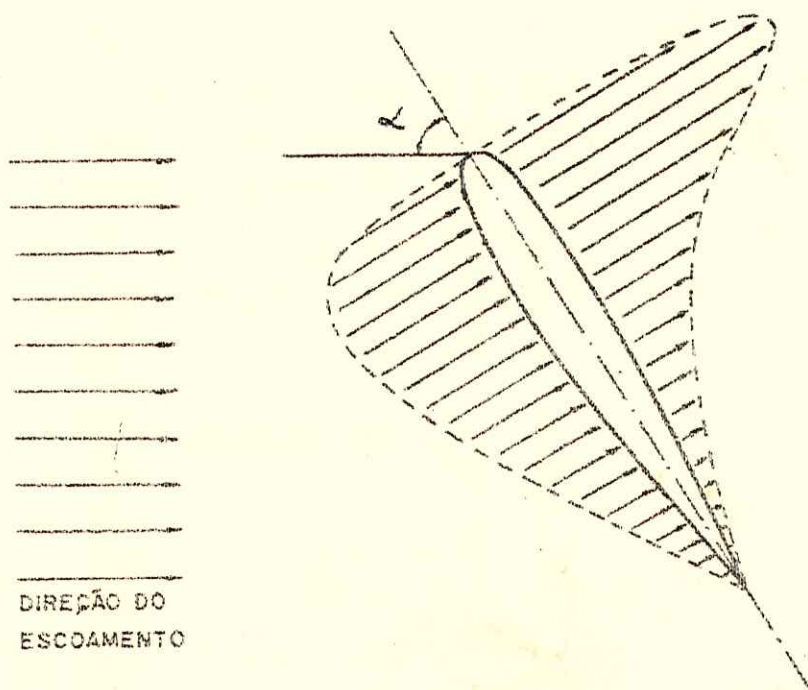


FIG 3

3. PARÂMETROS GEOMÉTRICOS E COEFICIENTES HIDRODINÂMICOS DO LEME

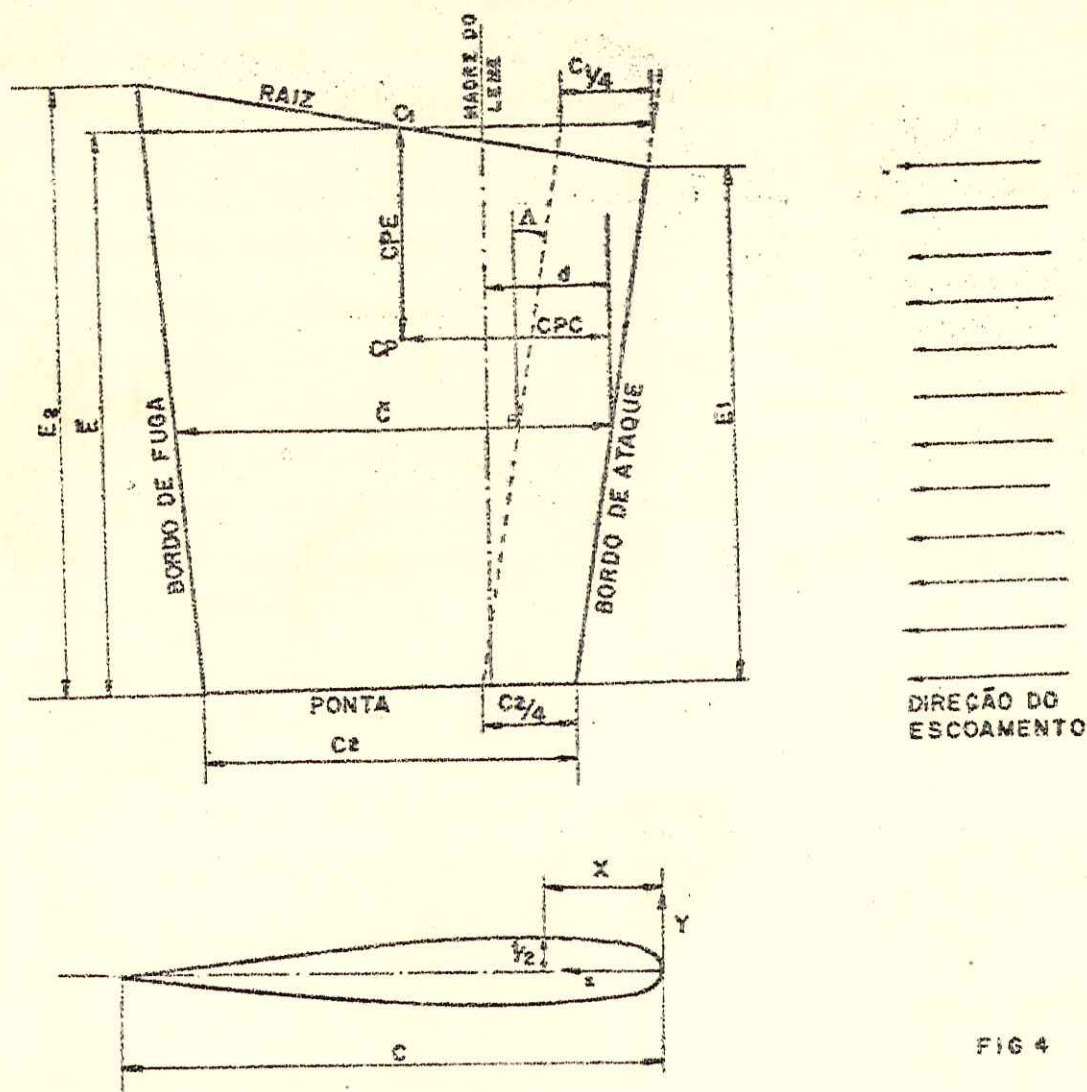


FIG 4

C_1 : Corda na raiz do leme (m)

C_2 : Corda na ponta do leme (m)

$\bar{C} = \frac{C_1 + C_2}{2}$: Corda média

E_1 : Envergadura no bordo de ataque (m)

E_2 : Envergadura no bordo de fuga (m)

$\bar{E} = \frac{E_1 + E_2}{2}$: Envergadura Média

CPC : Posição do centro de pressão ao longo da corda média em relação ao bordo de ataque (m)

CPE : Posição do centro de pressão ao longo da envergadura em relação a raiz do leme (m)

CP	: Posição do centro de pressão, ponto de aplicação da força resultante (m)
A	: Ângulo de caimento do leme (conforme Fig. 4)
CPC/C	: Coeficiente do centro de pressão ao longo da corda
CPE/E	: Coeficiente do centro de pressão ao longo da envergadura
$S = \bar{C} \cdot \bar{E}$	: Área do leme (m^2)
$RA = \frac{\bar{E}}{\bar{C}}$	: Razão de aspecto
d	: Distância entre o eixo da madre do leme e o bordo de ataque na corda média (M)
t/c	: Razão entre máximo valor da espessura do perfil e corda do perfil
X/c	: Razão entre a posição em relação ao bordo de ataque do ponto de máxima espessura do perfil e corda do perfil
RE	$= C_2 / C_1$: Razão de estreitamento
x	: Cota de um ponto do perfil ao longo da corda
y	: Espessura do perfil para uma determinada cota

Obs.: $t/2$ é igual ao máximo valor de y.

4. SÉRIE DE LEMES ENSAIADOS

Para geração dos lemes da série foi adotado um leme pa-drão, com os seguintes parâmetros geométricos:

$$\begin{aligned}RA &= 2.0 \\t/c &= 0.15 \\x/c &= 0.30 \\RE &= 0.70 \\A &= 0\end{aligned}$$

(PERFIL NACA)

A geração da série foi realizada com a variação dos parâmetros:

RA : 0.75, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0

t/c : 0.10, 0.15, 0.20, 0.25

RE : 0.50, 0.70, 0.80, 1.00

A : 0°, 5°, 10°

para cada parâmetro analisado foi mantida a igualdade dos demais parâmetros do leme padrão.

Na tabela 1 encontram-se todas as informações sobre a série.

Foi também analisado o efeito sobre o comportamento da folga entre o leme e o casco. Verificou-se ser praticamente desprezível a influência da folga no desempenho do leme. O mesmo foi observado pelo trabalho mencionado na referência (3), que afirma: "Em vista da grande perda de sustentação esperada por considerações teóricas, as perdas observadas são muito moderadas mesmo para os casos mais críticos (grandes folgas)".

Em vista de tais constatações experimentais, não levamos em conta o conceito de razão de aspecto efetiva, que afirma ser a razão de aspecto efetiva função da folga entre o leme e uma superfície; Para o leme com a raiz encostada em uma superfície plana a razão de aspecto efetiva seria o dobro da razão de aspecto geométrica.

Entretanto, na prática, tal efeito não se verifica.

5. RESULTADOS OBTIDOS PARA LEME EM ESCOAMENTO UNIFORME

Para lemes com seus parâmetros geométricos variando nos intervalos:

$$0.75 \leq RA \leq 3.0$$

$$0.10 \leq t/c \leq 0.25$$

$$0.50 \leq RE \leq 1.0$$

$$0^\circ \leq \Delta \leq 10^\circ$$

foram obtidos os seguintes resultados:

a) - Coefficiente de sustentação C_s

No gráfico 1, tem-se as curvas C_s com variação de α e RA.

Pela figura observa-se a grande influência da RA na inclinação da curva C_s na origem e no ângulo de "stall" (α_s)

O aumento de RA implica no aumento da inclinação da curva de C_s na origem e na diminuição do ângulo de "stall".

Além de RA, e dos parâmetros analisados, também tem influência no C_s , os valores de t/c e x/c .

A figura 2 mostra a variação de (C_s) máximo com a variação de t/c .

O gráfico 3 mostra a variação de (C_s) máximo com x/c . Verifica-se que quanto menor x/c (mais distante do valor médio da corda) maior é o valor de (C_s) máximo.

Nem t/c nem x/c tem influência sobre a inclinação da curva de C_s em função de α .

O ajuste de uma expressão matemática que expressa a família de curvas do gráfico 1, e que leva em consideração os efeitos de t/c e x/c forneceu:

para $\alpha \leq \alpha_s$ (α em graus):

$$C_s = (1.4 + RA) \cdot \frac{2 \cdot \alpha}{100} + (5.6 - 5.0 \cdot RA) \cdot \left(\frac{c}{100}\right)^2 \quad (1)$$

Obs.: Para se levar em conta a influência de t/c , a expressão (1) deve ser multiplicada por: $K = 0.56 + 3.8 (t/c) - 5.7x(t/c)^2$

sendo α_s dado por:

$$\alpha_s = (28,3 - 4,3 \cdot RA) \cdot (1,3 - X/c) \quad (2)$$

para $\alpha_s < \alpha < 40^\circ$ tem-se aproximadamente:

$$C_s = 0,65 \quad (3)$$

b) - Coeficiente de Arrasto (C_a)

No gráfico 4, tem-se a curva de C_a em função de α .

Verificou-se não existir nenhuma variação significativa no valor de C_a com a variação de RA e demais parâmetros.

A curva ajustada fornece para C_a a seguinte expressão:

$$C_a = 0,014 - 0,243 \left(\frac{\alpha}{100}\right) + 6,8 \cdot \left(\frac{\alpha}{100}\right)^2 - 8 \cdot \left(\frac{\alpha}{100}\right)^3 \quad (4)$$

para α em graus.

c) - Coeficientes de Centro de Pressão (CPE/E e CPC/C)

Nenhuma variação significativa foi observada em CPE/E e CPC/C devido a variação de RA; somente X/c influenciou significativamente no comportamento de CPC/C como pode ser observado no gráfico 5.1.

O comportamento de CPE/E e CPC/C pode ser traduzido pelas expressões:

$$CPE/E = 0,50 \quad (5)$$

e

$$(CPC/\bar{C}) = 0,23 \cdot \left(1 + 2 \cdot \frac{\alpha}{100}\right) \cdot (1,75 - 2,5 \cdot X/c) \quad (6)$$

pelas expressões acima (de (1) a (6)) observa-se que A não tem nenhuma influência significativa nos coeficientes hidrodinâmicos analisados.

6. - RESULTADOS OBTIDOS PARA LEME OPERANDO NO JATO DE HÉLICE

O comportamento do leme, quando operando no jato do hélice fica sensivelmente alterado. O escoamento neste caso é menos bidimensional que para leme em escoamento uniforme; o que altera os valores de C_s (muda a inclinação da curva), C_a e CPE. Para se determinar os coeficientes hidrodinâmicos do leme é necessário conhecer-se a velocidade do escoamento num ponto, a ré do hélice.

Para determinação desta velocidade usaremos a expressão, obtida por Gutsche, ref. (1). Para uso da expressão - deduzida definiremos os seguintes parâmetros:

- n : rotação do hélice (rps)
- D : diâmetro do hélice (m)
- V_e : velocidade de entrada do escoamento no hélice (m/s)
- V_n : velocidade do navio (m/s)
- V : velocidade do escoamento no bordo de ataque do leme (m/s)
- W : coeficiente de esteira do navio

$$W = 1 - \frac{V_e}{V_n}$$

- T : empuxo fornecido pelo hélice (kg*)
- K_T : coeficiente de empuxo do hélice

$$K_T = \frac{T}{\rho n^2 D^4}$$

- J : coeficiente de avanço do hélice

$$J = \frac{V_e}{n \cdot D}$$

Z : distância entre o disco do hélice e um ponto a
rê do hélice (m)

R : raio do hélice (m)

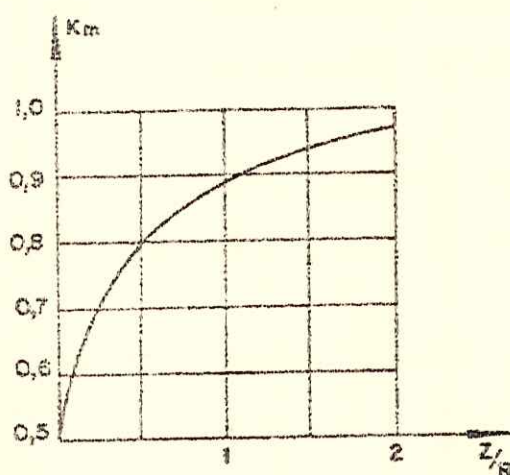
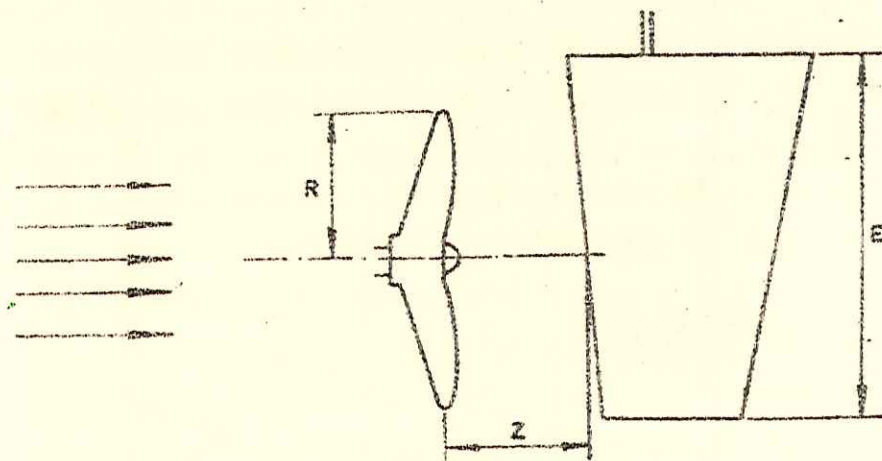


FIG 5

$$V = \frac{V_n (1 - W) (\bar{E} - D) + V_c \cdot D}{\bar{E}}$$

caso $\bar{E} < D$, então $V = V_c$

sendo V_c dado por:

$$V_c = V_n \cdot (1 - W) \left[1 + K_M \left(-1 + \sqrt{1 + \frac{8 \cdot K_T}{\pi \cdot J^2}} \right) \right] \quad (8)$$

onde K_M é obtido na Fig. 5.

No gráfico 6 tem-se os valores observados de C_s em função de α e RA .

No gráfico 7 tem-se a variação de C_a com α ; observa-se que não houve variação significativa com os outros parâmetros.

No gráfico 5 tem-se a variação de CPE/E com α . Observa-se que o valor de CPE/E varia com o bordo para o qual o leme é acionado; bombordo (BB) ou estibordo (BE), e o sentido de rotação do hélice. Os valores apresentados foram obtidos para hélice direito (rotação no sentido horário); para hélice esquerdo basta trocar BB por BE e vice-versa. A explicação para tal fenômeno é bastante simples: na Fig. 6 tem-se a direção da velocidade de saída do propulsor acima do eixo do hélice. Observa-se que para leme a BE o ângulo de ataque hidrodinâmico na parte inferior do leme (abaixo do eixo do hélice) é maior que na parte superior, deslocando o centro de pressão para a parte inferior do leme; o inverso ocorre para leme a BB.

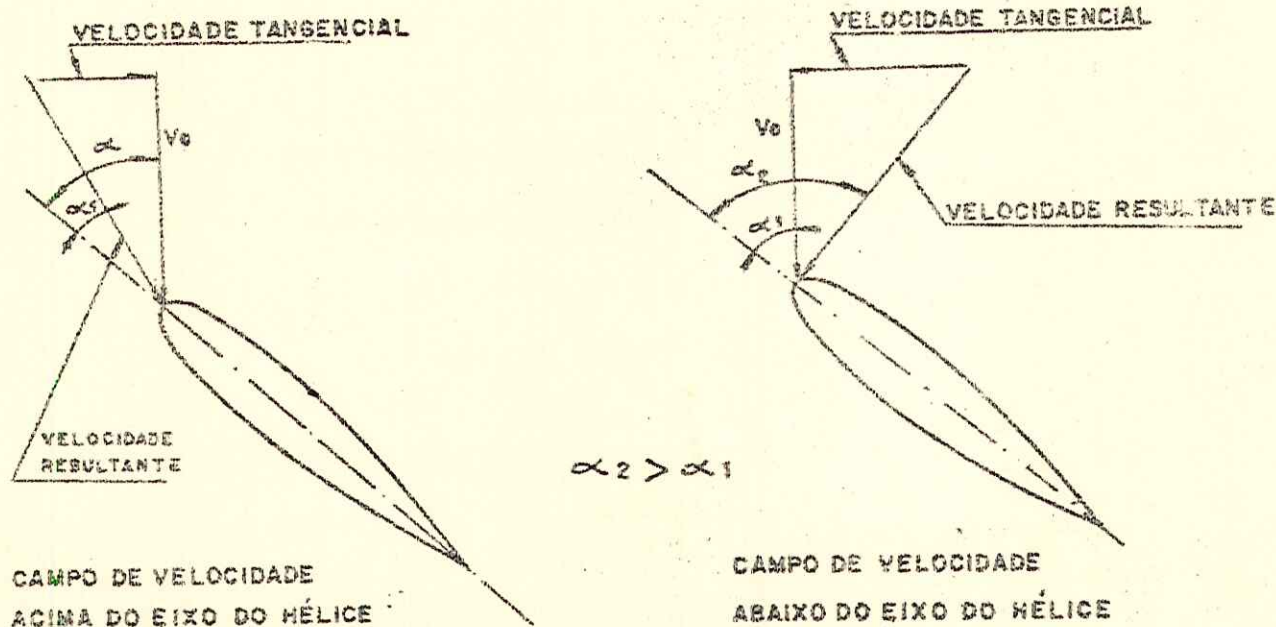


FIG 6

A influência dos parâmetros t/c , X/c , A foi a mesma que a observada para leme em escoamento uniforme. As expressões matemáticas obtidas que traduzem o comportamento hidrodinâmico de lemes com os parâmetros variando na faixa especificada e operando à ré do hélice são:

a) - Coeficiente de Sustentação (C_s)

O comportamento do leme difere ligeiramente dependendo do bordo (BB ou BE) para o qual o leme é acionado. Os resultados são para hélice direito; para hélice esquerdo o que vale para BB vale para BE e vice-versa.

- para BB ($p/\alpha \leq \alpha_s$)

$$C_s = (2,1 + 1,3 \cdot RA) \cdot \left(\frac{\alpha}{100}\right) + (3,9 - 3,3 RA) \left(\frac{\alpha}{100}\right)^2 \quad (9)$$

$$\alpha_s = 34,0 - 4,0 \cdot RA \quad (10)$$

- para BE ($p/\alpha \leq \alpha_s$)

$$C_s = (1,0 + RA) \cdot 1,4 \left(\frac{\alpha}{100}\right) + (3,0 - 3,9 \cdot RA) \left(\frac{\alpha}{100}\right)^2 \quad (11)$$

$$\alpha_s = 45,6 - 5,2 \cdot RA \quad (12)$$

Obs.: Para levar em conta o efeito de t/c em C_s deve-se multiplicar C_s obtido em 9 e 11 pela constante:

$$K = 0,45 + 5,2 (t/c) - 9,2 (t/c)^2$$

Para $\alpha_s < \alpha < 50^\circ$ tem-se em média:

$$C_s = 0,80 \quad (13)$$

b) - Coeficiente de Arrasto (C_a)

- para BB

$$C_a = 0,01 \cdot (3,1 - 0,7 \cdot \alpha + 0,06 \cdot \alpha^2 - 0,0002 \cdot \alpha^3) \quad (14)$$

- para BE

$$C_a = 0,01 \cdot (4,4 - 0,4 \alpha + 0,08 \cdot \alpha^2 - 0,001 \cdot \alpha^3) \quad (15)$$

c) - Coefficientes de Centro de Pressão (CPE/E e CPC/C)

O coeficiente CPC/C é o mesmo que para o escoamento uniforme; continua valendo a expressão (6).

O valor de CPE/E pode ser obtido diretamente do gráfico 5 em função de α para ângulos de BE e BB.

7. - LEME SEMI-MÓVEL TIPO "HORN"

Foi ensaiado também um leme tipo "Horn" conforme Fig.

7. O leme possui os seguintes parâmetros geométricos:

$$RA = = 2,0$$

$$t/c = 0,18$$

$$X/c = 0,30$$

$$RE = 0,70$$

$$\Lambda = 0^\circ$$

PERFIL NACA

No gráfico 8 tem-se as curvas de C_s , CPE/E e CPC/C - em função de α .

Obs.: No cálculo da área do leme, soma-se à área da superfície móvel a área da superfície fixa.

8. - DISPOSITIVOS ESPECIAIS PARA AUMENTAR A SUSTENTAÇÃO DO LEME

Como a força de sustentação é a força que atua diretamente sobre o controle da embarcação, para uma mesma área da superfície de controle (leme), é de interesse aumentar ao máximo esta força. Existem algumas maneiras de se conseguir um aumento adicional na força de sustentação de um leme; vamos apresentar duas maneiras extremamente simples para se atingir tal objetivo.

8.1. - Leme com "End-Plate"

Este dispositivo para se aumentar a sustentação consiste em se colocar placas planas na raiz e ponta do leme como mostra a Fig. 7.

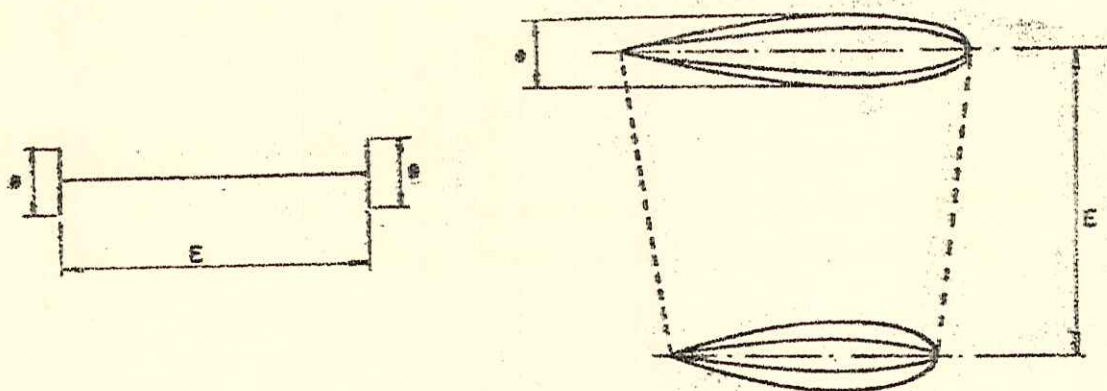


FIG 7

de acordo com referência (2):

$e = 0,15 \cdot E$; nos demais pontos do perfil a curvatura da placa acompanha a curvatura do perfil.

No gráfico 9 tem-se a curva de C_s para leme com $RA = 1$, com e sem "end plates"; verifica-se que a colocação dos "end plates", fornece um aumento na força de sustentação da ordem de 20%.

Para embarcações com escoamento excessivamente desuniforme, com aeração, este aumento pode ser ainda maior (as placas orientam o escoamento), cerca de 50%. No gráfico 10 observa-se o desempenho de um leme com $RA = 1$ de uma barcaça auto-propelida.

8.2. - Leme com "Flap" de Movimento Condicionado

Este dispositivo consiste em se fazer com que a parte posterior do leme gire em relação a parte anterior do leme, conforme está na figura 8.

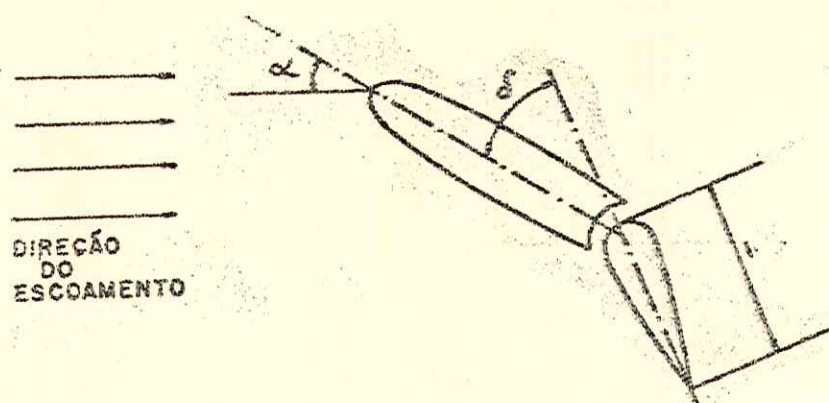


FIG 8

Para bom desempenho de tal dispositivo é conveniente usar os seguintes valores:

l : de 25% a 40% de C

δ : 30° a 40° , para o ângulo α no qual a sustentação do leme seria máxima sem o "Flap".

No gráfico 10 tem-se o mesmo leme citado em 8.1, ensaiado com "end plate" e "flap", observando-se um aumento na força de sustentação da ordem de 50% em relação ao leme sem "flap", pode-se dizer que de uma maneira geral um leme com "flap" tem um acréscimo de 50% na força de sustentação em relação a um leme sem "flap". O uso de "flap" em lemes não é muito comum, devido a necessidade de um mecanismo adicional para movimentação do "flap", mecanismo geralmente sofisticado e caro.

Tentando contornar tal problema é proposta uma nova maneira de orientar o "Flap" (extremamente simples e pouco onerosa) conforme indicado na figura 9.

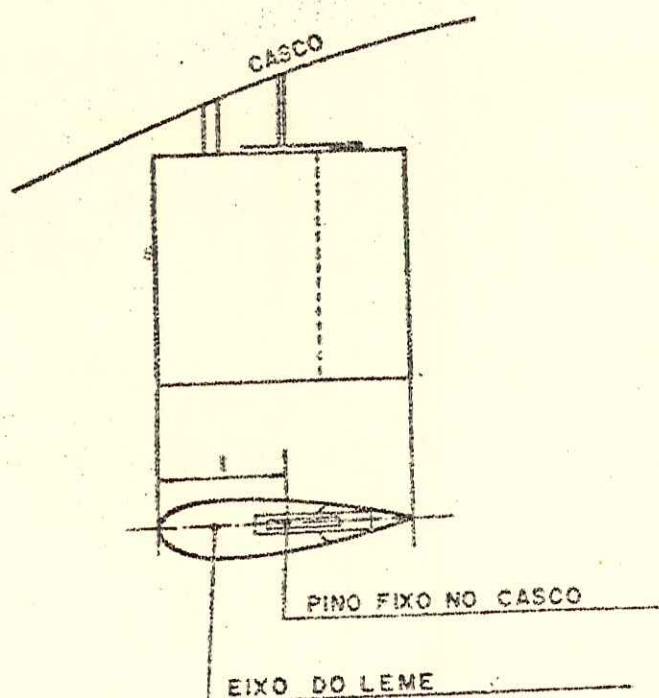


FIG-9

A distância l , deve ser tal que para α da ordem de 35° o ângulo δ seja da ordem de 30° .

Observa-se que, com o mecanismo proposto, a medida, que, o leme vai sendo posicionado através da máquina do leme, num ângulo α , o "Flap" vai automaticamente se posicionando num ângulo δ em relação ao leme pelo escorregamento da guia do "Flap" ao redor do pino fixo no casco.

Para diminuição do atrito o eixo fixo no casco deve ter em sua extremidade um rolete. Uma outra maneira de movimentar a guia do "Flap" em torno do eixo é apresentado na Fig. 10.

Para diminuição de atrito deve-se usar materiais lubrificáveis a água para revestimento do eixo fixado no casco ou na guia.

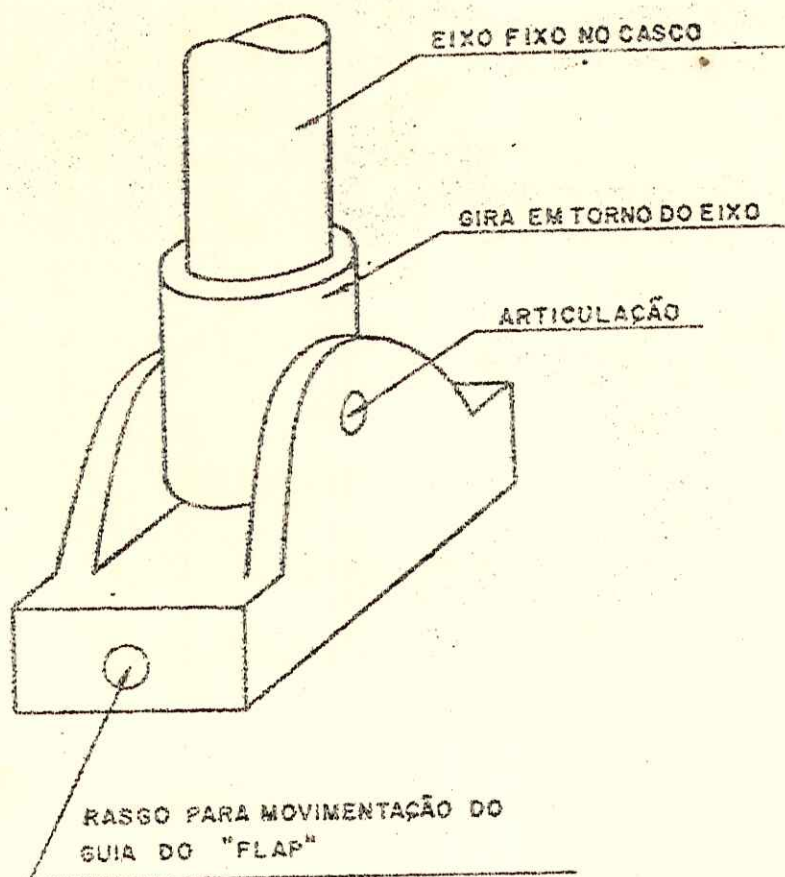
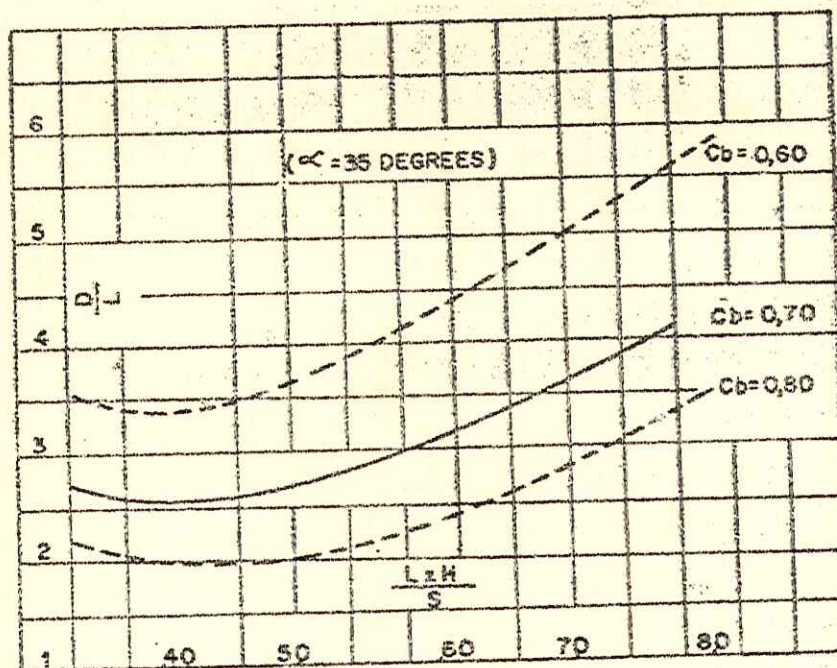


FIG 10

9. - CRITÉRIO PARA DETERMINAÇÃO DA ÁREA DO LEME DE UMA EMBARCAÇÃO

Para uma embarcação convencional o parâmetro mais importante é a área do leme. O gráfico 11 proveniente da referência (11) fornece os valores ótimos da área de leme para obtenção do mínimo raio de giro da embarcação. Observa-se - que em média a área do leme deve ser da ordem de 2% do produto entre calado e comprimento. Para embarcações especiais quanto a critério de manobras, a melhor configuração do sistema de controle (número de lemes, área, posição) deve ser determinada em tanque de Provas em ensaios de manobrabilidade.



L= COMPRIMENTO
 S= AREA DO LEME
 D= DIÂMETRO DE GIRO DA EMBARCAÇÃO
 H= CALADO
 Cb= COEFICIENTE DE BLOCO

GRAFICO 11

10. - CONSIDERAÇÕES SOBRE CÁLCULO DO DIÂMETRO DA MADRE DO LEME, VELOCIDADE DE ACIONAMENTO E POTÊNCIA DA MÁQUINA DO LEME.

Existem vários critérios para cálculo do diâmetro ($\bar{d}$) da madre do leme. Apresentamos a seguir, as expressões mais utilizadas; todas levam a resultados bastante próximos:

10.1. - da referência (4)

$$\bar{d} = \left(\frac{16}{\pi \bar{\sigma}_c} (\sqrt{M^2 + M_t^2}) \right)^{1/3} \quad (16)$$

para aço, com tensão de escoamento 2100 kg*/cm² e adotado para $\bar{\sigma}_c$ (tensão de cisalhamento) o valor $\bar{\sigma}_c = \frac{2100}{5} = 420 \text{ kg*/cm}^2$

10.2. - da referência (5)

$$\bar{d} = \left(\frac{16}{\pi \bar{\sigma}_p} (M + \sqrt{M^2 + M_t^2}) \right)^{1/3} \quad (17)$$

onde M_a é o torque de atrito. Para mancais de escorregamento o coeficiente de atrito é da ordem de 0,20; para mancais de rolamento o coeficiente de atrito é da ordem de 0,015. Para mancais de deslizamento a maior parcela do torque total é o torque de atrito.

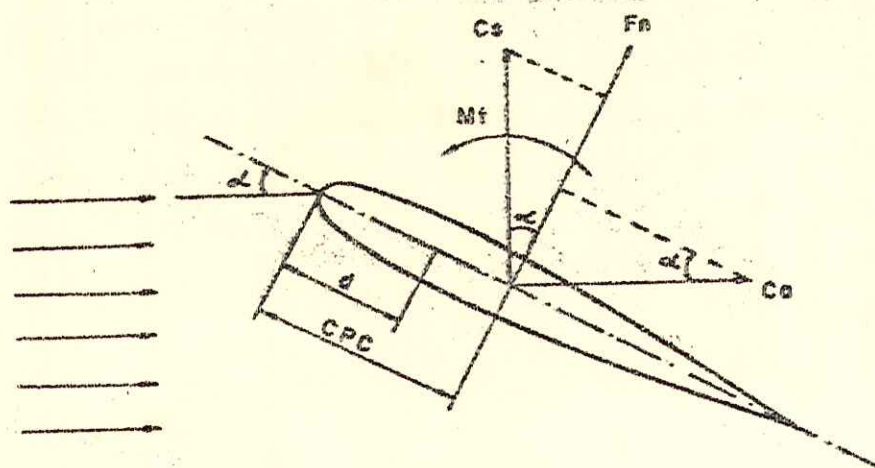


FIG-11

10.5. - Determinação do momento Fletor (M)

Pelo uso da expressão (6) determina-se o CPE, ponto de aplicação da força resultante no leme. Tendo-se a força resultante, o seu ponto de aplicação e a forma de fixação do leme traça-se o diagrama de momentos para a condição mais crítica, e determina-se o máximo momento fletor da madre.

10.6. - Potência da Máquina do Leme

A potência da máquina do leme é dada por:

$$P = \frac{2\pi\omega}{\alpha_{\max}} \int_0^{\alpha_{\max}} M_t(\alpha) d\alpha$$

$\alpha_{\max}$: máximo ângulo de acionamento do leme

ω : velocidade de acionamento do leme (Radianos/s)

ou se tomarmos M_t (α) como sendo constante e igual ao máximo valor determinado para M_t pela expressão (21), tem-se:

$$P = 2 \pi \omega M_t$$

observa-se que quanto menor o valor de M_t menor será a potência exigida à máquina do leme; que pode ser obtido pela determinação adequada de (d). Uma prática usual é impor-se que para $\alpha = 20^\circ$ deve-se ter $d = \text{CPC}$, ou seja o torque é nulo. Outro fator que influi na potência da máquina do leme, é a velocidade de acionamento do leme; é usual estipular-se como sendo de 2,5 graus/segundo, o seu valor mínimo. Sob o aspecto de capacidade de manobra é sempre interessante ter-se uma alta velocidade de acionamento, mesmo que isso implique num aumento da potência da máquina do leme, pois a resposta da embarcação será mais rápida. Com relação a capacidade de manobra da embarcação, é aconselhável que α_{max} seja da ordem de 1,4 α_s a fim de permitir que o leme possa atingir um ângulo de ataque hidrodinâmico igual ao ângulo de "stall", quando é máxima a sua sustentação, pois o ângulo de ataque hidrodinâmico do leme é da ordem de 5/7 do ângulo imposto pelo timoneiro, devido a resposta do navio.

SIMBOLOGIA

- α - ângulo de ataque do leme em relação a um escoamento uniforme (graus)
 α_s - ângulo de "stall" do leme (graus)
 V - velocidade do escoamento no bordo de ataque do leme (m/s)
 S - área do leme (m²)
 ρ - densidade da água (kg* m⁻³. s²)
 F_s - força de sustentação no leme (kg*)
 F_a - força de arrasto no leme (kg*)
 $F_R = \sqrt{F_s^2 + F_a^2}$ - força resultante no leme (kg*)
 F_n - força normal no leme (kg*)
 $C_s = \frac{F_s}{\frac{1}{2} \rho S V^2}$ - coeficiente de sustentação (adimensional)
 $C_a = \frac{F_a}{\frac{1}{2} \rho S V^2}$ - coeficiente de arrasto (adimensional)
 $C_n = \frac{F_n}{\frac{1}{2} \rho S V^2}$ - coeficiente de força normal (adimensional)
 $C_R = \frac{F_R}{\frac{1}{2} \rho S V^2}$ - coeficiente de força resultante (adimensional)
 M - momento fletor numa seção da madre do leme (kg*.m)
 M_t - momento torçor numa seção da madre do leme (kg*.m)

Obs.: Os demais símbolos usados serão de
 finidos oportunamente no texto

A P Ê N D I C E I

Gráficos de 1 a 17 e Tabela 1

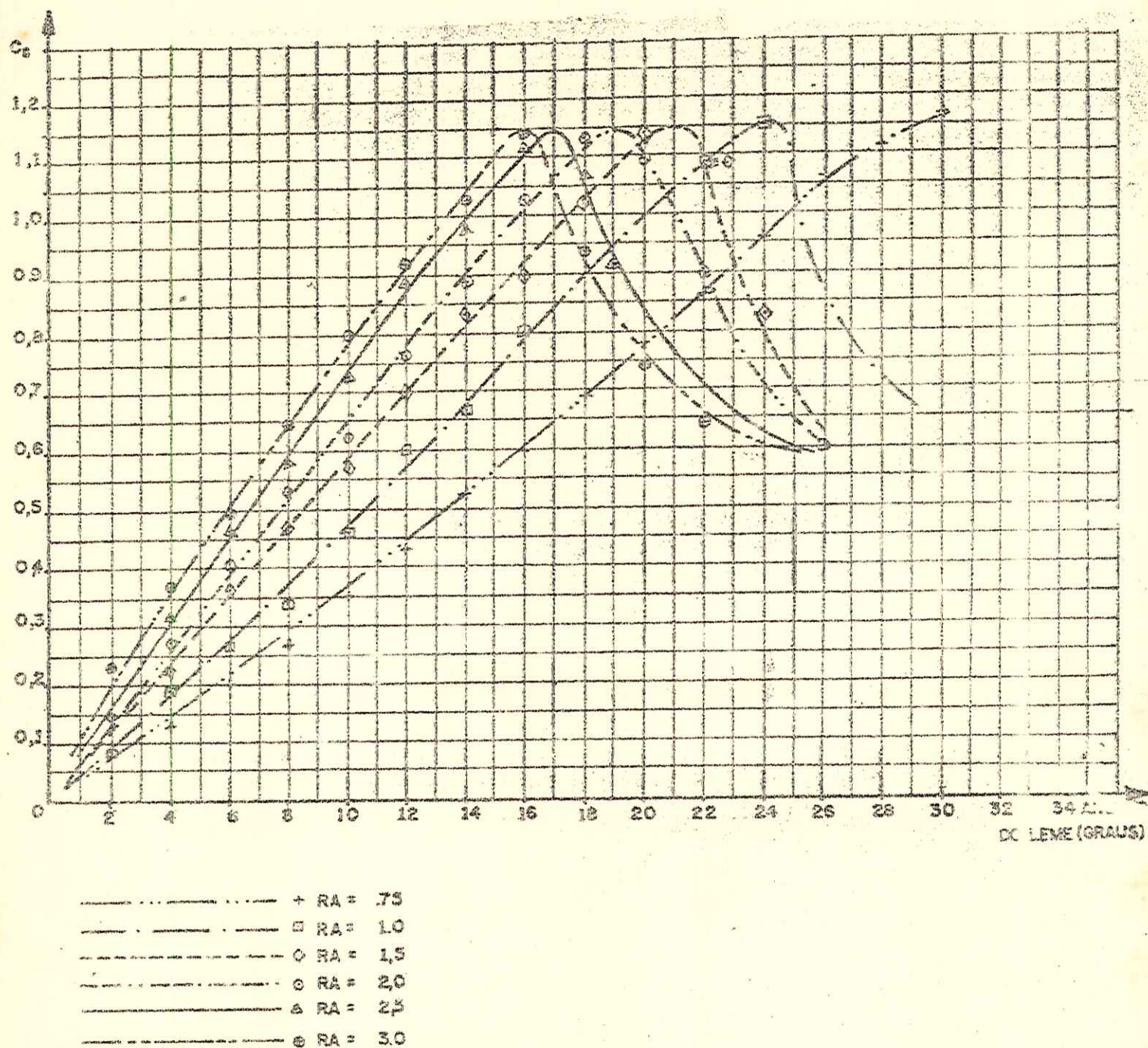
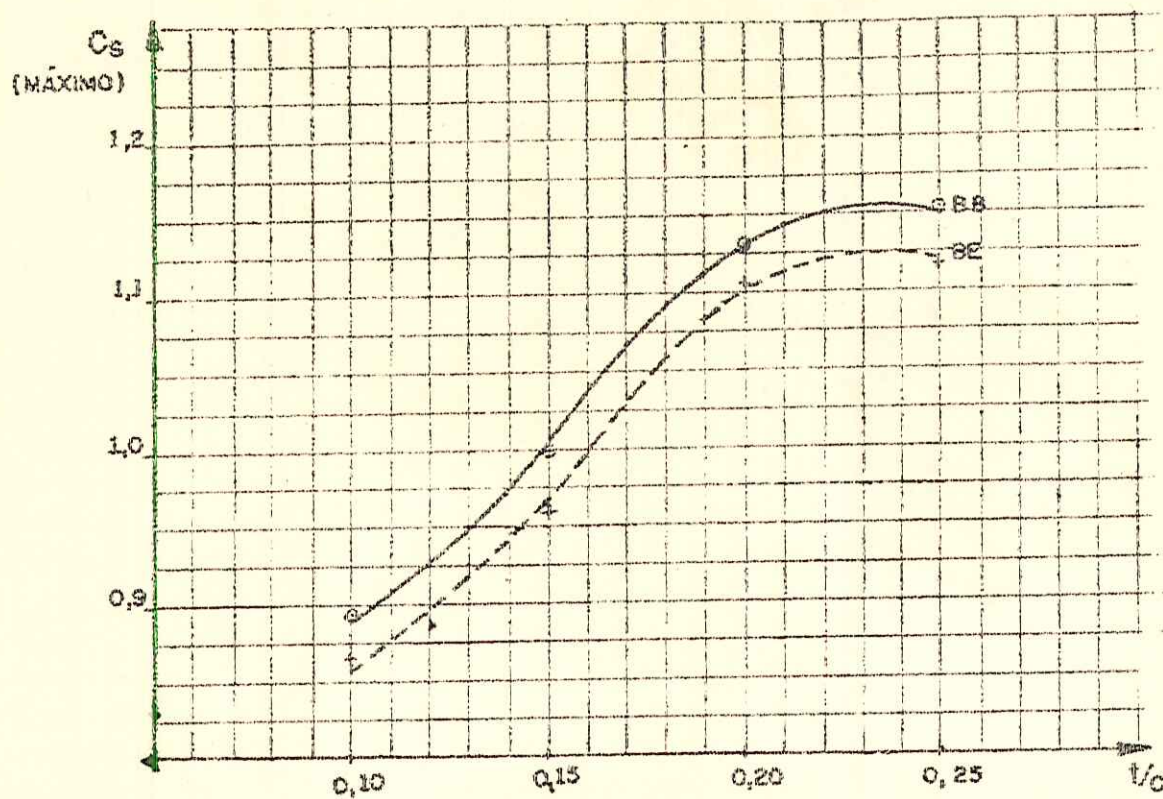


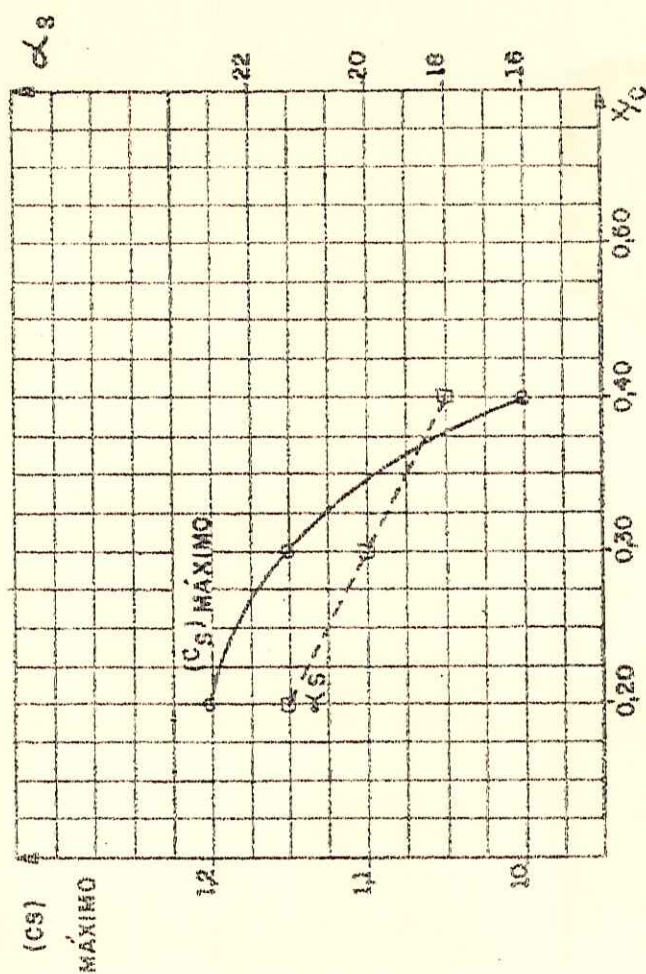
GRÁFICO 1

CURVAS DE C_s PARA LEME OPERANDO EM ESCOAMENTO
UNIFORME



EFEITO DE t/c EM (C_s) MÁXIMO PARA LEME NO JATO DO HÉLICE

GRÁFICO-2



EFEITO DE x/c EM (C_g) MÁXIMO E EM α_s

GRÁFICO - 3

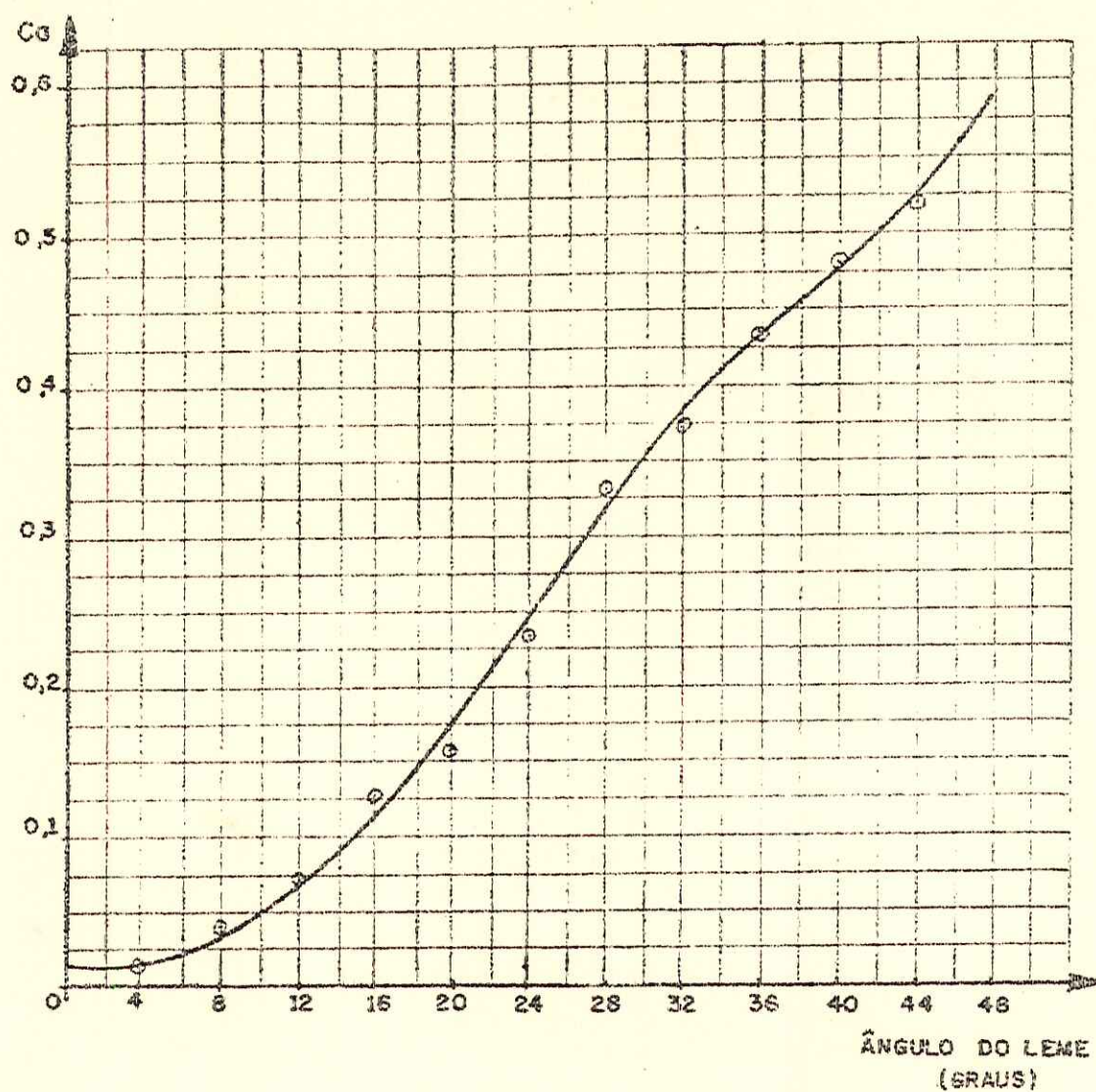
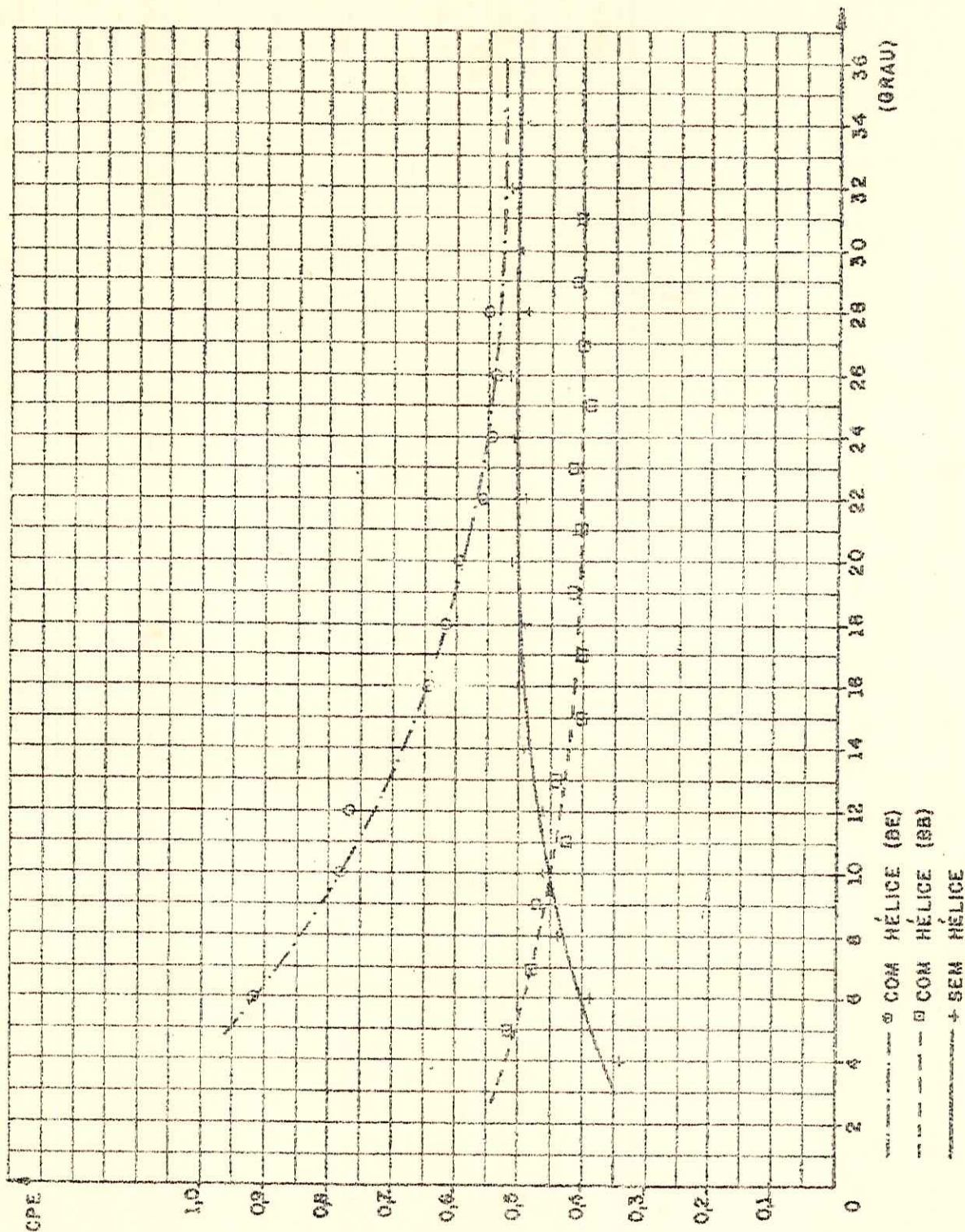


GRÁFICO 4

CURVA DE C_d PARA LEME EM ESCOAMENTO UNIFORME



CURVAS DE $CPE_{1/2}$ PARA LEME EM ESCOAMENTO UNIFORME E OPERANDO NO JATO DO HÉLICE

GRAFICO 5

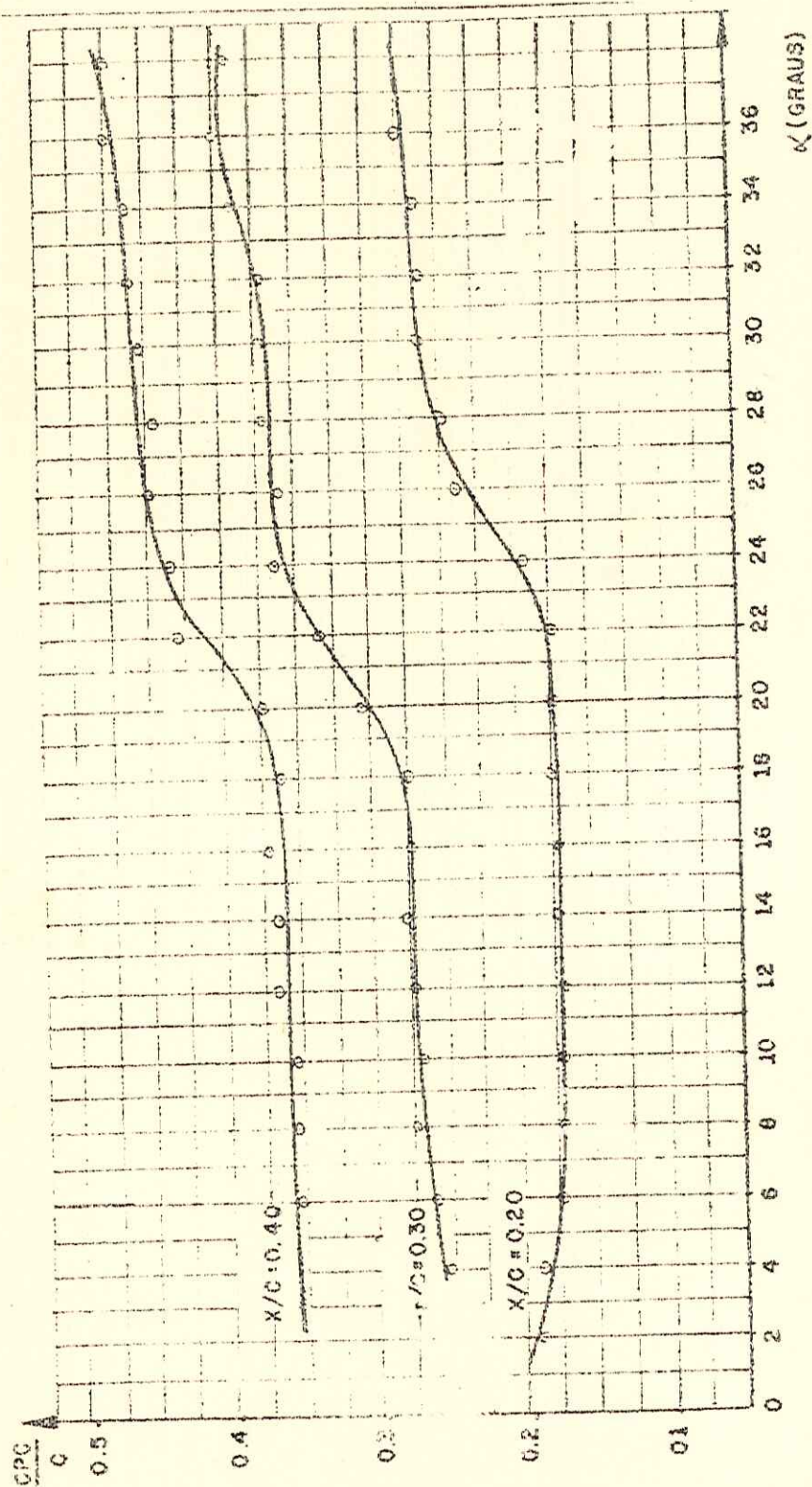
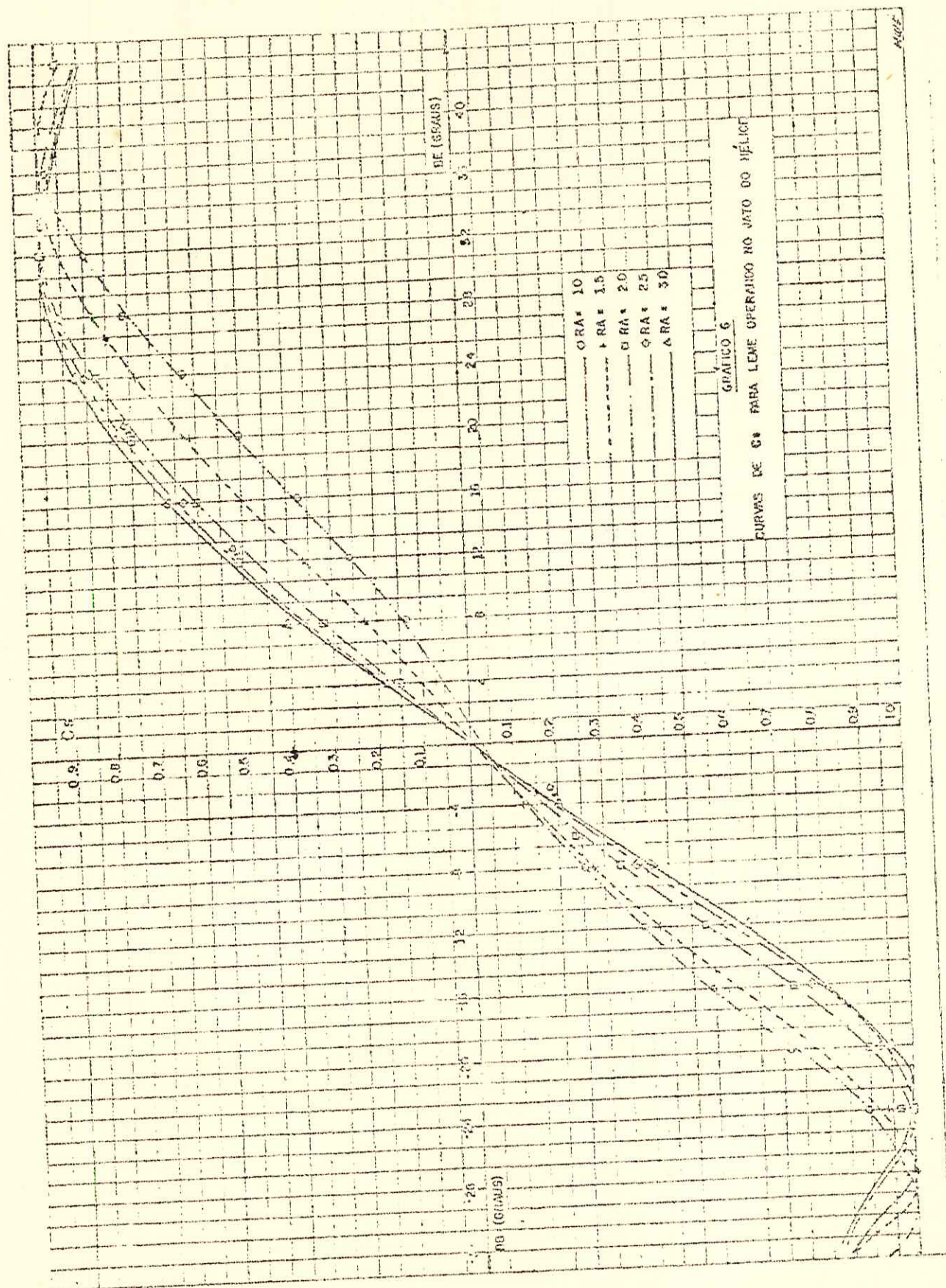


GRÁFICO --(3-1)

CURVAS DE CPC/C COM VARIAÇÃO DO ÂNGULO
DE ATAQUE E X/C



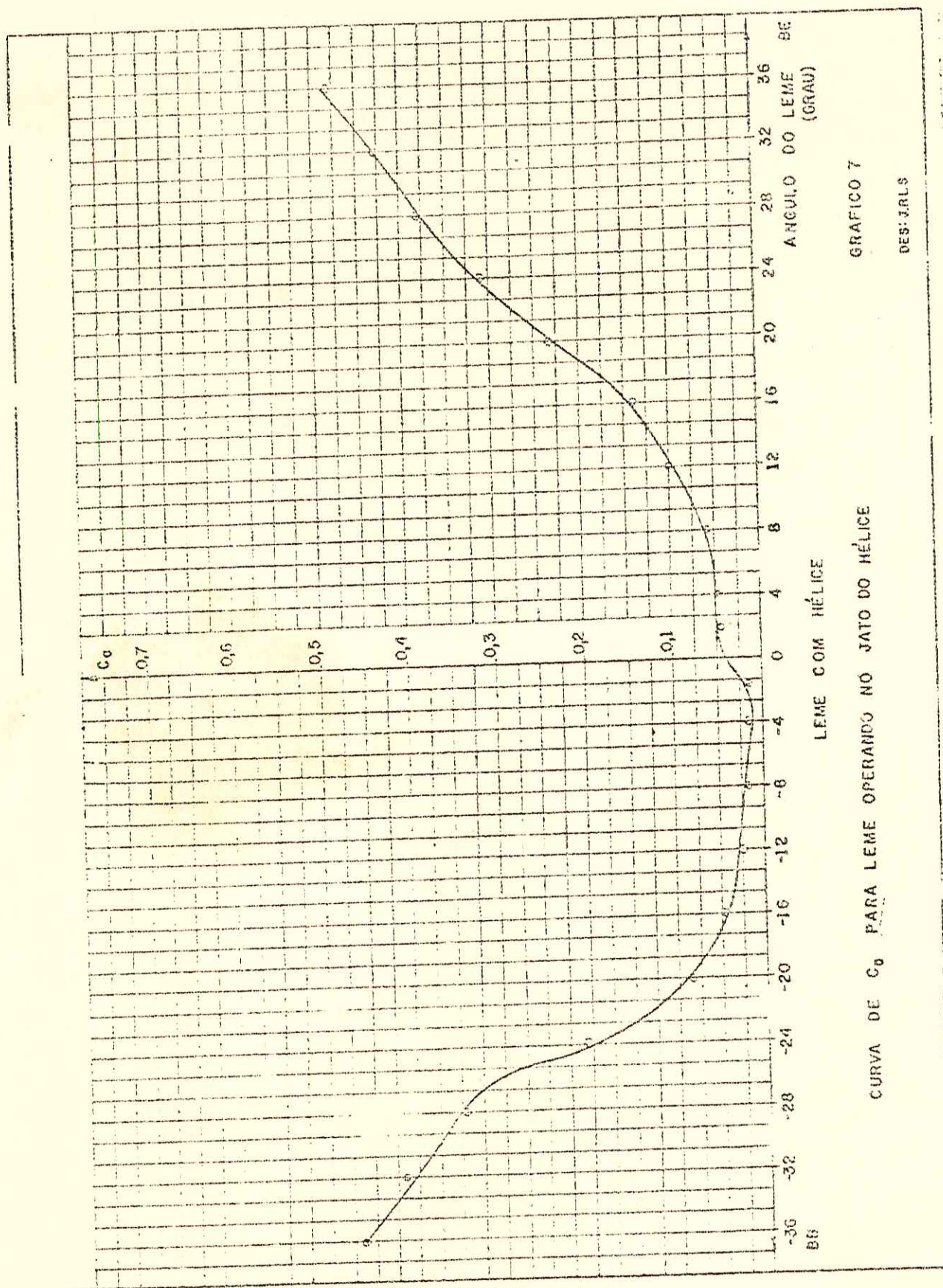


GRAFICO 7

DES: JRLS

CURVA DE C_0 PARA LEME OPERANDO NO JATO DO HÉLICE

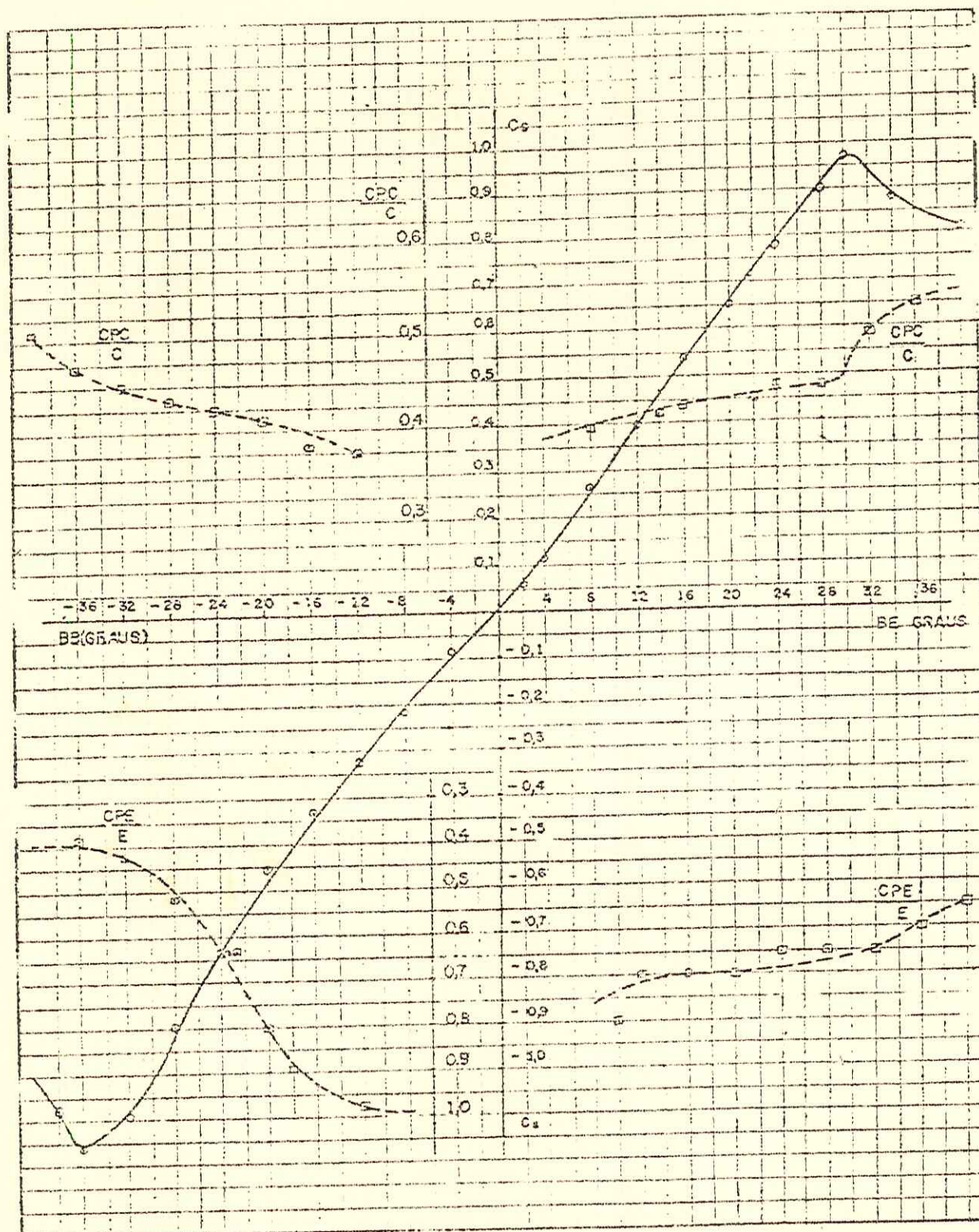


GRÁFICO B

CURVAS CARACTERÍSTICAS DE LEME HORN
OPERANDO NO JATO DO HÉLICE (HÉLICE DIREITO)

des.: PAS

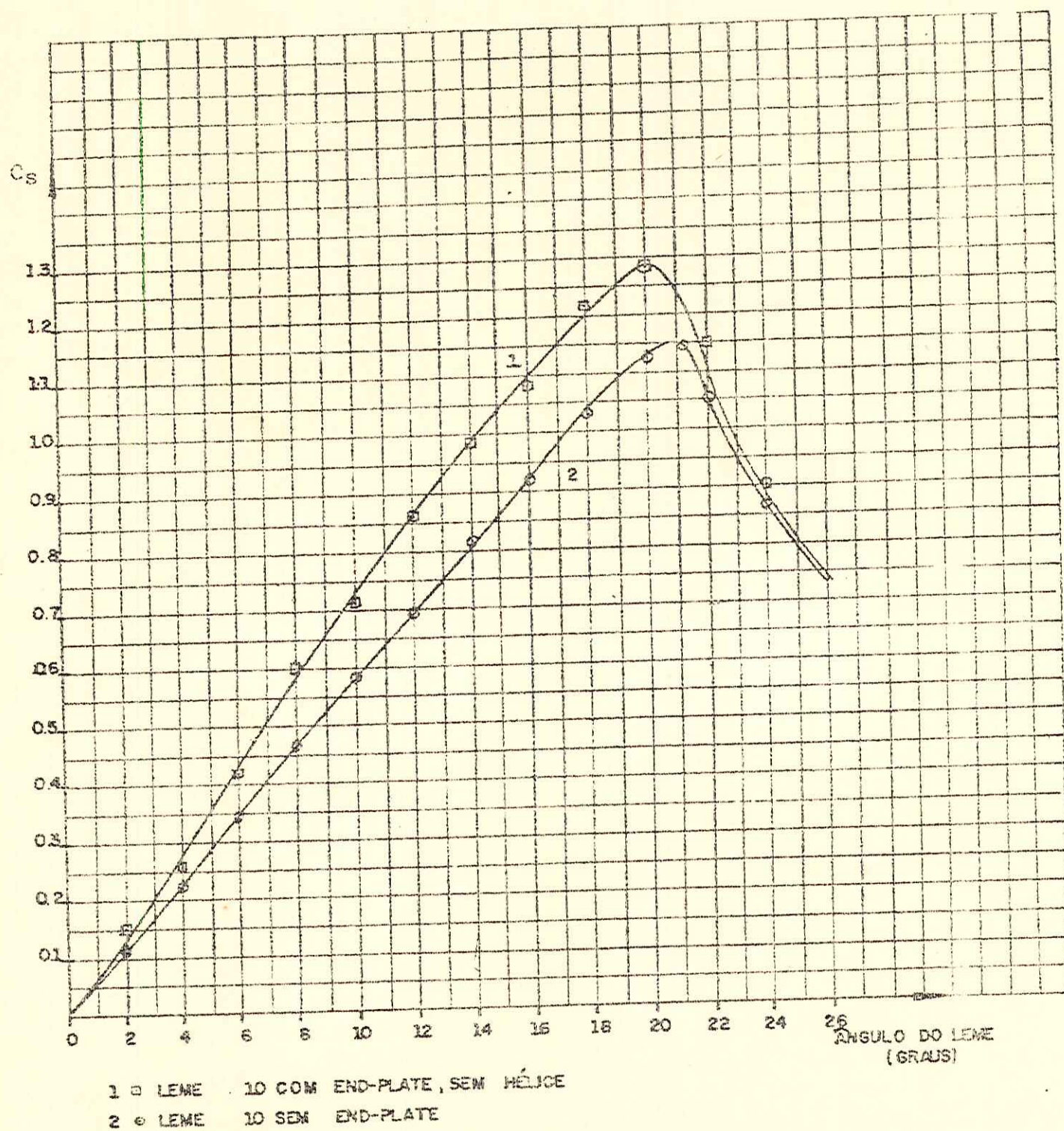


GRÁFICO - 9

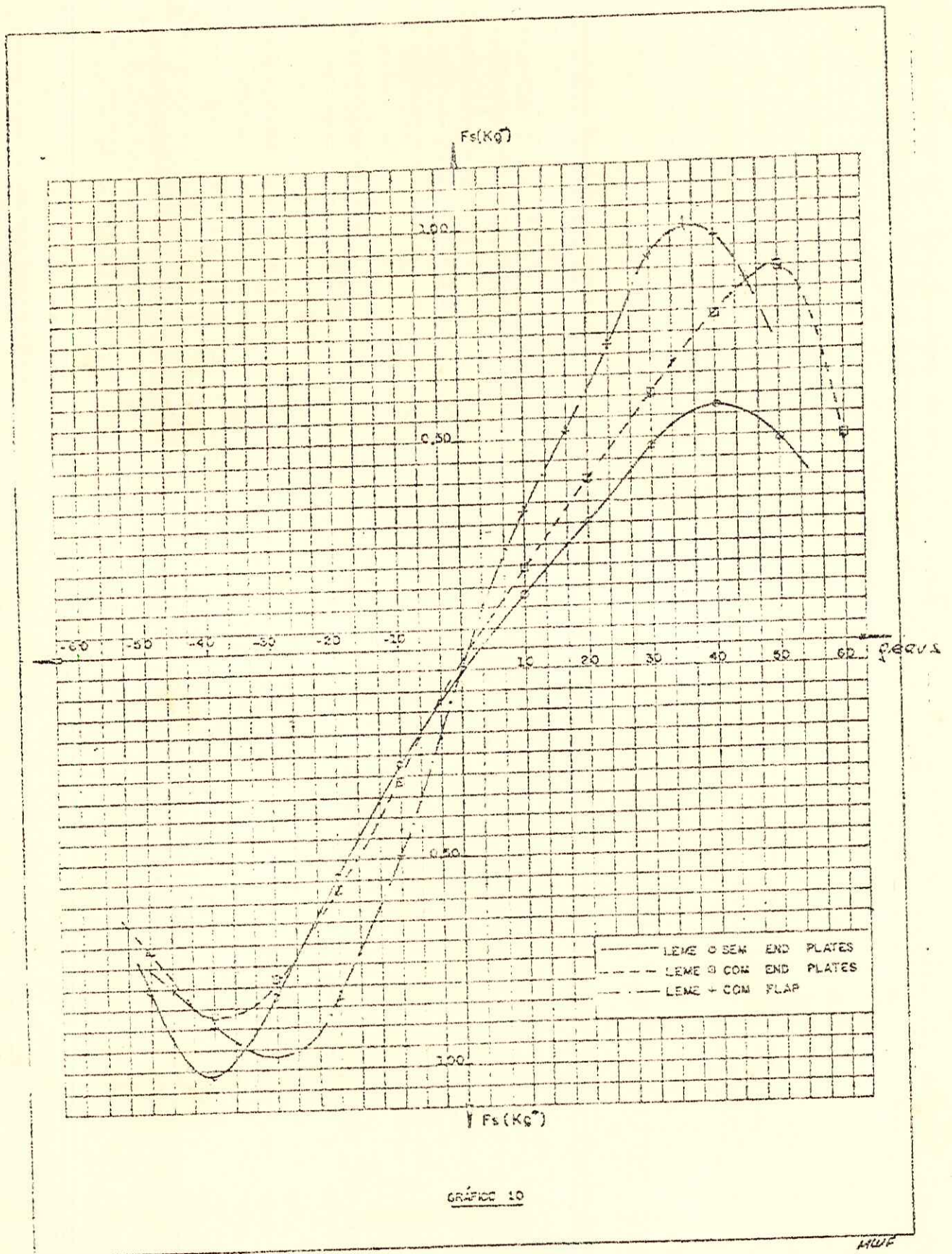


TABELA-1

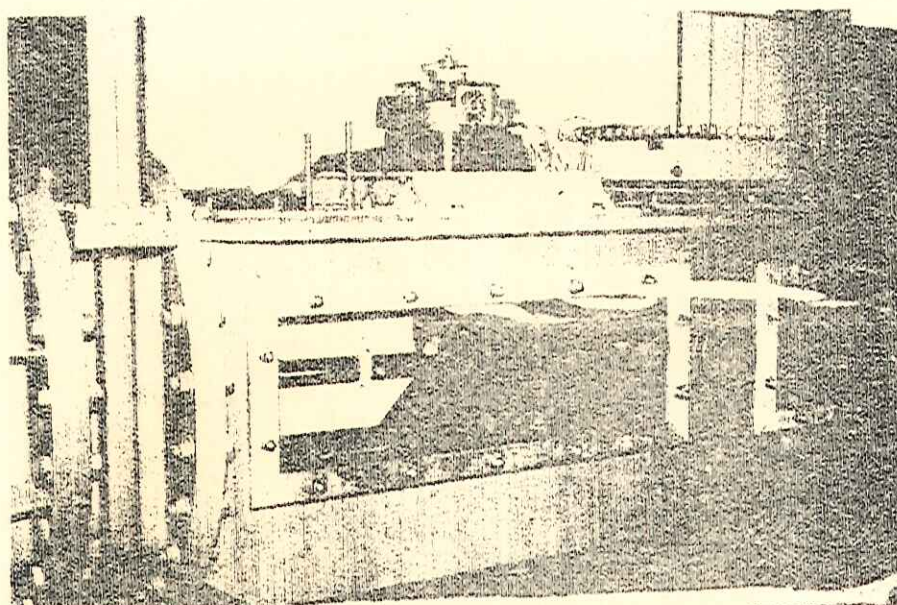
NÚMERO DO MODELO	R.A	$\bar{C}$	$\bar{E}$	t/c	x/c	c_2/c_1	E_2/E_1	A	PERFIL
9	100	181	180	0.13	0.29	0.70	1.00	0°	NACA
10	151	1465	220	0.15	0.30	0.70	1.00	0°	NACA
13	0.76	239	181	0.13	0.30	0.70	1.00	0°	NACA
15	2.00	110	220	0.15	0.30	0.70	1.00	0°	NACA
16	2.50	88	220	0.15	0.25	0.70	1.00	0°	NACA
17	3.00	753	220	0.15	0.30	0.70	1.00	0°	NACA
18	2.00	110	220	0.10	0.30	0.70	1.00	0°	NACA
19	2.00	110	220	0.20	0.30	0.70	1.00	0°	NACA
20	2.00	110	220	0.25	0.30	0.70	1.00	0°	NACA
21	2.00	110	220	0.15	0.30	0.50	1.00	0°	NACA
22	2.00	110	220	0.15	0.30	0.80	1.00	0°	NACA
23	2.00	110	220	0.15	0.30	1.00	1.00	0°	NACA
24	2.00	110	220	0.15	0.20	0.70	1.00	0°	NACA
25	2.00	110	220	0.15	0.40	0.70	1.00	0°	NACA
26	2.00	110	220	0.15	0.30	0.50	1.00	10°	NACA
27	2.00	110	220	0.15	0.30	0.70	1.00	5°	NACA
32	1.00	169	172	0.18	0.30	1.00	1.00	0°	NACA
33	1.90	116	220	0.18	0.30	0.72	1.00	0°	NACA

CBS: MEDIDAS EM MILÍMETROS

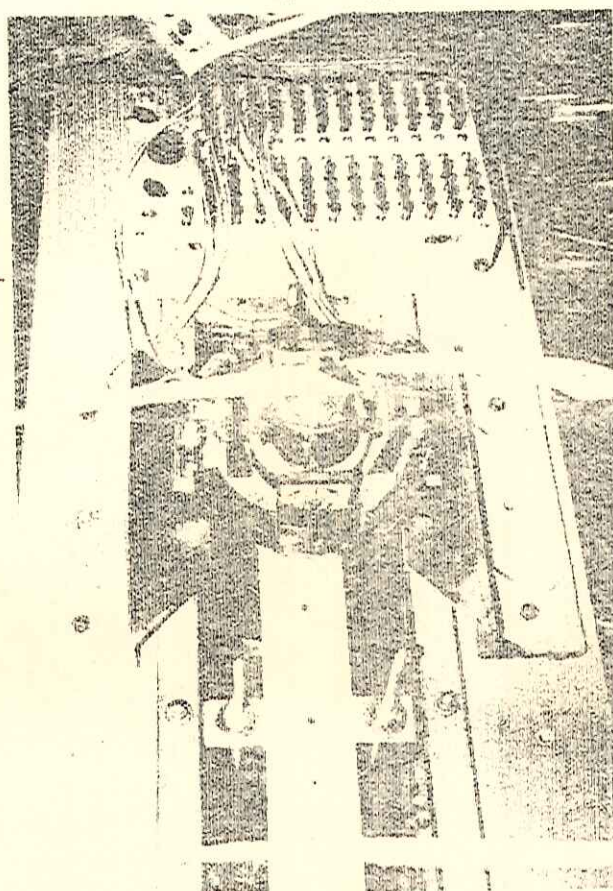
A P Ê N D I C E II

Fotos dos modelos e Ensaio Realizados

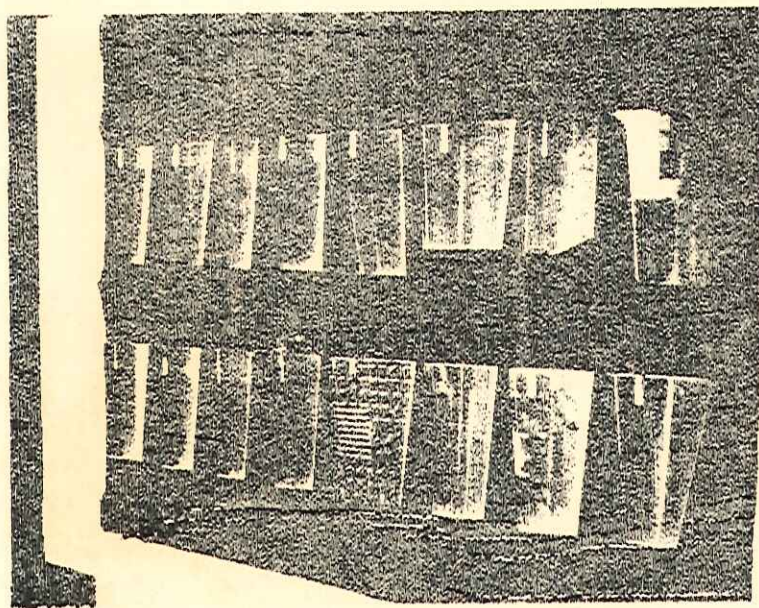
INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS



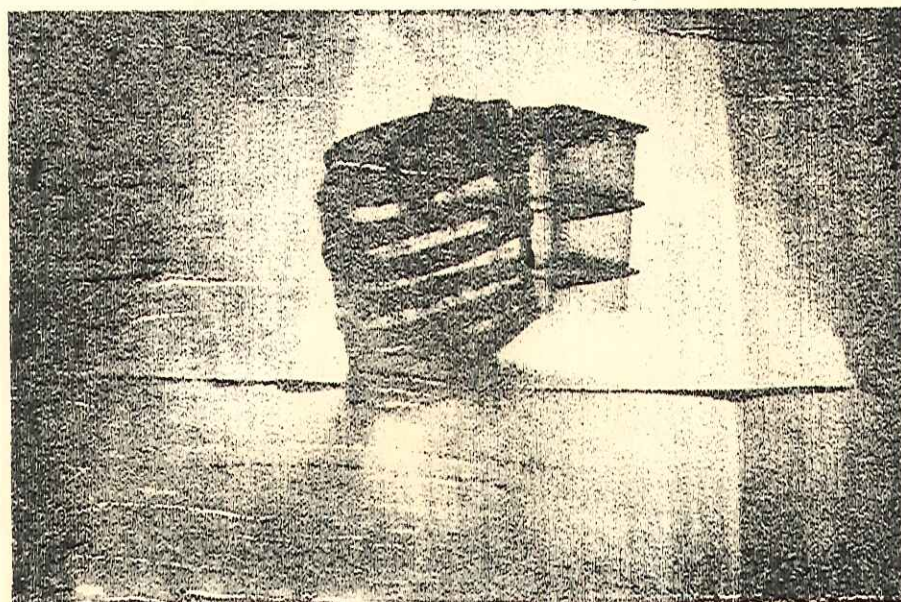
1. VISTA DO ENSAIO



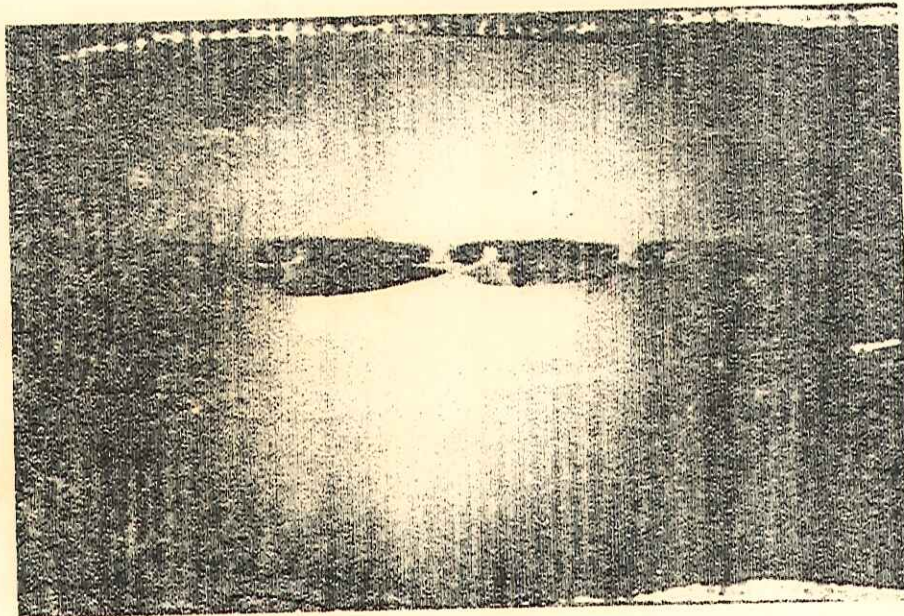
2. DINAMOMETRO DE 5 COMPONENTES



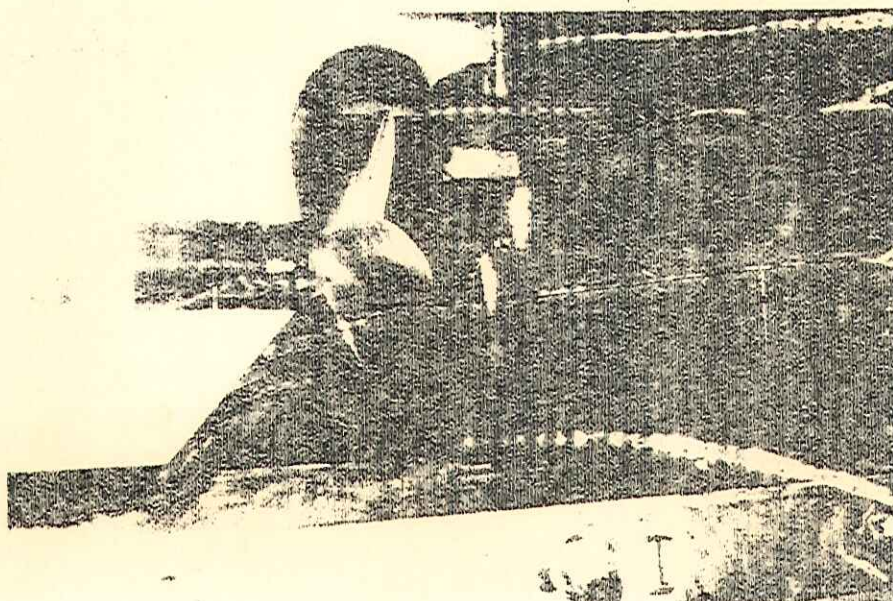
3- MODELOS ENSAIADOS



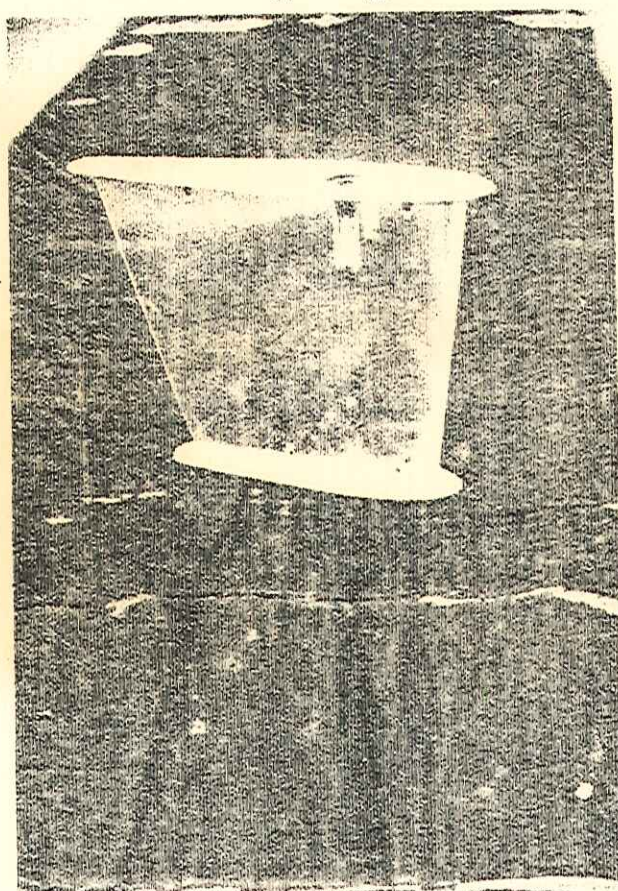
4- LEME COM "FLAP" E "END PLATE"



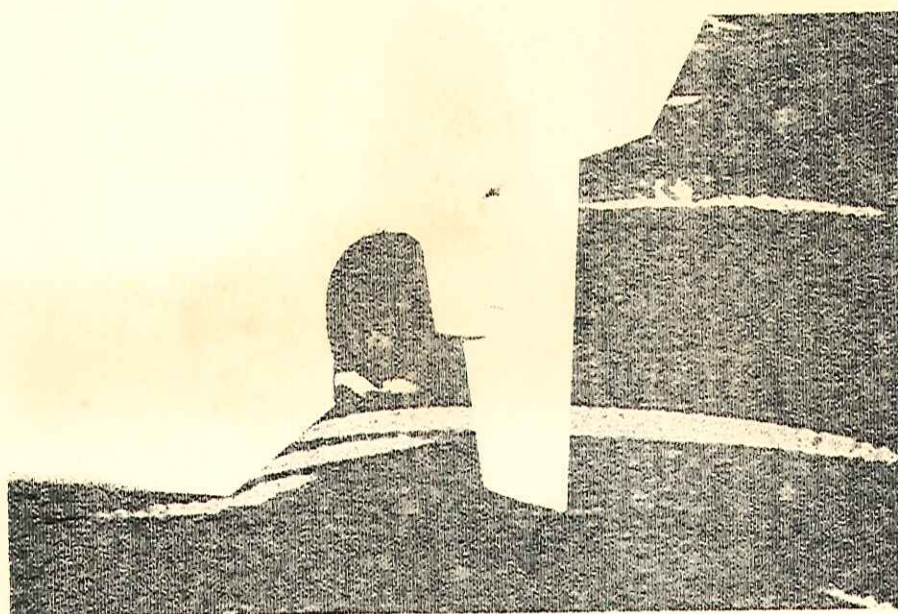
5- MODELOS COM VARIAÇÃO DE T/C



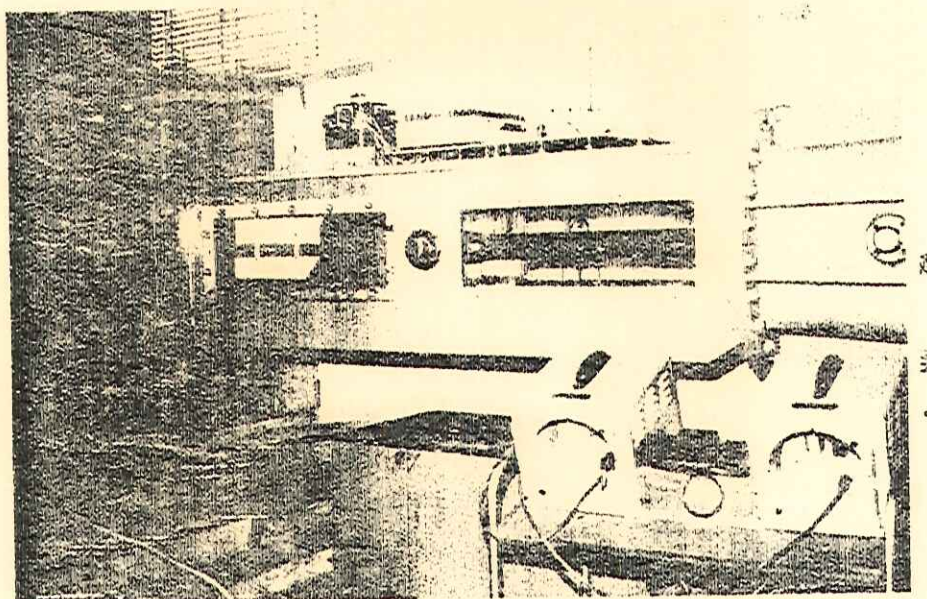
6- LEME TIPO " HORN "



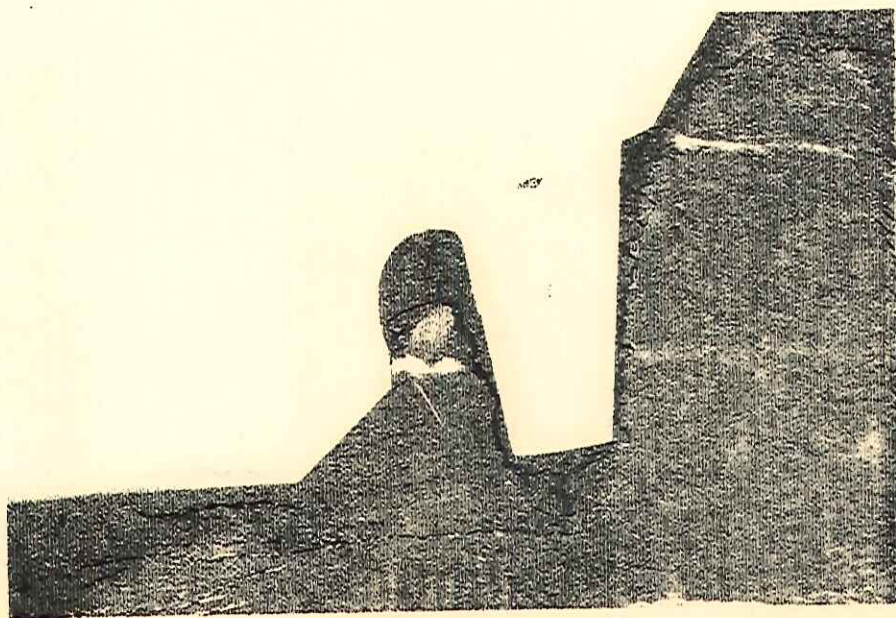
7- LINE COM " END - PLATE "



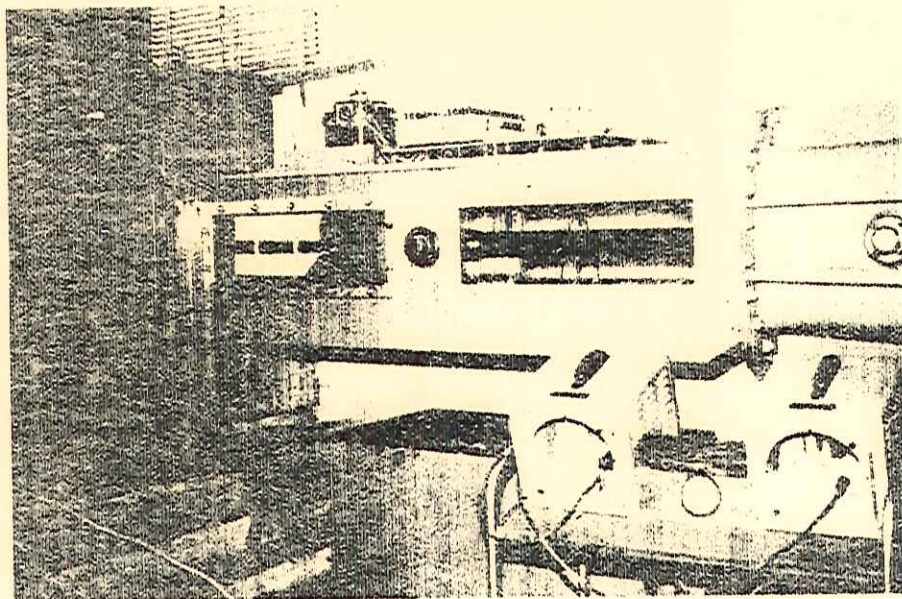
8- MODELO ENSAIADO NO TANQUE DE PROVAS



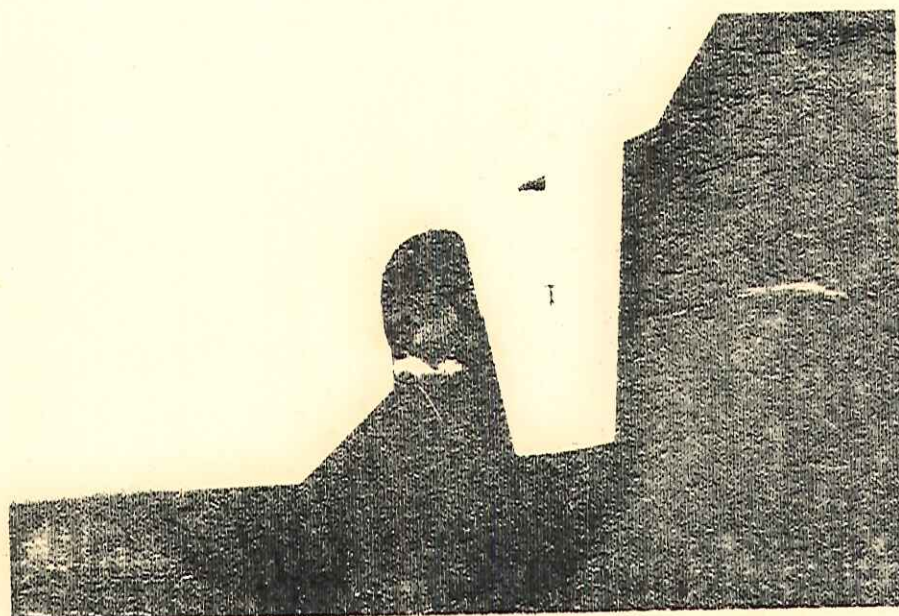
9 - VISTA GERAL DO TÚNEL - CIRCULAÇÃO



10 - DETALHE DO TÚNEL - CIRCULAÇÃO



9 - VISTA LATERAL DO TUBO DE SINCRONISMO



10 - VISTA LATERAL DO TUBO DE TORQUE DE SINCRONISMO