

ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Meio de Locomoção Aquático

Movido a Pedal

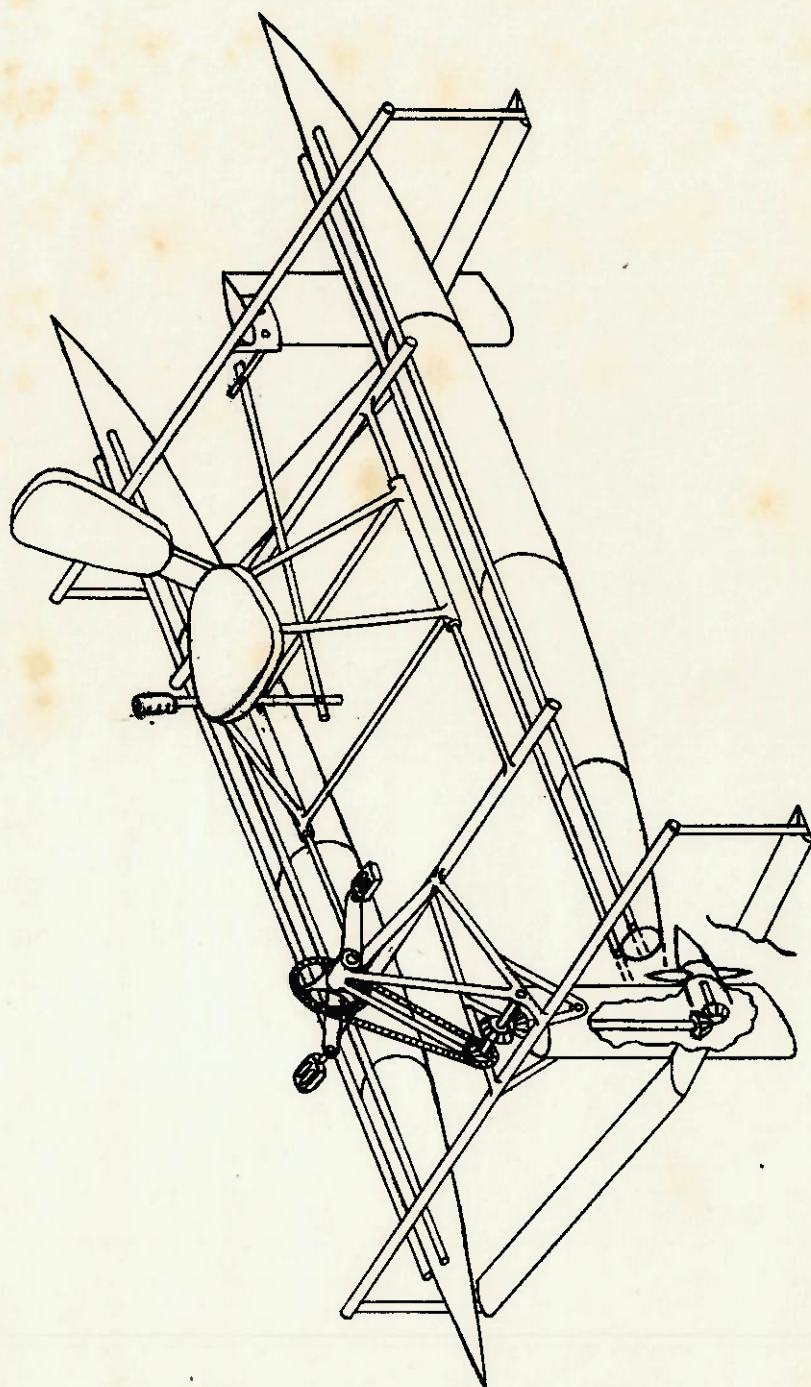
Disciplina: Projeto Mecânico I e II

Autor: Fábio Luís Amaral dos Anjos

N.º USP: 1523349

Orientador: Prof. Omar Moore de Madureira

São Paulo - 1991



1 - APRESENTAÇÃO

1.1 - DESCRIÇÃO GERAL

O presente trabalho consiste na tentativa de se projetar um veículo de propulsão humana movido a pedal, voltado para o lazer esportivo, de maneira a apresentar eficiência e desempenho bastante além dos oferecidos pelos produtos já existentes dessa categoria. Isto é, deverá apresentar performance comparável ou ainda superior à alcançada pelos já conhecidos e tradicionais caiaques.

Como ordem natural de projeto, numa primeira etapa realizou-se um *estudo de viabilidade*, onde acreditamos ter desenvolvido material suficiente para afirmarmos a completa exequibilidade do produto em questão, isto é, foram verificadas sua necessidade de mercado, especificações técnicas e viabilidades física, econômica e financeira.

Após a confirmação acima citada, partiu-se então para o chamado *projeto básico*, onde estabeleceu-se uma concepção global do projeto, definindo-o numericamente em seus parâmetros principais.

1.2 - ANÁLISE CRÍTICA

Mostrou-se, com este trabalho, a possibilidade teórica de se atingir as expectativas principais do produto. Assim, dentro das simplificações propostas nos modelos matemáticos desenvolvidos, obteve-se resultados plenamente satisfatórios, os quais permitem a prossecução à fase seguinte do projeto: o projeto executivo. Esta última etapa não fará parte da presente exposição, ficando seu desenvolvimento, quem sabe, para uma outra ocasião.

1.3 - RECOMENDAÇÕES

Para a continuação deste projeto será indispensável a construção de protótipos funcionais, os quais deverão ser submetidos a testes e ensaios para verificação da validade dos cálculos efetuados.

1.4 - AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer a todos aqueles que cooperaram direta ou indiretamente para o bom desenvolvimento deste trabalho. Em especial ao Eng.º Omar Moore de Madureira, quem me orientou e incentivou ao longo de todo esse período.

Agradeço de antemão a qualquer pessoa interessada e disposta a debater o assunto no sentido de se buscar um aprimoramento ou melhor desenvolvimento do projeto.

1.5 - DADOS DO AUTOR

Nome: Fábio Luís Amaral dos Anjos

Residência: Rua Passo da Pátria, 673 - CEP 05085 - Alto da Lapa - São Paulo - SP

Telefone: 260 95 16

2 - ESTUDO DA VIABILIDADE

2.1 - O ESTABELECIMENTO DA NECESSIDADE

A necessidade de um meio de locomoção aquático movido a pedal, voltado para o lazer esportivo no mar ou lago (principalmente no mar), existe de forma aparente, pois ainda não há no mercado um produto que despertasse esse desejo no consumidor.

Observando-se os diversos produtos de lazer aquático existentes, tais como: lanchas, botes infláveis, "windsurfs", caiaques, veleiros, pedalinhos, etc; verificamos três grandes grupos: os movidos a motor, os movidos pelo vento e os movidos pelo próprio homem.

Neste último grupo, observa-se que os caiaques são a grande atração do mercado, deixando o pedalinho com uma parte muito pequena e restrita deste.

Embora seja o produto que mais se aproxima desta necessidade, o pedalinho deixa muito a desejar pois apresenta baixíssimo rendimento e tecnologia ultrapassada, sendo assim usado apenas para recreação infantil e românticos passeios de casais de namorados e ainda assim em águas paradas.

Esse novo produto visa despertar, principalmente no público jovem (14-30 anos), o desejo de um transporte tão eficiente quanto um caiaque, mas com a vantagem de se utilizar das pernas ao invés dos braços para sua locomoção, proporcionando um menor desgaste físico do usuário, pois geralmente tem-se mais força e resistência física nas pernas do que nos braços.

Convém lembrar que no caso do pedalinho, o usuário geralmente não quer se molhar, mas no caso deste produto, pelo fato de ser esportivo, o usuário não deverá se importar com isso, além do mais "quem vai à praia é pra se molhar".

Existe também no mercado um tipo de pedalinho conhecido como "Sea Cross", possuindo este uma parcela muito restrita do mercado; geralmente pessoas que alugam suas unidades para pequenos passeios. É um produto muito pesado (90 kg), difícil de se transportar e de baixa eficiência.

O objetivo de mercado do nosso produto será o de atingir as classes média e média alta na faixa etária acima.

2.2 - ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS

2.2.1 - FUNCIONAIS

2.2.1.a - Desempenho: velocidade de cruzeiro mínima de 6 km/h (3,3 Nós ou 1,67 m/s) num mar em condições "normais", exigindo uma potência tal que uma pessoa normal, em boas condições físicas, possa fornecê-la durante 30 minutos continuamente ($\cong$ 90 watts). A velocidade máxima deverá ser próxima a 18 km/h (10 Nós ou 5 m/s).

2.2.1.b - Conforto: o operador deverá poder pedalar por 30 minutos numa posição tal que lhe seja confortável (não pode, por exemplo, dar dor nas costas ou nas nádegas).

Não poderá causar ruídos que lhe tirem a tranquilidade e sossego de navegar apenas ouvindo o barulho das águas.

2.2.1.c - Segurança: pode até ser tombado por imperícia do operador ou condições adversas do meio, mas seu afundamento será permitido apenas por excesso de carga ou quebra do casco.

2.2.2 - OPERACIONAIS

2.2.2.a - Durabilidade: vida útil dos principais componentes não inferior a 6 anos.

2.2.2.b - Confiabilidade: nenhuma falha que interrompa o funcionamento nos primeiros dois anos de uso.

2.2.2.c - Mantenebilidade: deverá ser lavado com água após cada período de utilização, isto é, todos os dias em que foi utilizado. Eventuais lubrificações poderão ser necessárias.

2.2.3 - CONSTRUTIVAS

Deve ter uma massa aproximada de no máximo 30 kg, de modo que seja possível ser carregado por apenas uma pessoa normal.

Deverá caber (desmontado ou não) sobre um bagageiro de um veículo comum (carro de passeio) ou porta-malas, dispensando a utilização de carretas especiais para transportá-lo.

2.3 - SÍNTESE DE SOLUÇÕES

Faremos agora um estudo das possíveis soluções para cada função desempenhada.

2.3.1 - SUSTENTAÇÃO

2.3.1.a - Casco simples (monocasco), com ou sem casco lateral auxiliar:

2.3.1.a.a - tipo caiaque fechado

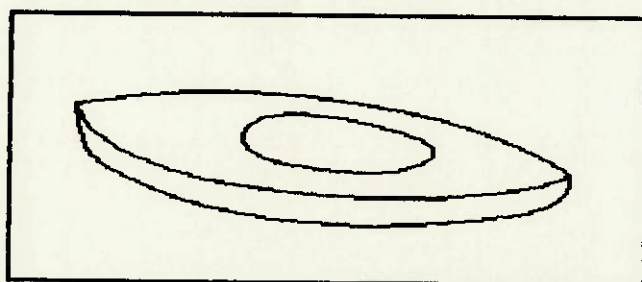


Figura 2.3.1 - Monocasco tipo caiaque.

2.3.1.a.b - tipo prancha

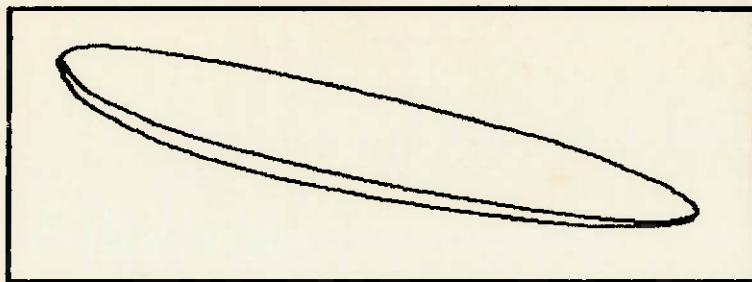


Figura 2.3.2 - Monocasco tipo prancha.

2.3.1.a.c - tipo caiaque aberto ("wave")

2.3.1.b - Casco duplo:

2.3.1.b.a - tipo Hobie Cat

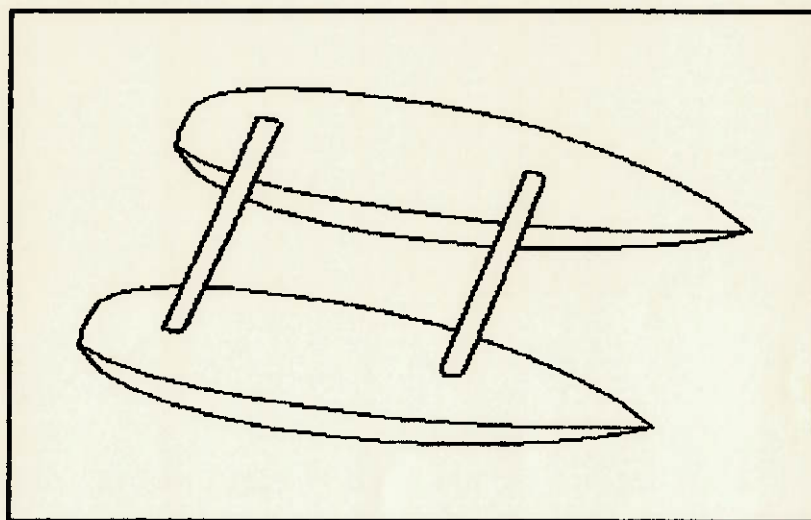


Figura 2.3.3 - Casco duplo tipo Hobie Cat.

2.3.1.b.b - tipo prancha

2.3.1.c - Casco de sustentação submerso (para diminuir o arrasto de formação de ondas).

Deve-se observar que o efeito de quilha é indispensável em qualquer um dos casos acima.

2.3.2 - SISTEMA DE PROPULSÃO

2.3.2.a - Hélice comum

2.3.2.b - Hélice especial que se abre por ação da força centrífuga ou pelo próprio empuxo criado. Objetivo de reduzir a força resistente quando se para de pedalar.

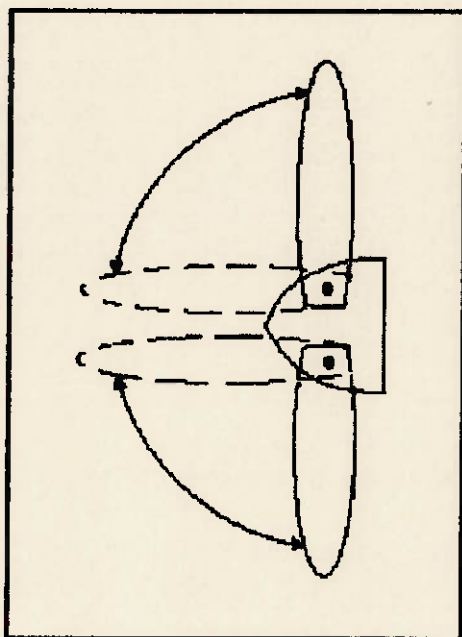


Figura 2.3.4 - Hélice com pás pivotadas.

2.3.2.c - Hélice de passo regulável

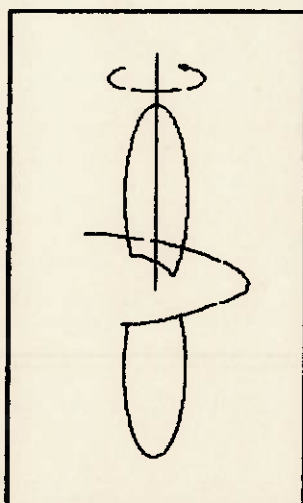


Figura 2.3.5 - Hélice de passo regulável.

2.3.2.d - Roda de pás comuns

2.3.2.e - Roda de pás especiais, com pás pivotadas. Permite o alinhamento da pá com o fluxo enquanto não se esta pedalando.

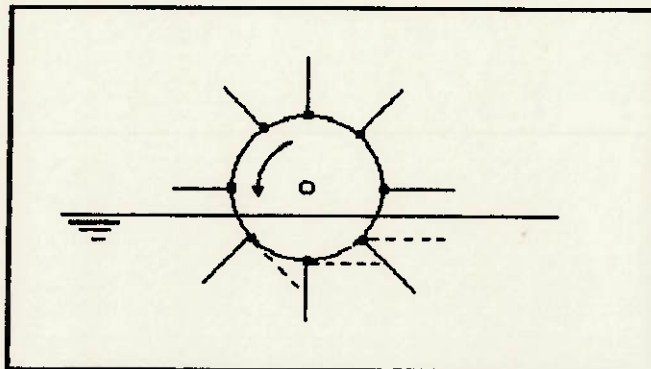


Figura 2.3.6 - Roda de pás pivotadas.

2.3.2.f - A jato de ar

2.3.2.f.a - com compressor de palhetas (com ou sem reservatório de ar)

2.3.2.f.b - com compressor de êmbolo (com ou sem reservatório de ar)

2.3.2.g - Hidrojato

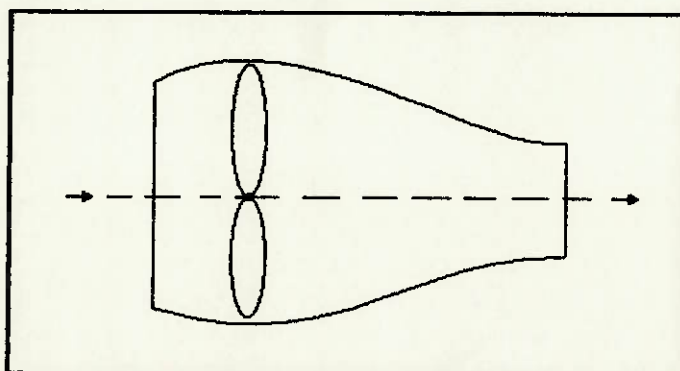


Figura 2.3.7 - Hidrojato.

2.3.2.h - Duas hélices em contra rotação

2.3.2.i - Hélice com sistema de catraca (tipo bicicleta) de modo a deixá-la livre quando se para de pedalar.

2.3.3 - POSIÇÃO DO OPERADOR (sempre olhando para frente)

2.3.3.a - pedalando com as pernas na vertical, como uma bicicleta comum.

2.3.3.b - pedalando com as pernas na horizontal (permite um CG mais baixo e maior conforto com o uso de encosto para as costas). Podemos ainda acrescentar a possibilidade de ajuste da inclinação do encosto e da distância aos pedais.

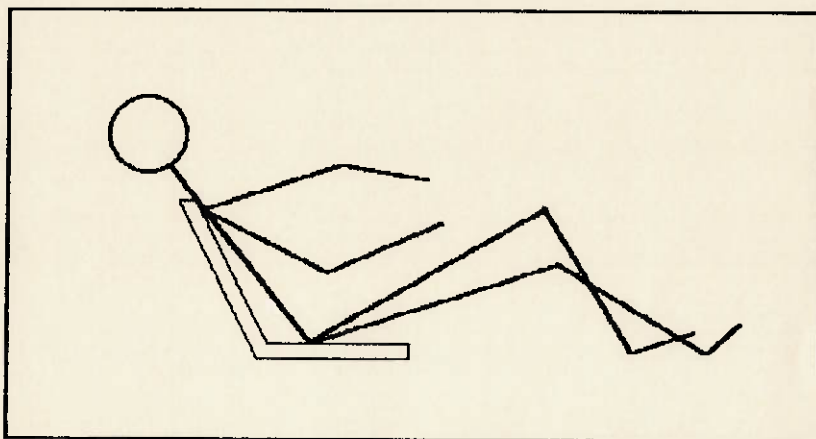


Figura 2.3.8 - Pedalando com as pernas na horizontal.

2.3.4 - MECANISMO DE MOVIMENTAÇÃO DO PEDAL

2.3.4.a - rotativo (bicicleta)

2.3.4.b - alternativo (quadrilátero articulado)

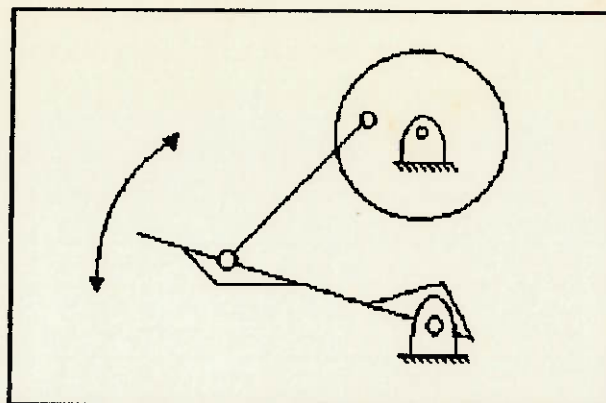


Figura 2.3 9 - Movimento alternativo do pedal (quadrilátero articulado).

2.3.5 - SISTEMAS AUXILIARES OPCIONAIS PARA REDUÇÃO DO ARRASTO EM ALTA VELOCIDADE

2.3.5.a - hidrofólio (tipo asa de avião)

2.3.5.b - hélice horizontal acionada e imersa na água (tipo helicóptero)

2.3.5.c - hélice livre em auto-giro, também imersa na água (tipo girocóptero)

2.3.5.d - casco com poros para succionar a camada limite laminar, evitando a sua dispersão

2.3.5.e - casco com poros, dentro do qual injeta-se ar, de modo a fazê-lo deslizar em um meio aerado.

2.3.6 - SISTEMA DE DIREÇÃO

2.3.6.a - por leme

2.3.6.b - por direcionamento do sistema propulsor

2.3.6.c - por direcionamento do jato de água emergente (caso do hidrojato)

2.3.6.d - por "flaps" nos hidrofólios

2.3.7 - SUBSISTEMA DE TRANSMISSÃO

2.3.7.a - por correia

2.3.7.b - por corrente

2.3.7.c - por engrenagens

2.3.7.d - "harmonic drive"

2.3.7.e - associação de alguns desses, com ou sem marchas.

2.4 - VIABILIDADE FÍSICA

2.4.1 - EQUACIONAMENTO GERAL

Apresenta-se a seguir um modelo do veículo com os esforços atuantes, para termos uma confirmação da viabilidade física.

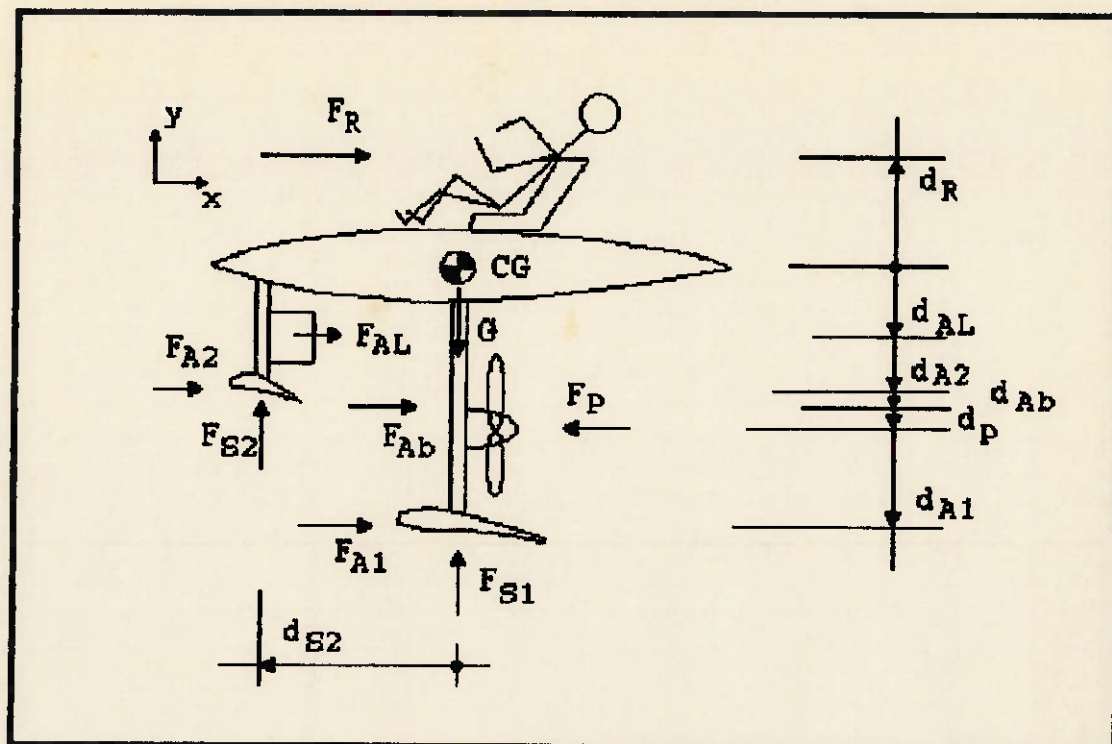


Figura 2.4.1 - Esquema de uma possível concepção e seus esforços atuantes.

Seja ϵ o desalinhamento entre a linha de ação das forças F_{S1} e G ($\epsilon \approx 150$ mm). Então, para as condições de equilíbrio estático, temos:

$$\oint \Sigma M_{CG} = 0 \quad (I)$$

$$F_{S2} d_{S2} + F_R d_R + F_P d_P = F_{Ab} d_{Ab} + F_{AL} d_{AL} + F_{A2} d_{A2} + F_{A1} d_{A1} + F_{S1} \epsilon$$

$$\oint \Sigma F_x = 0 \quad (II)$$

$$F_P = F_R + F_{A1} + F_{A2} + F_{AL} + F_{Ab}$$

Onde:

$$F_R = 1/2 \rho_{ar} v^2 A_{fora} d'água C_a$$

Analogamente a Ref. [1], podemos estimar a área fora d'água em aproximadamente $0,50 \text{ m}^2$ e o coeficiente de arrasto aerodinâmico em $1,10$ aproximadamente.

$$F_A = 1/2 \rho_{\text{água}} v^2 b l c_x$$

$$\oint \Sigma F_y = 0 \quad (\text{III})$$

$$F_{S1} + F_{S2} = G$$

Onde:

$$F_S = 1/2 \rho v^2 b l c_z$$

Sendo:

- b envergadura
- l corda
- c_x e c_z dependem do perfil escolhido e do ângulo de ataque.

Adotando valores, vem:

2.4.1.a - Forças de sustentação

$$A1 = A2/10$$

Perfil N.A.C.A. 0009, $\lambda = \infty$ (Ref. [2])

$$i = 8,2^\circ \quad \oint c_x = 0,0104; \quad c_z = 0,825$$

Velocidade de 5 m/s

$$G = 110 \text{ kgf} = 1078 \text{ N}$$

Sustituindo em (III) resulta em $A1 = 0,0951 \text{ m}^2$.

Se $b1 = 1,60 \text{ m}$, então $l1 = 0,059 \text{ m}$ (OK! viável!).

2.4.1.b - Forças de arrasto

Desprezando o arrasto do leme e da barra principal, vem:

$$F_{A1} = 11,2 \text{ N} \sim 1,1 \text{ kgf}$$

$$F_{A2} = 1,1 \text{ N} \sim 0,11 \text{ kgf}$$

Com densidade do ar igual a $1,2 \text{ kg/m}^3$, temos $F_r = 8,25 \text{ N} \sim 0,84 \text{ kgf}$.

Aplicando-se um coeficiente de segurança de 30% para as forças de arrasto submersas, vem:

$$F_{\text{resistente total}} = 24,2 \text{ N} \sim 2,5 \text{ kgf}$$

Portanto $P \geq 24,2 \text{ N}$, o que é facilmente produzido por uma hélice!

2.4.1.c - Verificação do equilíbrio de momentos

Adotando-se ainda os seguintes valores:

$$d_{g2} = 1,4 \text{ m}$$

$$d_r = 0,50 \text{ m}$$

$$d_{A1} = 1,00 \text{ m}$$

$$d_{A2} = 0,50 \text{ m}$$

$$\epsilon = 0,15 \text{ m}$$

E substituindo-os em (I), resulta:

$$d_p = 0,86 \text{ m} \quad (\text{OK!})$$

2.4.1.d - Potência Desenvolvida ($v = 5 \text{ m/s}$)

$$W = P v = 24,2 \cdot 5 = 121,0 \text{ watts}$$

Considerando-se um rendimento total de 65%, então a potência fornecida pelo operador será de 186 watts, o que é perfeitamente possível de uma pessoa normal fornecer.

2.4.1.e - Ensaio de desempenho em velocidade cruzeiro

Estimando-se uma velocidade cruzeiro de $1,7 \text{ m/s}$, e para os mesmos valores já estimados anteriormente, vem:

• potência fornecida máxima = 90,7 watts (resultado de ensaio realizado, ver anexo B)

Considerando-se um rendimento de 65%, temos:

- potência desenvolvida máxima = 59,0 watts
- propulsão necessária máxima = 34,7 N

Calculando-se os novos valores das forças atuantes, vem:

$$F_r = 1,0 \text{ N}$$

$$F_r + (F_{A1} + F_{A2}) 1,3 = 34,7 \quad \text{e} \quad F_{A1} = 23,6 \text{ N e } F_{A2} = 2,4 \text{ N}$$

$$1/2 \rho_{\text{água}} A_1 c_x v^2 = 23,6 \quad \text{e} \quad c_x = 0,17$$

Para o mesmo perfil de asa temos que $c_{x.\text{máximo}} = 0,025 < 0,17$, (tal que ainda tenha sustentação) e $i_{\text{máximo}} = 13,8^\circ$ com $c_{z.\text{máximo}} = 1,35$. Portanto:

$$F_{S1} = 185,4 \text{ N e } F_{S2} = 18,5 \text{ N} \quad \text{e} \quad F_{S.\text{total}} = 203,9 \text{ N} < 1078 \text{ N}$$

Portanto devemos acrescentar um hidrofólio auxiliar para sustentar os 1078 N.

$$F_{S.\text{aux}} + F_{S1} + F_{S2} = 1078 \quad \text{e} \quad F_{S.\text{aux}} = 874,1 \text{ N}$$

Para $c_z = 1,35$, tem-se $A_{\text{aux}} = 0,448 \text{ m}^2$.

$$\text{Se } b_{\text{aux}} = 2,0 \text{ m} \quad \text{e} \quad l_{\text{aux}} = 0,224 \text{ m} \quad (\text{OK!})$$

$$\text{e } F_{A.\text{aux}} = 16,2 \text{ N}$$

Nestas condições:

$$F_{\text{resistente total}} = 22,2 \text{ N} < 34,7 \text{ N} \quad (\text{OK!})$$

$$W_{\text{desenvolvida}} = 37,7 \text{ watts} < 59,0 \text{ watts} \quad (\text{OK!})$$

2.4.1.f - Ensaio Dinâmico a partir do repouso

$$\Sigma F = m a$$

Sendo a força resultante na direção x igual ao empuxo líquido resultante, vem:

Para conseguirmos sair do repouso ($v=0$) e atingirmos o ponto de decolagem ($v_d=v_c=1,7$ m/s) com um deslocamento de 15 m, considerando o empuxo líquido resultante constante nesse intervalo, teremos:

$$\text{MRUV: } v^2 = v_0^2 + 2 a \Delta s$$

Substituindo os valores vem:

$$a = 0,10 \text{ m/s}^2$$

$$E_1 = 11,0 \text{ N}$$

De cálculos anteriores temos que para a situação de velocidade cruzado a força resistente total é de 22,2 N. Logo o empuxo ou força motriz deverá ser $E_1 + F_{\text{resistente total}}$:

$$E_{\text{total}} = 33,2 \text{ N} \quad \text{e} \quad W_d = 56,4 \text{ watts}$$

Considerando-se um rendimento de 60%, vem:

$$W_{\text{fornecida}} = 94 \text{ watts} \quad (\text{para decolagem em 15 metros})$$

O tempo gasto para atingir tal situação será:

$$\Delta s = v_0 t + 1/2 a t^2$$

$$\text{e} \quad t = 17,32 \text{ s}$$

Portanto será possível de ser fornecido por uma pessoa normal. (OK!)

2.5 - VIABILIDADE ECONÔMICA

Apresentam-se a seguir os custos componentes do preço no varejo do conjunto.

Considerações:

Flutuadores (80% caiaque médio)	◇	90,40 US\$
Quadro, assento e direção (60% bicicleta média)	◇	95,60 US\$
Hidrofólios	◇	130,00 US\$
Hélice	◇	160,00 US\$
TOTAL		476,00 US\$

Visto que um "Laser" custa hoje US\$ 1.000,00 e um caiaque tipo "Wave Ski" chega até a US\$ 320,00 , o preço estimado poderá ser bastante competitivo. Ou ainda basta dizer que um par de "ski" custa por volta de US\$ 500,00.

2.6 - VIABILIDADE FINANCEIRA

Os investimentos iniciais necessários para a produção deste veículo dependerá das instalações já existentes na firma que irá fabricá-lo. De qualquer modo, o capital empatado poderá ser minimizado levando-se em conta as disponibilidades da empresa em produzir internamente certos componentes do produto e encomendar outros itens à alguma empresa mais bem equipada para tal.

Serão indispensáveis ao fabricante máquinas convencionais como furadeira, serra de fita, dobradeira, eletrodos de soldagem e ferramentas manuais.

Portanto o produto será viável financeiramente até mesmo para uma empresa de pequeno porte, desde que em boa situação!

3 - PROJETO BÁSICO

A modelagem matemática será a seguir apresentada juntamente com a escolha da melhor solução e os resultados obtidos da análise de sensibilidade e compatibilidade e seus respectivos parâmetros ótimos adotados.

3.1 - ESCOLHA DA MELHOR SOLUÇÃO / MODELAGEM MATEMÁTICA

3.1.1 - POSIÇÃO DO OPERADOR / QUADRO

A posição do operador foi escolhida de modo a proporcionar-lhe a máxima comodidade, possibilitando ainda exercer um esforço maior que seu próprio peso.

As medidas mostradas na figura abaixo foram baseadas na bicicleta ergométrica da TAURUS, a qual colocada em teste no CEPEUSP, mostrou ser uma posição ergomômica para a grande maioria de seus usuários.

O comprimento da pedivela adotado será o comprimento padrão de 170 mm.

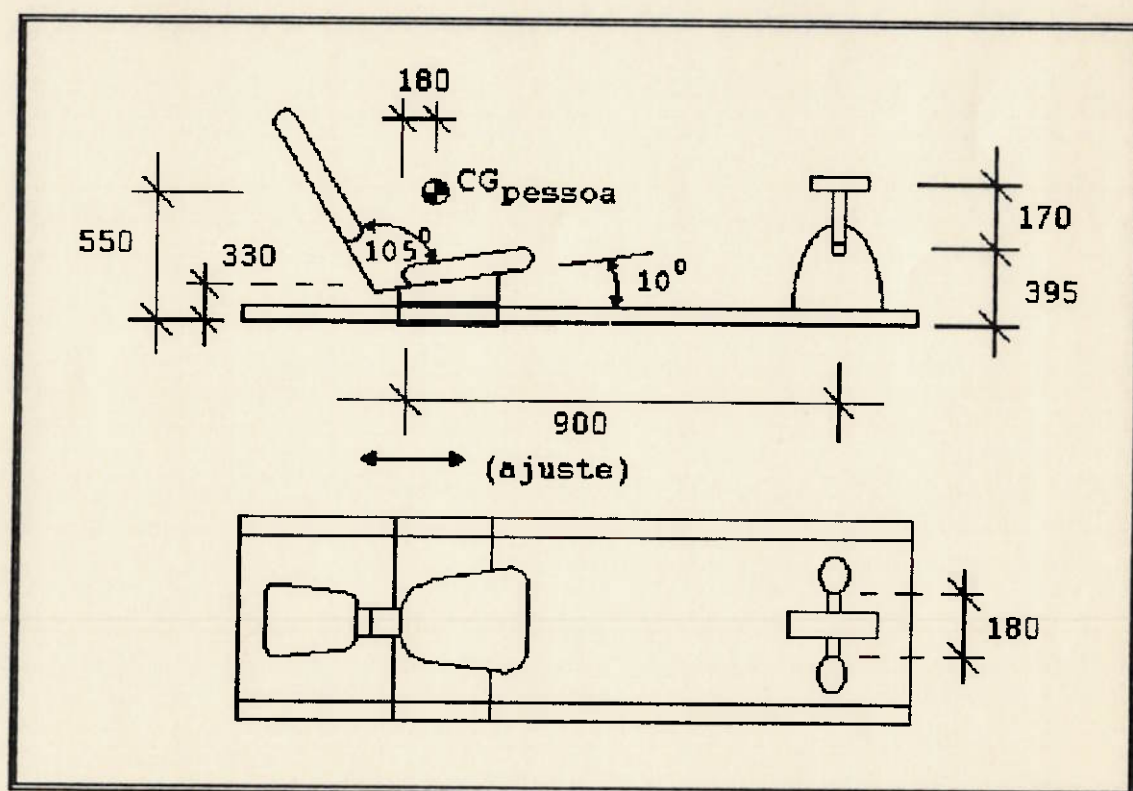


Figura 3.1.1 - Posição do operador / quadro.

3.1.2 - PERFIL E VOLUME DOS FLUTUADORES

Adotaremos dois flutuadores dispostos longitudinalmente (tipo "Hobbie Cat") de modo a proporcionar boa estabilidade com reduzida superfície molhada relativamente ao tipo monocasco (para uma mesma estabilidade). O perfil será de secção longitudinal parabólico em sua parte inferior e reto em sua parte superior, e ainda de secção transversal circular (como mostrado na figura abaixo). Assim obteremos facilidades construtivas e de equacionamento, além de que para um perfil longo e estreito poderemos chegar em uma forma bastante hidrodinâmica.

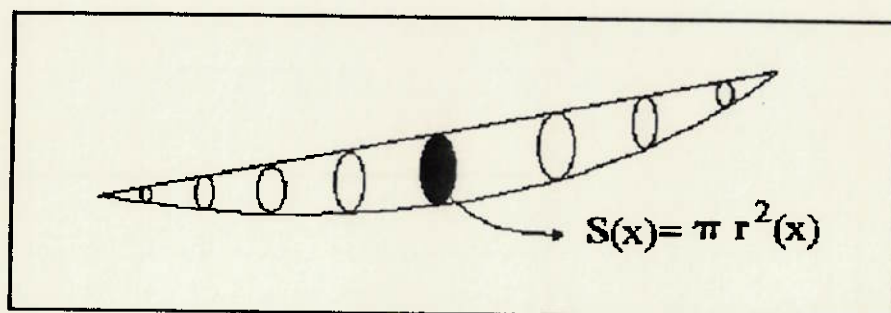


Figura 3.1.2 - Esquema do flutuador adotado.

O volume dos flutuadores deverá ser o mínimo necessário para permitir a flutuação do equipamento e operador juntos, além de oferecer um volume reserva para restauração do equilíbrio do conjunto após alguma perturbação externa (por exemplo, ventos laterais).

Modelagem matemática dos flutuadores:

Seja h a espessura ou diâmetro máximo do flutuador e L o comprimento total do mesmo. Assim teremos a seguinte figura:

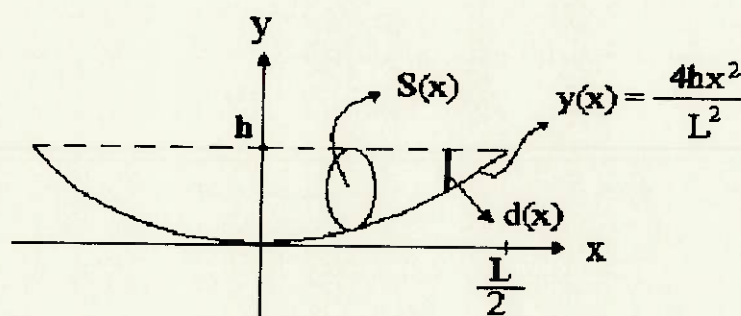


Figura 3.1.3 - Secção longitudinal do flutuador.

$$d(x) = h - y(x) = h - 4hx^2/L^2$$

$$d(x) = h(1 - 4x^2/L^2)$$

$$S(x) = \pi d^2(x)/4 = \pi h^2/4 (1 - 8x^2/L^2 + 16x^4/L^4)$$

O volume total de cada flutuador será dado por:

$$V_t = 2 \int_0^{L/2} S(x) dx \quad \blacklozenge \quad V_t = 2\pi h^2 L/15$$

E a área superficial total de cada flutuador por:

$$A_s = 2 \int_0^{L/2} \pi d(x) dx \quad \blacklozenge \quad A_s = 2\pi h L/3$$

Podemos ainda escrever o volume de água deslocado pelo flutuador ("D") e sua respectiva área molhada ($A_{molhada}$), ambos em função do nível de flutuação "b", tal como segue:

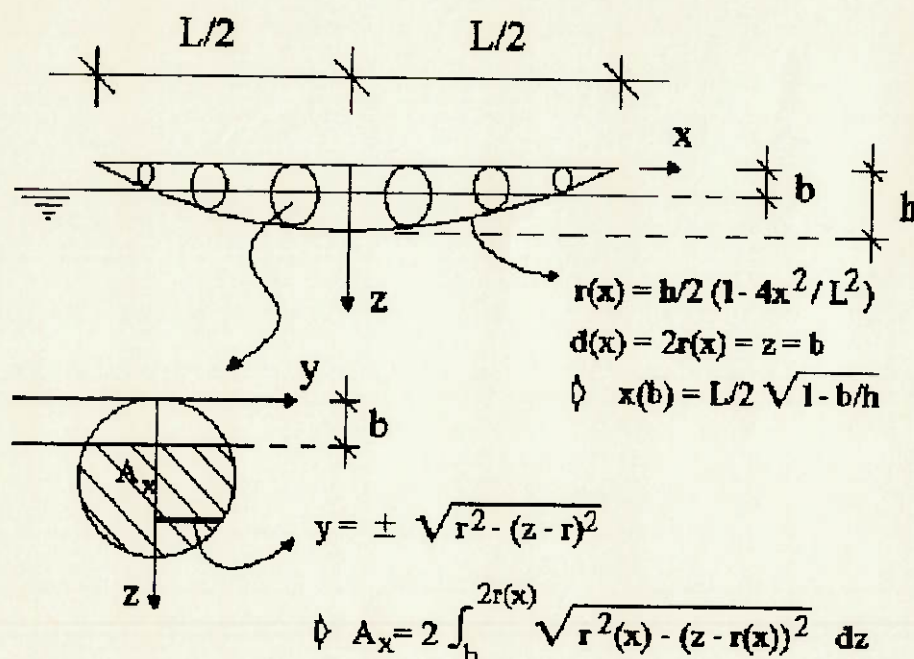


Figura 3.1.4 - Secções longitudinal e transversal do flutuador.

$$\blacktriangleright D(b) = 2 \int_0^{x(b)} A_x dx$$

Para a área molhada, temos:

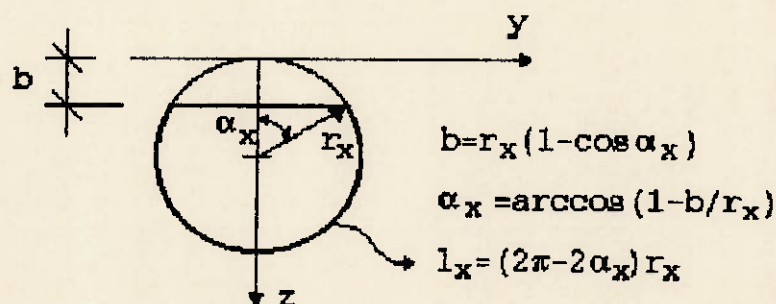


Figura 3.1.5 - Secção transversal do flutuador.

$$\blacktriangleright A_{\text{molhada}}(b) = 2 \int_0^{x(b)} l_x dx$$

Podemos ainda reescrever a área da secção transversal em função de x e de b como sendo:

$$A(x, b) = \pi d(x)^2 / 4 (1 - \alpha_x / \pi) + [2r(x)b - b^2]^{1/2} [r(x) - b]$$

Escolha do Perfil:

$$\rho = m / V$$

$$E = \text{peso do volume de água deslocado} = m_a g = \rho_a V_a g$$

$$E = P_{\text{total}} = P_{\text{homem}} + P_{\text{aparelho}} + P_{\text{reserva de equilíbrio}}$$

$$E = 85 + 30 + 10 = 125 \text{ kgf}$$

$$\rho_{\text{água}} = 1023,2 \text{ kg/m}^3 \quad (25^\circ\text{C}, 3,5\% \text{ salinidade})$$

$$\text{Portanto } 125 = 1023,2 V_a \quad \blacktriangleright V_a = 0,122 \text{ m}^3$$

Logo para cada flutuador $V_t = V_a/2 = 0,0611 \text{ m}^3$

E o volume de água deslocado por cada flutuador quando o equipamento em repouso será de $115/1023,2 = 0,0562 \text{ m}^3$.

No caso de embarcações a resistência total ao avanço é a soma das seguintes parcelas:

- resistência devido ao atrito do casco na água;
- resistência de "forma", também chamada de resistência devida à formação de ondas;
- resistência devida à ação do ar nos pontos da embarcação situados acima do plano de flutuação (geralmente a de menor efeito).

O perfil dos flutuadores deverá minimizar a resistência por atrito e a devida à forma do mesmo.

Podemos admitir que a primeira parcela possa ser calculada com base na teoria da camada limite sobre placa plana e que a segunda parcela, para uma mesma forma, seja apenas função do número de Froude.

Assim, para a resistência devido ao atrito dos flutuadores, temos as seguintes expressões:

$$ca_{flu} = 1.328/\sqrt{R} \quad (\text{para regime laminar, ou seja } R < 5 \cdot 10^5)$$

$$ca_{flu} = 0.074/R^{(1/5)} - 1742.64/R \quad (\text{para regime turbulento, ou seja, } R > 5 \cdot 10^5)$$

$$\text{Onde } R = v l / \nu$$

$$\nu_{\text{água}} = 0,94252 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s} \quad (25^\circ\text{C}, 3,5\% \text{ salinidade})$$

E a força de atrito total nos dois flutuadores será dada por:

$$F_{at_flu} = \rho v^2 A_{molhada} ca_{flu}$$

O cálculo da resistência devido à formação de ondas não será efetuado, pois este necessita que seja realizado um ensaio em um modelo de mesma forma e com igual número de

Froude, o que não foi possível de se fazer neste presente projeto. Por outro lado, encontra-se em livros, gráficos que mostram a variação do coeficiente de arrasto de forma em função do número de Froude para vários perfis de navio parametrizados segundo alguns coeficientes. Nesse trabalho foi utilizado alguns gráficos dessa natureza (disponíveis no anexo C) extraídos da Ref. [3]. Nestes gráficos podemos perceber que o coeficiente de arrasto tende a "disparar" após certo Froude, portanto se conseguirmos limitar o número de Froude até esse valor crítico, estaremos minimizando a resistência causada por esse efeito. Nota-se ainda que quanto maior a relação $L/D^{(1/3)}$, menor o coeficiente de arrasto residual para um mesmo φ ($\varphi = D/(A_x L)$), e que quanto menor o coeficiente φ , menor o referido coeficiente de arrasto para um dado $L/D^{(1/3)}$, até certo valor do número de Froude, onde, a partir daí a situação se inverte e o coeficiente de arrasto tende a "disparar".

Devemos portanto adotar um perfil com elevado $L/D^{(1/3)}$, sem contudo prejudicar o desempenho do mesmo quanto à resistência devida ao atrito, isto é, devemos tomar o cuidado para não aumentarmos a área molhada desnecessariamente.

Cálculo da resistência do ar:

$$F_{\text{resist_ar}} = 1/2 \rho_{\text{ar}} v^2 S_{\text{ar}} c_{\text{a_ar}}$$

$$\rho_{\text{ar}} = 1,17 \text{ kg/m}^3 \quad (25^\circ\text{C}, 1 \text{ atm})$$

Segundo Ref. [1], podemos considerar $c_{\text{a_ar}} = 1,1$ e $S_{\text{ar}} = 0,5 \text{ m}^2$.

3.1.3 - DIMENSIONAMENTO DOS HIDROFÓLIOS

Os hidrofólios têm a função de sustentar todo o conjunto quando este atingir certa velocidade, permitindo um melhor desempenho do aparelho em velocidades elevadas, onde a resistência dos flutuadores devido à forma tenderia a aumentar consideravelmente.

Nesse projeto, utilizaremos dois hidrofólios (dianteiro e traseiro) cada qual suportando metade do peso de todo conjunto homem+máquina. Adotaremos uma disposição em "V", fazendo com que a área imersa na água diminua à medida que se ganhe velocidade permanecendo apenas a área necessária para equilibrar a força peso. Conferimos ainda assim maior estabilidade contra o tombamento para a embarcação, pois qualquer inclinação lateral

ocasionará uma força restauradora nos hidrofólios, tendendo ao conjunto voltar à posição vertical. Caso a proa ou a popa esteja mais carregada, então a parte mais pesada ficará mais imersa na água e portanto teremos maior área imersa desse hidrofólio e conseqüentemente maior força de sustentação, atingindo-se assim naturalmente uma posição de equilíbrio.

No dimensionamento propriamente dito dos hidrofólios, para maior simplificação dos cálculos serão desprezadas as perdas de eficiência devido ao efeito de formação dos chamados vórtices de ponta e também o efeito de velocidade induzida. Será adotado um perfil N.A.C.A. 4409 (Ref. [2]), que apresenta segundo seu gráfico de desempenho, mostrado no anexo C, uma relação máxima entre o coeficiente de sustentação (c_{z_h}) e o coeficiente de arrasto (c_{x_h}) de 91,66, a um ângulo de incidência de 6,3 graus e os respectivos coeficientes supracitados com valores de 1,000 e 0,01091.

$$F_{\text{sustentação_tras.}} = F_{\text{sustentação_diant.}} = 57,5 \text{ kgf}$$

$$F_{\text{sust_h.}} = 1/2 \rho v^2 S_h c_{z_h} \quad (\text{em cada hidrofólio})$$

$$F_{\text{arrasto_h.}} = 1/2 \rho v^2 S_h c_{x_h} \quad (\text{em cada hidrofólio})$$

Obs.: Deve-se observar que no caso de se utilizarmos hidrofólios em "V" a força de sustentação de cada lado do hidrofólio deverá ser decomposta em uma componente vertical (útil) e uma horizontal (que será anulada intrinsecamente).

O atrito da superfície dos hidrofólios com a água será analisado igualmente ao caso dos flutuadores, isto é, usaremos as mesmas expressões deduzidas para placa plana.

3.1.4 - DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA PROPULSOR

Como a aplicação do projeto exige que este seja bastante eficiente, a melhor alternativa é a de propulsão por hélice, pois assim poderemos chegar a um rendimento de aproximadamente 90%, o que não seria possível de se alcançar por meio das outras soluções propostas. Além do que estaremos minimizando o peso desse sistema. O fato das pás da hélice serem ou não "dobráveis" será decidido no projeto executivo, pois o método de cálculo será o mesmo em ambos os casos.

Para seu dimensionamento será utilizada a teoria de elemento de pá, também desprezando efeitos de vórtice de ponta, velocidade induzida e centrifugação nas pás. O atrito das pás na água também será desprezado.

A priori adotaremos uma hélice de duas pás e caso haja necessidade poderemos acrescentar uma ou mais pás. O perfil adotado será o N.A.C.A. 23009, $\lambda = \infty$ (Ref. [2]).

Modelagem matemática da hélice:

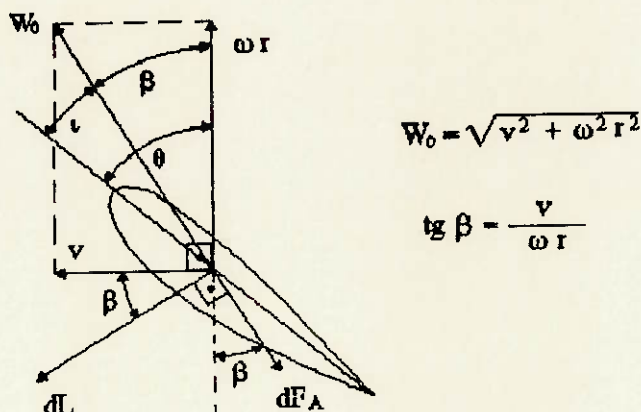


Figura 3.1.6 - Elemento de pá.

Adotando um ângulo de hélice tal que o ângulo de incidência (i) seja constante ao longo do raio, também teremos c_z e c_x constantes.

Segundo a figura 3.1.6, podemos definir o empuxo elementar e a resistência elementar como sendo:

$$dE = dL \cos \beta - dF_A \sin \beta = (c_z \cos \beta - c_x \sin \beta) \frac{1}{2} \rho W_0 ds$$

$$dR = dL \sin \beta + dF_A \cos \beta = (c_z \sin \beta + c_x \cos \beta) \frac{1}{2} \rho W_0 ds$$

Integrando-se as expressões anteriores ao longo de toda a superfície das pás da hélice podemos obter o empuxo total da hélice e o seu respectivo momento resistente.

3.1.5 - SISTEMA DE DIREÇÃO

Por facilidades construtivas e de manuseabilidade o sistema de direção será composto por um leme traseiro e uma quilha dianteira dentro da qual passará o sistema de transmissão. O leme e a quilha deverão ter um comprimento tal, que mesmo após a decolagem dos flutuadores, permitam uma boa dirigibilidade e baixa resistência hidrodinâmica.

Modelagem matemática da quilha e do leme:

A natureza das forças atuantes na quilha e no leme são idênticas às atuantes nos hidrofólios, assim as expressões e conceitos utilizados serão basicamente os mesmos.

Para essa aplicação empregaremos perfis N.A.C.A. 0015 (Ref. [2]), cujo gráfico de comportamento também se encontra no anexo C.

3.1.6 - SUBSISTEMA DE TRANSMISSÃO

A transmissão de movimento será feita através de corrente e de dois pares de engrenagens cônicas (preferivelmente de nylon) ligados através de um eixo. A corrente poderá ser de bicicleta normal ou então as de tipo silenciosas, as quais conferem maior rendimento ao sistema. De acordo com a necessidade para se atingir um elevado rendimento de propulsão da hélice nas diferentes velocidades de translação, adotaremos variadas relações de transmissão na corrente, utilizando-se de mecanismos semelhantes aos das bicicletas com marchas, pois quanto maior a velocidade, maior deverá ser a rotação da hélice para que se mantenha o mesmo rendimento.

3.2 - ANÁLISE DE SENSIBILIDADE

- Hélice: variando-se os parâmetros das expressões desenvolvidas para o dimensionamento da hélice verifica-se que quanto maior a relação c_z/c_x do perfil utilizado,

maior o rendimento máximo possível de se obter; e ainda que, quanto maior o diâmetro externo das pás, menor a rotação que fornece rendimento máximo para uma dada velocidade.

Nota-se também que a largura das pás pouco influencia no rendimento e no ponto ótimo de operação, mas mostra grande sensibilidade na força de propulsão desenvolvida, isto é, quanto maior a largura das mesmas, maior será o empuxo desenvolvido para um mesmo ponto de operação e conseqüentemente maior a potência necessária para acionamento da hélice.

3.3 - ANÁLISE DE COMPATIBILIDADE

A análise de compatibilidade impõe que:

- Potência no eixo do pedal = Potência desenvolvida / rendimento total
- Potência cruzeiro desenvolvida = Potência cruzeiro do operador x rendimento total
- Empuxo necessário = Força resistente total = Empuxo fornecido pela hélice
- Força de sustentação = Peso total = constante

Existem ainda restrições geométricas cuja compatibilidade foi sendo verificada simultaneamente com a determinação dos parâmetros ótimos.

3.4 - PARÂMETROS ÓTIMOS

Com a análise das expressões e gráficos levantados (ver anexo A) selecionou-se o seguinte conjunto de parâmetros ótimos:

3.4.1 - FLUTUADOR

Comprimento de cada flutuador (L) = 3,07 m

Espessura máxima de cada flutuador (h) = 0,218 m

Volume total de cada flutuador = $0,0611 \text{ m}^3$

3.4.2 - HIDROFÓLIOS

Perfil dos hidrofólios = N.A.C.A. 4409

Área total de cada hidrofólio (s) = $0,1518 \text{ m}^2$

Corda de cada hidrofólio (l_h) = $0,1 \text{ m}$

Envergadura total dos hidrofólios = $1,518 \text{ m}$

Ângulo de incidência dos hidrofólios (i) = $6,3 \text{ graus}$

Ângulo em "V" dos hidrofólios = 165 graus

3.4.3 - QUILHA E LEME

Perfil da quilha e do leme = N.A.C.A. 0015

Corda da quilha e do leme (l_q / l_l) = $0,2 \text{ m}$

Envergadura total da quilha e do leme = $0,718 \text{ m}$

3.4.4 - HÉLICE

Perfil das pás da hélice = N.A.C.A.23009

Ângulo de incidência das pás = 8 graus

Raio interno das pás (r_1) = $0,05 \text{ m}$

Raio externo das pás (r_2) = $0,12 \text{ m}$

Corda de base das pás (l_{base}) = $0,013 \text{ m}$

3.4.5 - RELAÇÃO DE TRANSMISSÃO

1.^a marcha = $1,0 : 21,1$

2.^a marcha = $1,0 : 32,3$

ANEXO A - Expressões e gráficos desenvolvidos.

A.1- FLUTUADORES E HIDROFÓLIOS

1: $g := 9.8 \text{ m/s}^2$

2: $\rho_o := 1023.2 \text{ kg/m}^3$

3: $\nu_i := 0.94252 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$

4: $l := 3.07 \text{ m}$

5: $h := 0.218 \text{ m}$

6: $cz_h := 1$

7: $cx_h := 0.01091$

8: $R(x) := \frac{h}{2} \left[1 - \frac{x^2}{l^2} \right]$

9: $\alpha(x) := \text{ACOS} \left[1 - \frac{b}{R(x)} \right]$

10: $LB(b) := l \sqrt{1 - \frac{b}{h}}$

11: $A_{SECCAO}(x, b) := \pi R(x)^2 \left[1 - \frac{\alpha(x)}{\pi} \right] + \sqrt{2 R(x) b - b^2}$

$\sim$
 $\sim) (R(x) - b)$
 $\sim$

12: $D(b) := 2 \int_0^{1/2 \sqrt{1 - b/h}} A_{SECCAO}(x, b) dx$

$$13: \Phi(b) := \frac{D(b)}{A_SECCAO(0, b) LB(b)}$$

$$14: A_MOLHADA(b) := 2 \int_0^{1/2 \sqrt{1 - b/h}} (2\pi - 2\alpha(x)) R(x) dx$$

$$\sim$$

$$\sim$$

$$\sim \text{CHI}(-0.000001, b, 0.218)$$

$$\sim$$

$$15: s := 0.1518$$

$$16: SH(b) := \frac{s \text{ STEP}(0.318 - b) + \left[1 - \frac{b - 0.318}{0.1}\right] s \text{ CHI}(0.318 - b)}{\cos(7.5^\circ)}$$

$$\sim$$

$$\sim 18, b, 0.418)$$

$$\sim$$

$$\sim$$

$$17: V_ANTES_DEC(b) := \sqrt{\frac{9.8}{cz_h SH(b)} \left[\frac{115}{ro} - 2 D(b) \right]} \text{ CHI}(0.023, b, 0.218)$$

$$\sim$$

$$\sim .023, b, 0.218)$$

$$\sim$$

$$18: V_APOS_DEC(b) := \frac{1.0495}{\sqrt{SH(b) \cos(7.5^\circ)}} \text{ STEP}(b - 0.218)$$

$$19: V(b) := V_ANTES_DEC(b) + V_APOS_DEC(b)$$

$$20: \text{REY (b)} := \frac{V (b) \text{ LB (b)}}{ni}$$

$$21: \text{FROUDE_SEM_H (velo)} := \frac{\text{velo}}{\sqrt{(g \ 2.9)}}$$

$$22: \text{CA_FLU (b)} := \frac{0.074}{\text{REY (b)}^{1/5}} - \frac{1742.64}{\text{REY (b)}}$$

$$23: \text{ca_med_flu} := 0.00315$$

$$24: \text{lh} := 0.1$$

$$25: \text{lq} := 0.2$$

$$26: \text{SQ (b)} := (0.718 - b) \text{ lq}$$

$$27: \text{cx_q} := 0.006$$

$$28: \text{ro_ar} := 1.17$$

$$29: \text{s_ar} := 0.5$$

$$30: \text{ca_ar} := 1.1$$

$$31: \text{R_H (b)} := \frac{V (b) \text{ lh}}{ni}$$

$$32: \text{R_Q (b)} := \frac{V (b) \text{ lq}}{ni}$$

$$33: \text{CA_H (b)} := \frac{1.328}{\sqrt{(\text{R_H (b)})}} \text{CHI} (0.023, b, 0.385) + \left[\frac{0.074}{\text{R_H (b)}^{1/5}} \right]$$

$$\left[\frac{1742.64}{R_H(b)} \right] \text{STEP}(b - 0.385)$$

$$34: \quad CA_Q(b) := \frac{1.328}{\sqrt{R_Q(b)}} \text{CHI}(0.023, b, 0.138) + \left[\frac{0.074}{R_Q(b)^{1/2}} \right]$$

$$\left[\frac{1742.64}{R_Q(b)} \right] \text{STEP}(b - 0.138)$$

$$35: \quad F_{AT_FLU}(b) := ro \, V(b)^2 \, A_MOLHADA(b) \, ca_med_flu$$

$$36: \quad F_{ARR_HID}(b) := ro \, V(b)^2 \, SH(b) \, cx_h$$

$$37: \quad F_{AT_HID}(b) := ro \, V(b)^2 \, SH(b) \, CA_H(b)$$

$$38: \quad F_{ARR_QUI}(b) := ro \, V(b)^2 \, SQ(b) \, cx_q$$

$$39: \quad F_{AT_QUI}(b) := ro \, V(b)^2 \, SQ(b) \, CA_Q(b)$$

$$40: \quad F_{ARR_AR}(b) := \frac{1}{2} \, ro_ar \, V(b)^2 \, s_ar \, ca_ar$$

$$41: \quad POT_NEC(b) := ro \, V(b)^3 \left[A_MOLHADA(b) \, ca_med_flu + SH(b) \right]$$

$$\sim \text{cx_h} + \frac{2 \cdot 1.328}{f \left[\frac{V(b)}{n_i} \right]} \left[\frac{SH(b)}{f_{lh}} \text{CHI}(0.023, b, 0.385) + \frac{SQ(b)}{f_{lq}} \right]$$

$$\sim \text{CHI}(0.023, b, 0.138) \left] + \frac{2 \cdot 0.074}{\left[\frac{V(b)}{n_i} \right]^{1/5}} \left[\frac{SH(b)}{f_{lh}^{1/5}} \text{STEP}(b) \right]$$

$$\sim - 0.385) + \frac{SQ(b)}{f_{lq}^{1/5}} \text{STEP}(b - 0.138) \left] - \frac{2 \cdot 1742.64}{V(b)} \left[\frac{SH(b)}{f_{lh}} \right]$$

$$\sim \text{STEP}(b - 0.385) + \frac{SQ(b)}{f_{lq}} \text{STEP}(b - 0.138) \left] + SQ(b) \text{cx_h}$$

$$\sim \text{q} + \frac{1}{2} \frac{ro_ar}{ro} s_ar \text{ca_ar} \left]$$

$$42: V_DEC(s) := \frac{1.0495}{f_B}$$

$$43: EMPUXO_NEC(b) := ro \cdot V(b)^2 \left[A_MOLHADA(b) \text{ca_med_flu} + SH(b) \right]$$

$$\sim \text{b) cx_h} + \frac{2 \cdot 1.328}{f \left[\frac{V(b)}{n_i} \right]} \left[\frac{SH(b)}{f_{lh}} \text{CHI}(0.023, b, 0.385) + \frac{SQ(b)}{f_{lq}} \right]$$

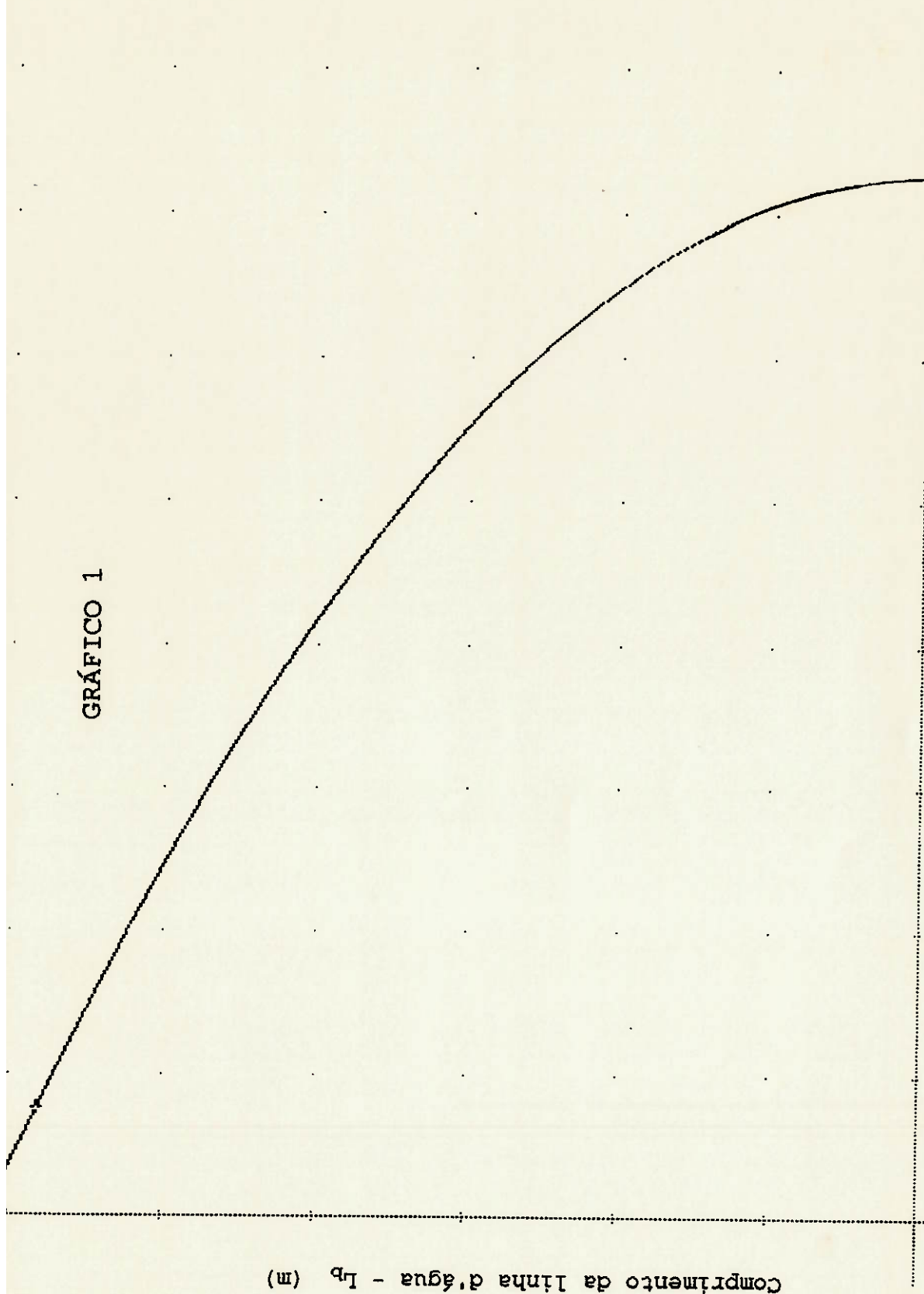
$$\sim \frac{(b)}{\sim l_q} \text{CHI} (0.023, b, 0.138) \Big] + \frac{2 \ 0.074}{\left[\frac{V(b)}{n_i} \right]^{1/5}} \left[\frac{SH(b)}{l_h^{1/5}} \text{STEP} \sim \right]$$

$$\sim (b - 0.385) + \frac{SQ(b)}{l_q^{1/5}} \text{STEP} (b - 0.138) \Big] - \frac{2 \ 1742.64}{\frac{V(b)}{n_i}} \left[\frac{SH}{\sim} \right]$$

$$\sim \frac{(b)}{\sim l_h} \text{STEP} (b - 0.385) + \frac{SQ(b)}{l_q} \text{STEP} (b - 0.138) \Big] + SQ(b) \sim$$

$$\sim cx_q + \frac{1}{2} \frac{ro_{ar}}{ro} s_{ar} ca_{ar} \Big]$$

GRÁFICO 1



Nível de flutuação - b (m)

Enter option

Cross x:0.0229

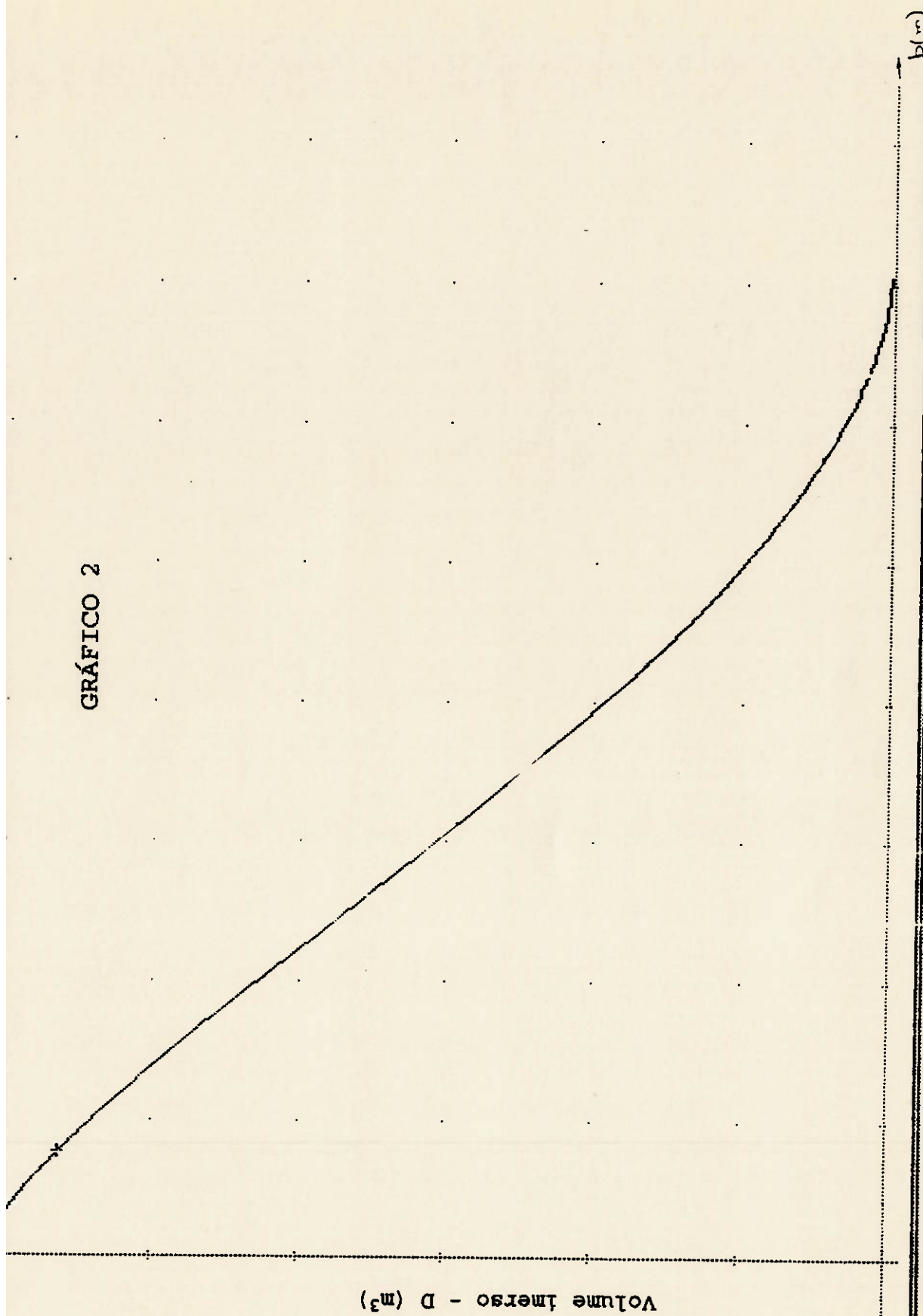
y:2.9842

Scale x:0.03

y:0.5

Derive 2D-plot

GRÁFICO 2



Nível de flutuação - b (m)

Enter option

Cross x:0.0229

y:0.3562

Scale x:0.03

y:0.01

Derive 2D-plot

GRÁFICO 3

Relação comprimento/volume - $L_p/D_{1/3}$

Nível de flutuação - b (m)

Dubious accuracy

99. 99. 99.

133

999

23
24
25
26

五、六、七、八、九

GRÁFICO 4

Coefficiente prismático - D/A_{xLp}



Nível de flutuação - b (m)

Enter option

Cross x:0.1000

y:0.575

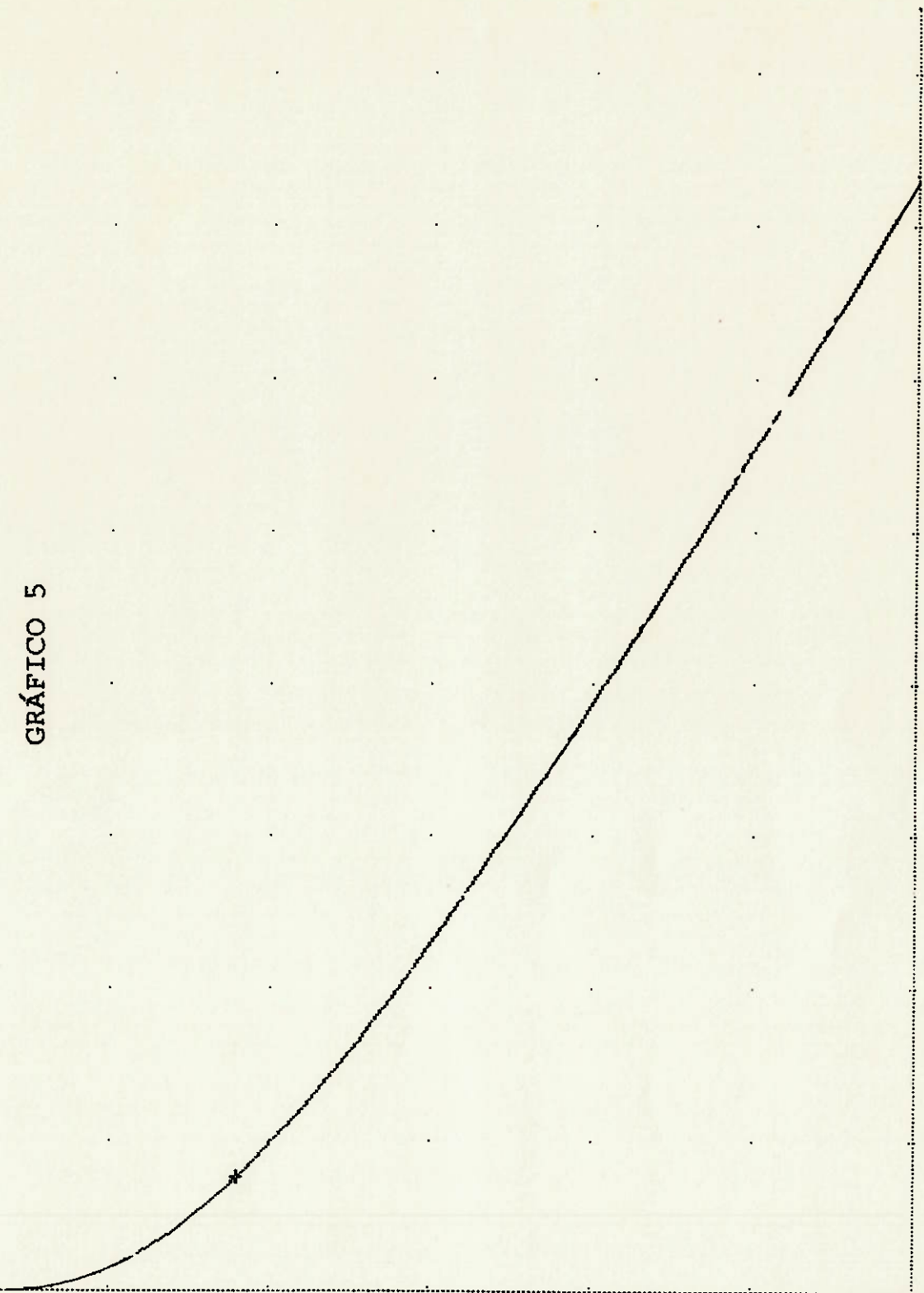
Scale x:0.03

y:0.2

Derive 2D-plot

GRÁFICO 5

Área molhada (m²)



Nível de flutuação - b (m)

Dubious accuracy

Cross x:0.9229

y:1.0507

Scale x:0.03

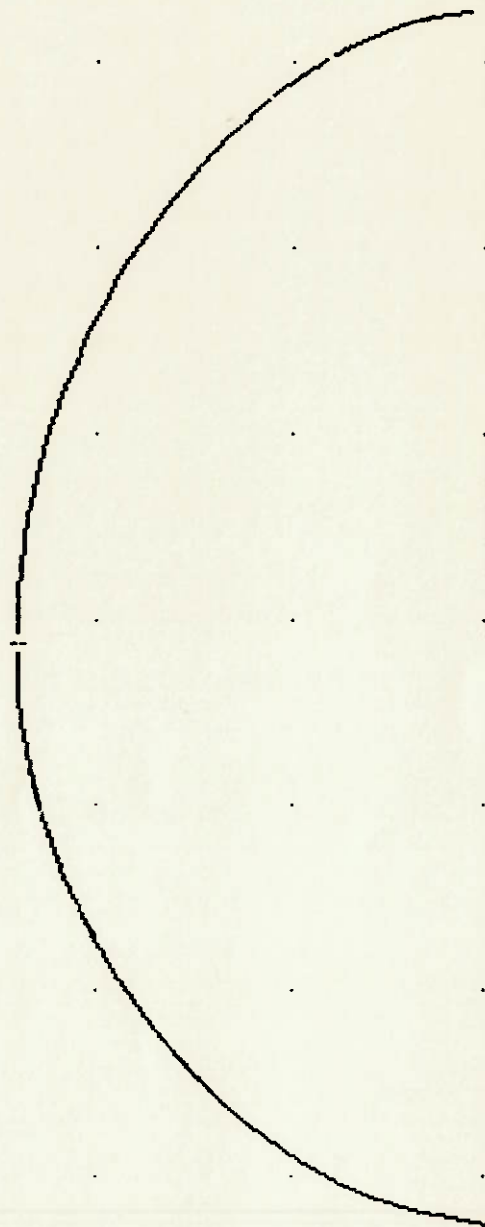
y:0.25

Derive 2D-plot

GRÁFICO 6

$l=3,07 \text{ m}$
 $h=0,218 \text{ m}$
 $S=0,15 \text{ m}^2$

Número de Reynolds



$L(m)$

Nível de flutuação - b (m)

Enter option

Cross x:0.1162

y:4.7012 10⁶ Scale x:0.03

y:2 10⁶

Derive 2D-plot

GRÁFICO 7

Número de Froude

$l=3,07 \text{ m}$
 $h=0,218 \text{ m}$
 $S=0,05 \text{ m}^2$

$L(\dots)$

Nível de flutuação - b (m)

Enter option

Cross x:0.0750

y:0.5625

Scale x:0.03

y:0.4

Derive 2D-plot

GRÁFICO 8

Número de Froude

$l=3,07 \text{ m}$
 $h=0,218 \text{ m}$
 $S=0,15 \text{ m}^2$

$U(w)$

Nível de flutuação - b (m)

Enter option

Cross x:0.0020

y:0.35

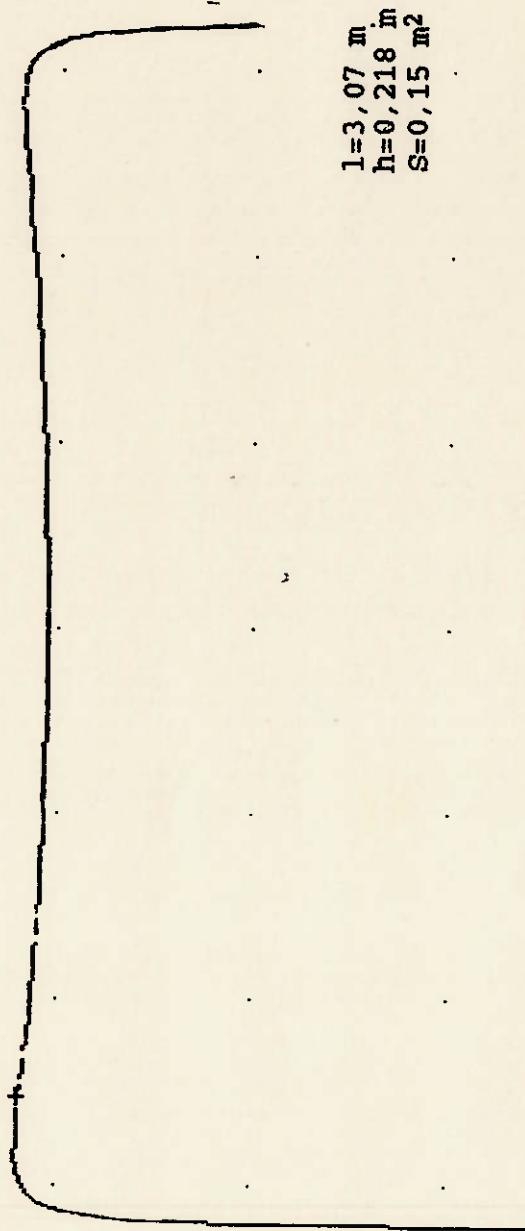
Scale x:0.03

y:0.4

Derive 2D-plot

GRÁFICO 9

Coefficiente de atrito dos flutuadores



Nível de flutuação - b (m)

Enter option

Cross x:0.0441

y:3.1075 10⁻³

Scale x:0.03

y:10⁻³

Derive 2D-plot

GRÁFICO 10.

Velocidade de decolagem (m/s)

Área de cada hidrofólio - S_h (m²)

Enter option

Cross x:0.15

y:2.7031

Scale x:0.01

y:0.25

Derive 2D-plot

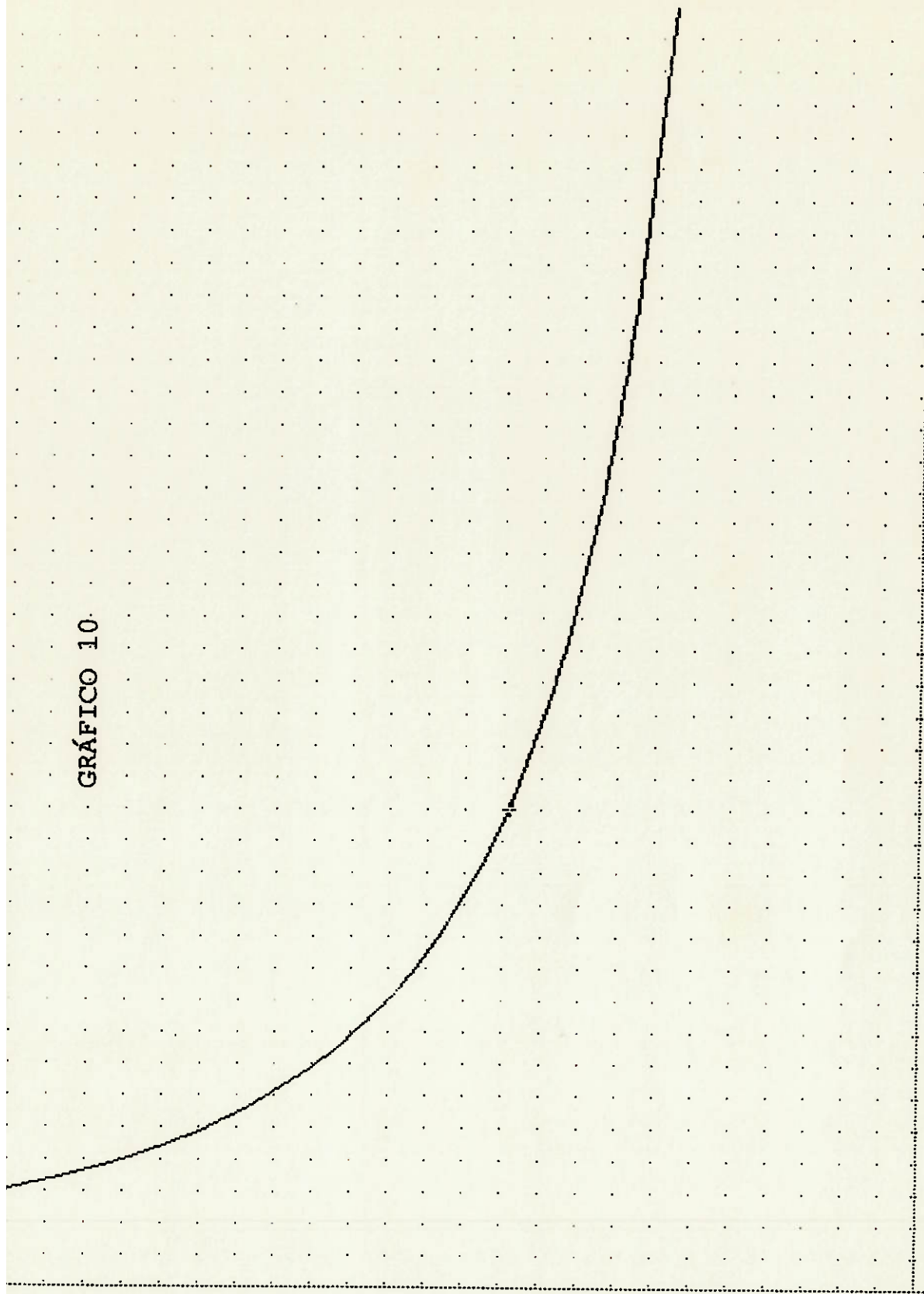
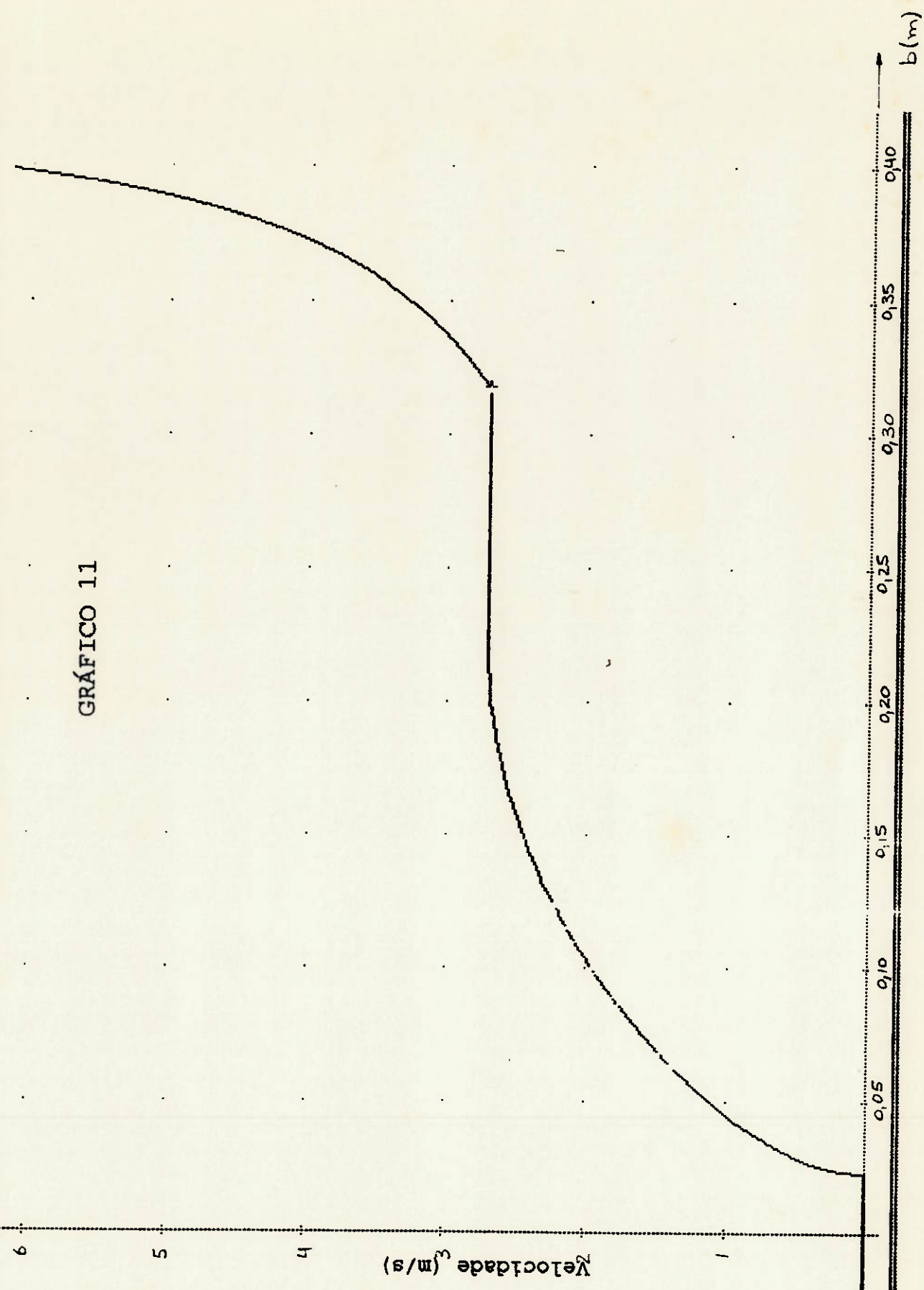


GRÁFICO 11



Nível de flutuação - b (m)

Enter option

Cross x: 0.310

11/2/2031

Scale x: 0.05

1:1

Series 2D-plot

GRÁFICO 12

Empuxo necessário (N)

b (m)

Nível de flutuação - b (m)

Enter option

Cross x:0.3180

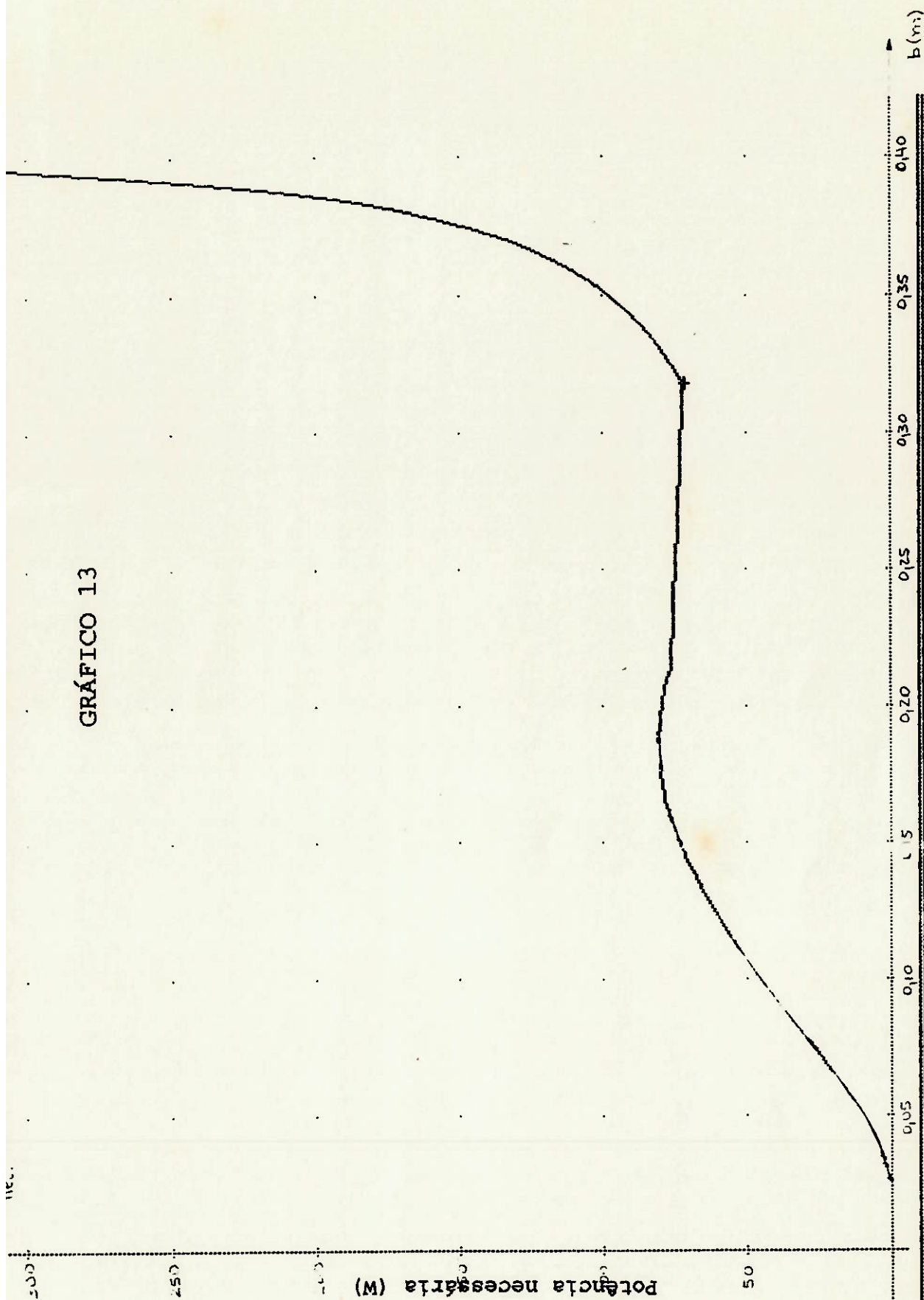
y:26.5625

Scale x:0.05

y:10

Derive 2D-plot

GRÁFICO 13



Nível de flutuação - b (m)

Enter option

Cross x:0.3180

y:71.0937

Scale x:0.05

y:50

Derive 20-plot

A.2 - HÉLICE DE GEOMETRIA VARIÁVEL

$$1: \quad r_o := 1023.2 \quad \text{kg/m}^3$$

$$2: \quad c_z := 0.9$$

$$3: \quad c_x := 0.0099$$

$$4: \quad L(r) := \frac{l_{\text{base}}(r_2 - r)}{r_2}$$

$$5: \quad v := 2.7 \quad \text{m/s}$$

$$6: \quad \text{EMPUXO}(v, w) := r_o \int_{r_1}^{r_2} L(r) \left[c_z \cos \left[\frac{v}{w r} \right] - c_x \sin \left[\frac{v}{w r} \right] \right] (v^2 + w^2 r^2) dr$$

$$7: \quad \text{MOMENTO}(v, w) := r_o \int_{r_1}^{r_2} L(r) \left[c_z \sin \left[\frac{v}{w r} \right] + c_x \cos \left[\frac{v}{w r} \right] \right] (v^2 + w^2 r^2) r dr$$

$$8: \quad \text{RENDIMENTO}(v, w) := \frac{100 v \text{ EMPUXO}(v, w)}{w \text{ MOMENTO}(v, w)}$$

$$9: \quad \text{POTENCIA}(v, w) := w \text{ MOMENTO}(v, w)$$

$$10: \quad r_1 := 0.05 \quad \text{m}$$

11: $r_2 := 0.12 \text{ m}$

12: $l_{\text{base}} := 0.013 \text{ m}$

13: $w := 144 \text{ rad/s}$

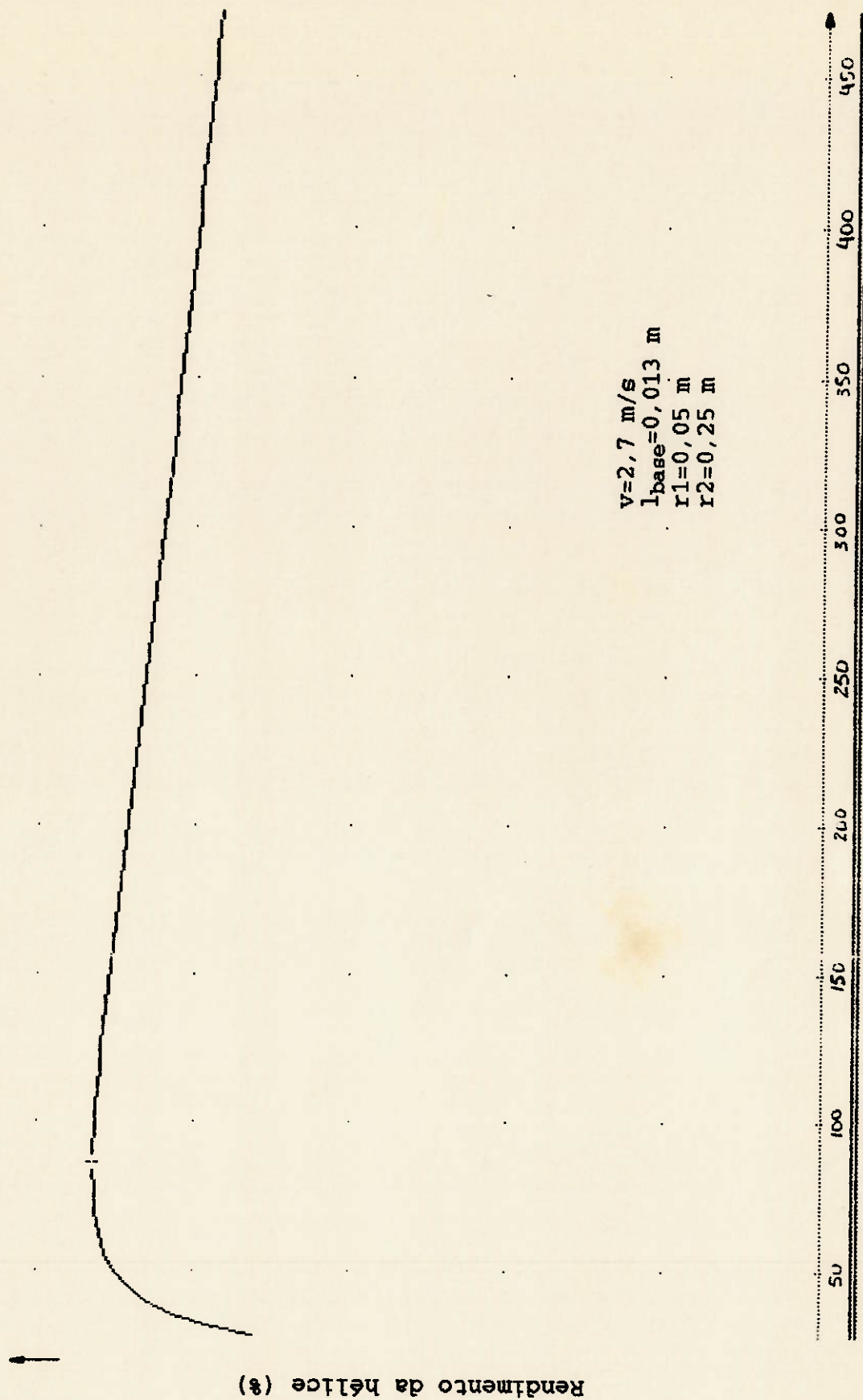
14: 29.3844 N

15: 0.590499 N.m

16: 93.3038%

17: 85.0318 W

GRÁFICO 14



Velocidade angular da hélice - ω (rad/s)

Enter option

Cross x:36.111

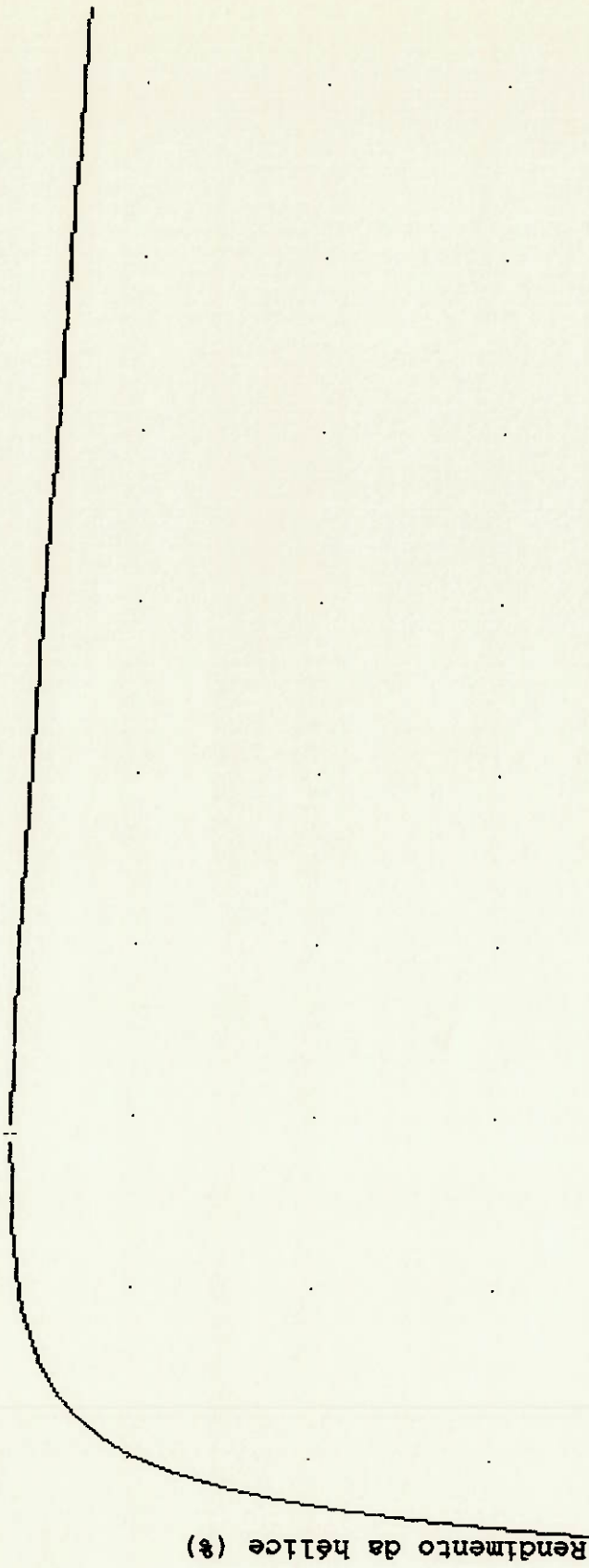
y:92.0125

Scale x:50

y:20

Derive 2D-plot

GRÁFICO 15



$v=2,7$ m/s
 $l_{base}=0,013$ m
 $r1=0,05$ m
 $r2=0,12$ m

Enter option

Cross x:144.444

y:90.4375

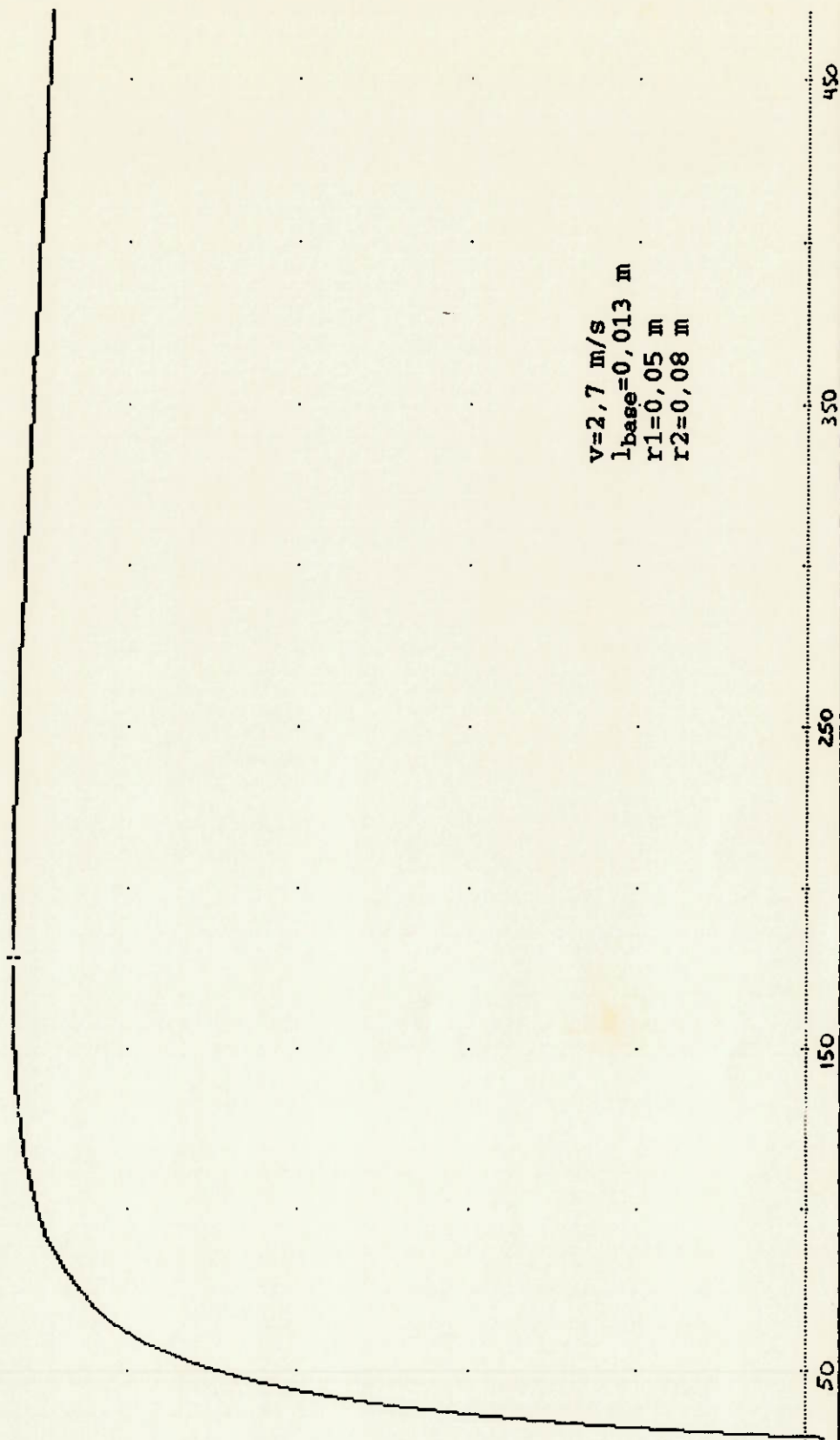
Scale x:50

y:20

Derive 2D-plot

GRÁFICO 16

Rendimento da hélice (%)



Velocidade angular da hélice - ω (rad/s)

Enter option

Cross x: 170,4722

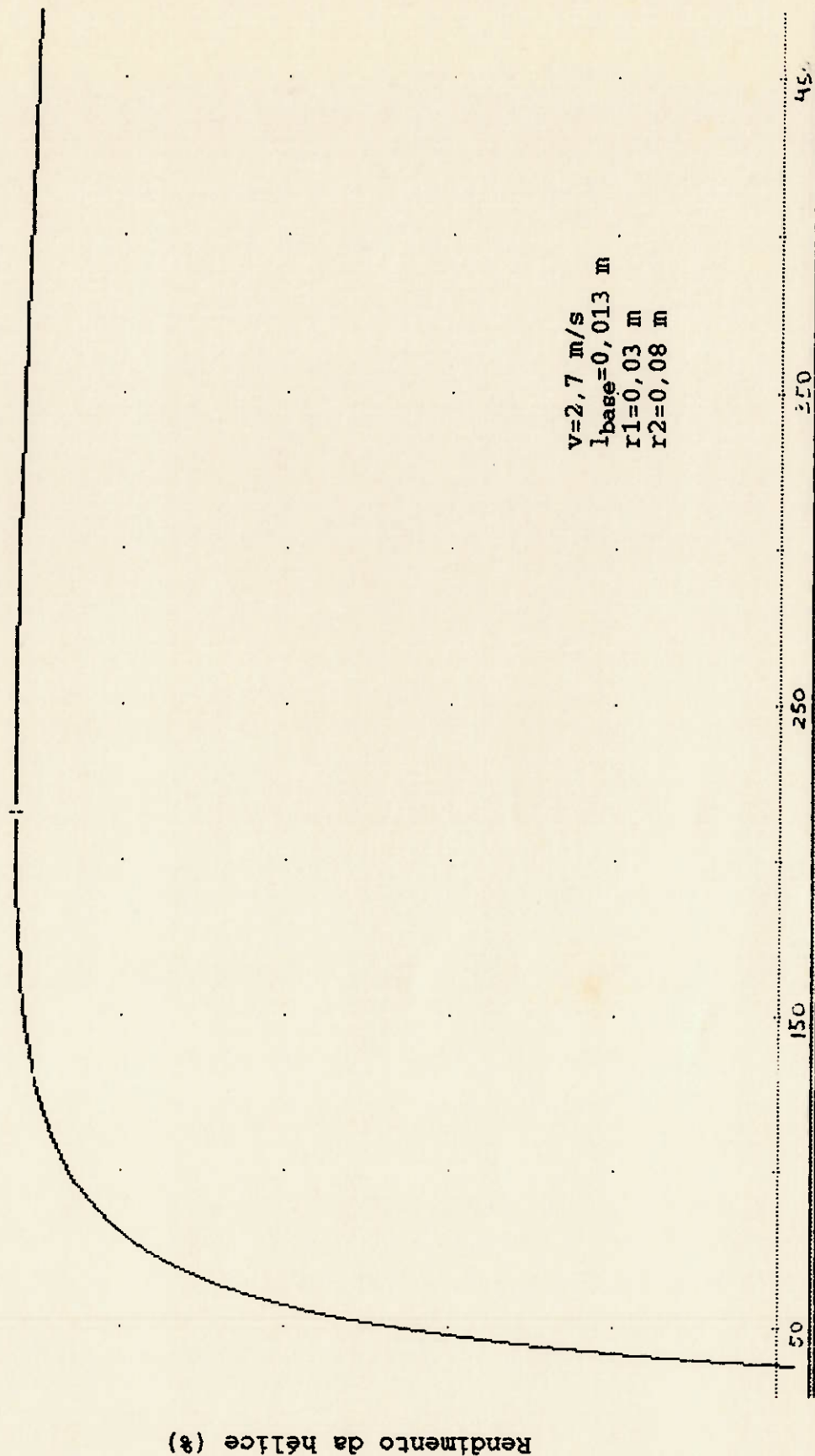
y: 93,4375

Scale x: 50

y: 20

Derive 2D-plot

GRÁFICO 17



Velocidade angular da hélice - ω (rad/s)

Enter option

Cross x:215.2777

y:93.125

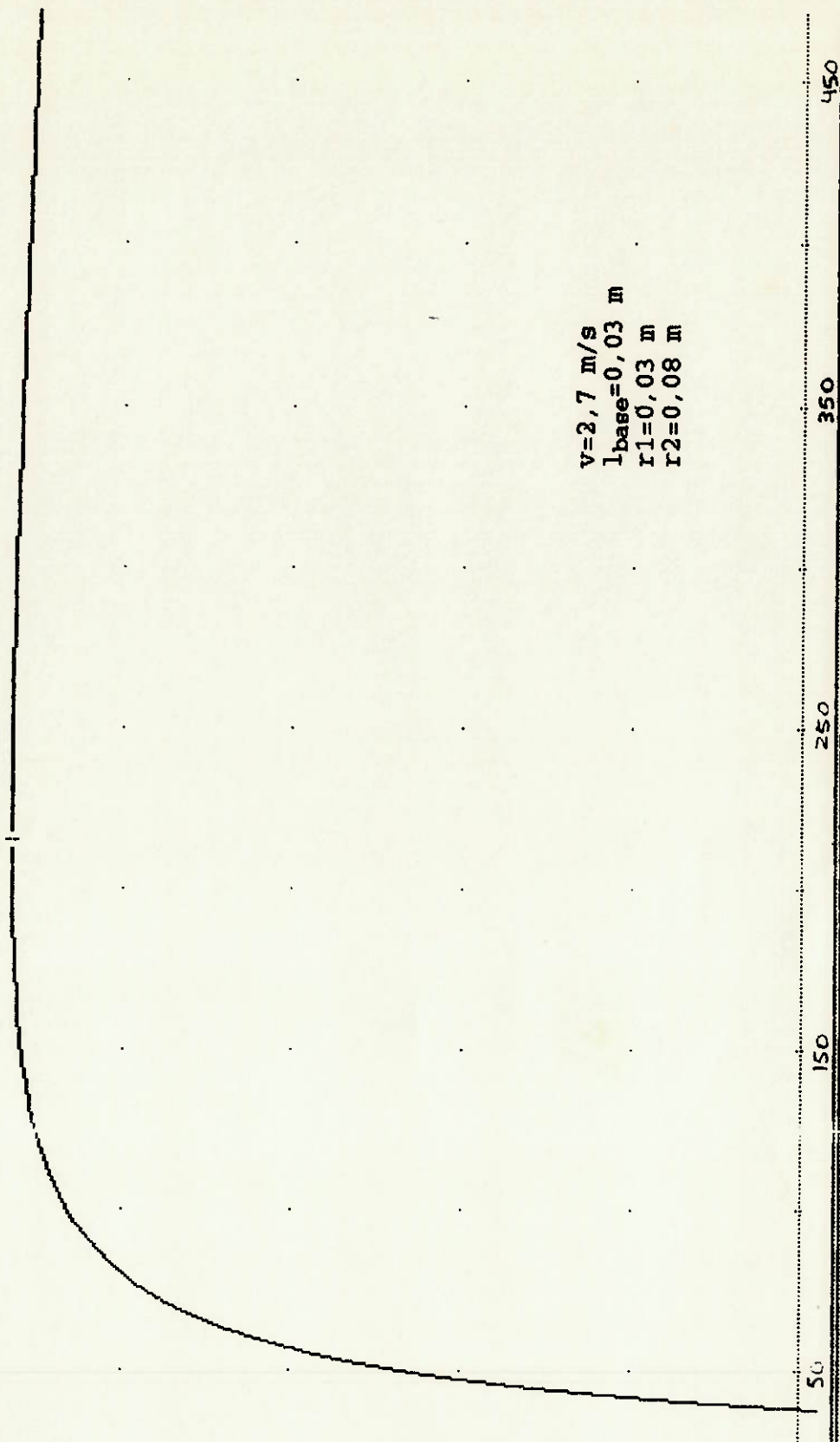
Scale x:50

y:20

Derive 2D-plot

GRÁFICO 18

Rendimento da hélice (%)



Velocidade angular da hélice - ω (rad/s)

Enter option

Cross x:215,2777

y:93,125

Scale x:50

y:20

Derive 2D-plot

A.3 - HÉLICE DE GEOMETRIA FIDA

$$1: \quad r_o := 1023.2 \quad \text{kg/m}^3$$

$$2: \quad a := 5 \cdot 10^{-5}$$

$$3: \quad b := 1.25 \cdot 10^{-4}$$

$$4: \quad c := 0.0057$$

$$5: \quad v_{\text{rend_max}} := 2.7 \quad \text{m/s}$$

$$6: \quad i_{\text{rend_max}} := 8 \quad \text{degrees}$$

$$7: \quad w_{\text{rend_max}} := 144 \quad \text{rad/s}$$

$$8: \quad \theta(r) := i_{\text{rend_max}} + \frac{\text{ATAN} \left[\frac{v_{\text{rend_max}}}{w_{\text{rend_max}} r} \right] 180}{\pi}$$

$$9: \quad I(r, v, w) := \theta(r) - \frac{\text{ATAN} \left[\frac{v}{w r} \right] 180}{\pi}$$

$$10: \quad CZ(r, v, w) := \frac{I(r, v, w) + 1}{10} \text{CHI}(-3, I(r, v, w), 15.5)$$

$$11: \quad CX(r, v, w) := a I(r, v, w)^2 + b I(r, v, w) + c$$

$$12: \quad L(r) := \frac{l_{\text{base}}(r_2 - r)}{r_2}$$

$$13: \text{ EMPUXO } (v, w) := r_0 \int_{r_1}^{r_2} L(r) \left[CZ(r, v, w) \cos \left[\frac{v}{w r} \right] - C \right] dr$$

$$\sim \sim \sim X(r, v, w) \sin \left[\frac{v}{w r} \right] \left(v^2 + w^2 r^2 \right) dr$$

$$14: \text{ MOMENTO } (v, w) := r_0 \int_{r_1}^{r_2} L(r) \left[CZ(r, v, w) \sin \left[\frac{v}{w r} \right] + C \right] dr$$

$$\sim \sim \sim CX(r, v, w) \cos \left[\frac{v}{w r} \right] \left(v^2 + w^2 r^2 \right) r dr$$

$$15: \text{ RENDIMENTO } (v, w) := \frac{100 v \text{ EMPUXO } (v, w)}{w \text{ MOMENTO } (v, w)}$$

$$16: \text{ POTENCIA } (v, w) := w \text{ MOMENTO } (v, w)$$

$$17: r_1 := 0.05$$

$$18: r_2 := 0.12$$

$$19: l_{\text{base}} := 0.013$$

$$20: w := 144 \text{ rad/s}$$

$$21: v := 2.7 \text{ m/s}$$

$$22: 29.3844 \text{ N}$$

23: 0.590499 N.m

24: 93.3038 %

25: 85.0318 W

26: $v := 5 \text{ m/s}$

27: $w := 220 \text{ rad/s}$

28: 48.2213 N

29: 1.18280 N.m

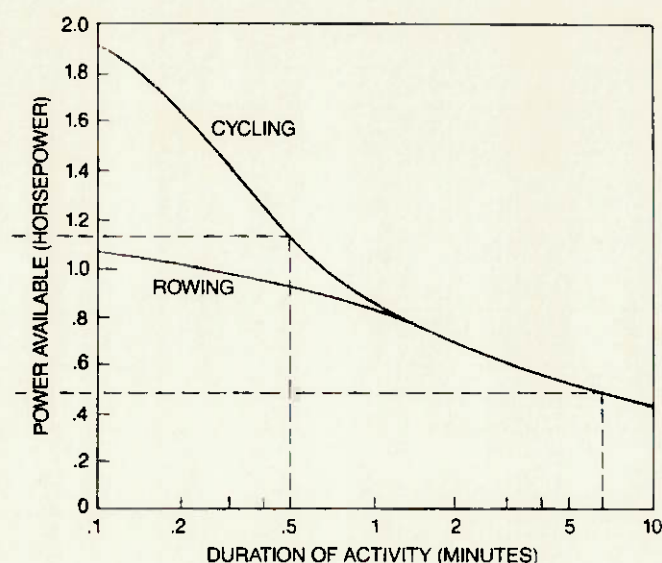
30: 92.6570 %

31: 260.217 W

ANEXO B - Cálculo da potência de regime cruzeiro.

Com o objetivo de se determinar uma situação de regime cruzeiro que satisfizesse grande parte dos usuários do produto em pauta, realizou-se em uma bicicleta ergométrica um ensaio com diferentes pessoas "sadias", resultando em média numa situação que consiste em se pedalar a uma rotação constante de 65 rpm com um momento resistente de 13,33 N.m, resultando em uma potência útil fornecida pelo operador de 90,72 watts, conseguindo o operador fornecê-la por mais de 30 minutos. Assim, conclui-se que a potência cruzeiro deverá ficar próxima desse valor.

Este teste é validado quando comparamos seu resultado com o gráfico abaixo (Ref.[4]) que mostra a potência máxima fornecida por uma pessoa em função de seu respectivo tempo de duração:



ANEXO C - Gráficos utilizados (Refs. [3] e [2]).

hydromechanical questions do not get serious attention before this time. Then it must be verified that the combinations of principal dimensions and form parameters are reasonable, if the speed wanted is to be obtained.

The examination of the combination of the principal dimensions and form parameters in relation to the speed is often very primitive. Perhaps it is only the constant in Alexander's formula that will be examined to be "suitable":

$$\delta = C - 0.5V/\sqrt{L} \quad (4.8.1)$$

where δ is the block coefficient, V is the speed (in knots), and L is the length of the ship (in feet). The formula (in SI units) is depicted in Fig. 4.8.1. The shaded area marks the region, where C achieves suitable values.

When performing resistance analyses or predictions the following dimensions, dimensionless coefficients, and ratios can be used for describing the hull of the ship:

Ship dimensions

L = length on waterline

L_{pp} = length between perpendiculars

L_{os} = length overall submerged

B = breadth on waterline

T_A = draught aft

T_F = draught fore

T = draught mean

A_x = immersed midship section area

A_{BT} = section area of bulbous bow (measured at FP)

S = wetted surface ($L \times$ mean girth)

S_1 = wetted surface as S but including appendages

∇ = volumetric displacement

LCB = the distance of center of buoyancy abaft amidships

Coefficients and ratios

$\delta = \frac{\nabla}{LBT}$ = block coefficient

$\beta = \frac{A_x}{BT}$ = midship section coefficient

$\varphi = \frac{\nabla}{A_x L}$ = prismatic coefficient

L/B = length-breadth ratio

B/T = breadth-draught ratio

$L/\nabla^{1/3}$ = length-displacement ratio

LCB/L_{pp} = distance of center of buoyancy abaft amidships ratio

It is very difficult to consider all these dimensions, coefficients, and ratios in the resistance analyses and predictions. Some of these parameters are dependent on each other and some could therefore be omitted, but in general all of them will be stated in the reports on the model tests from the towing tanks.

The length of a ship can be up to about 400 m, the breadth up to about 80 m, and the depth up to about 30 m. This means that the difference in dimensions from the models to real ships is very large even if large models ($L = 12$ m) are used and that the transformation of the results of the model tests to reality will be very unreliable. One of the lengths— L , L_{pp} , or L_{os} —is in general used to characterize the size of the ship, and all other dimensions with the excep-

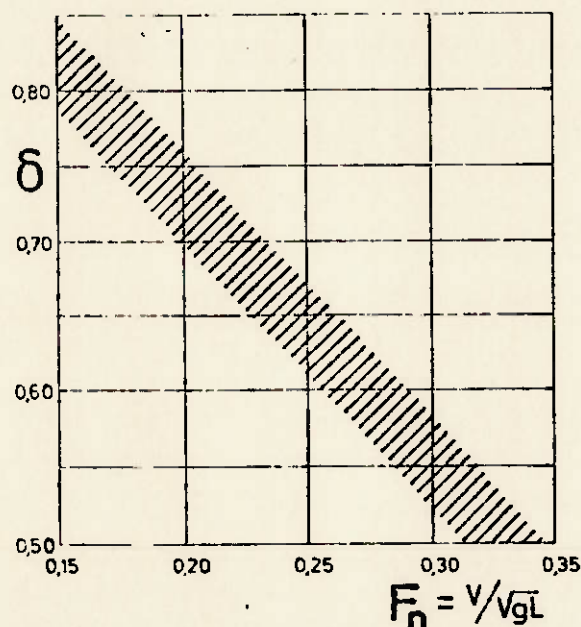


Figure 4.8.1. Area (shaded) for suitable combinations of ship length L , block coefficient δ , and speed V .

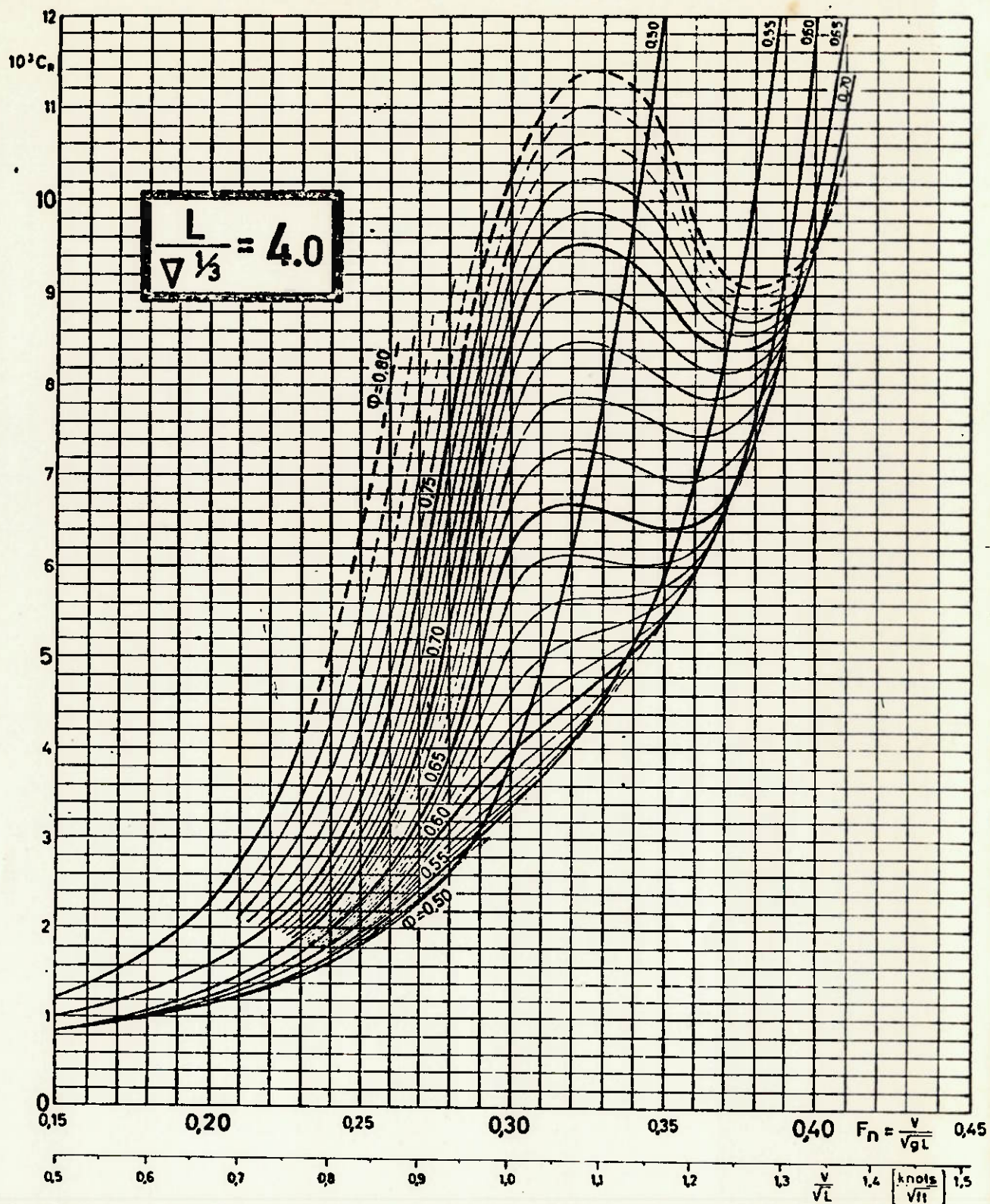


Figure 5.5.5. Residuary resistance coefficient versus speed-length ratio for different values of longitudinal prismatic coefficient. $L/\nabla^{1/3} = 4.0$.

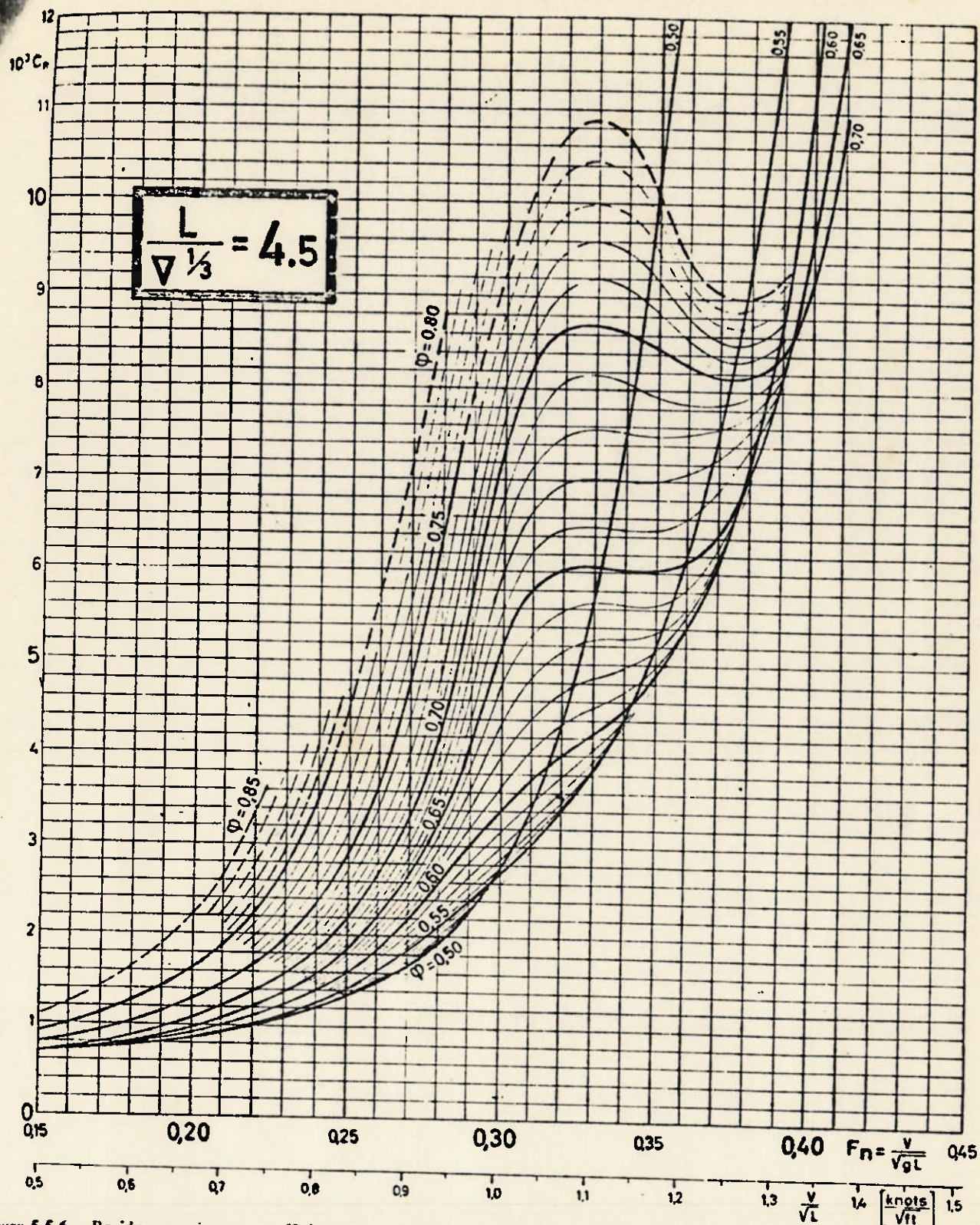


Figure 5.5.6. Residuary resistance coefficient versus speed-length ratio for different values of longitudinal prismatic coefficient. $\frac{L}{\nabla^{1/3}} = 4.5$.

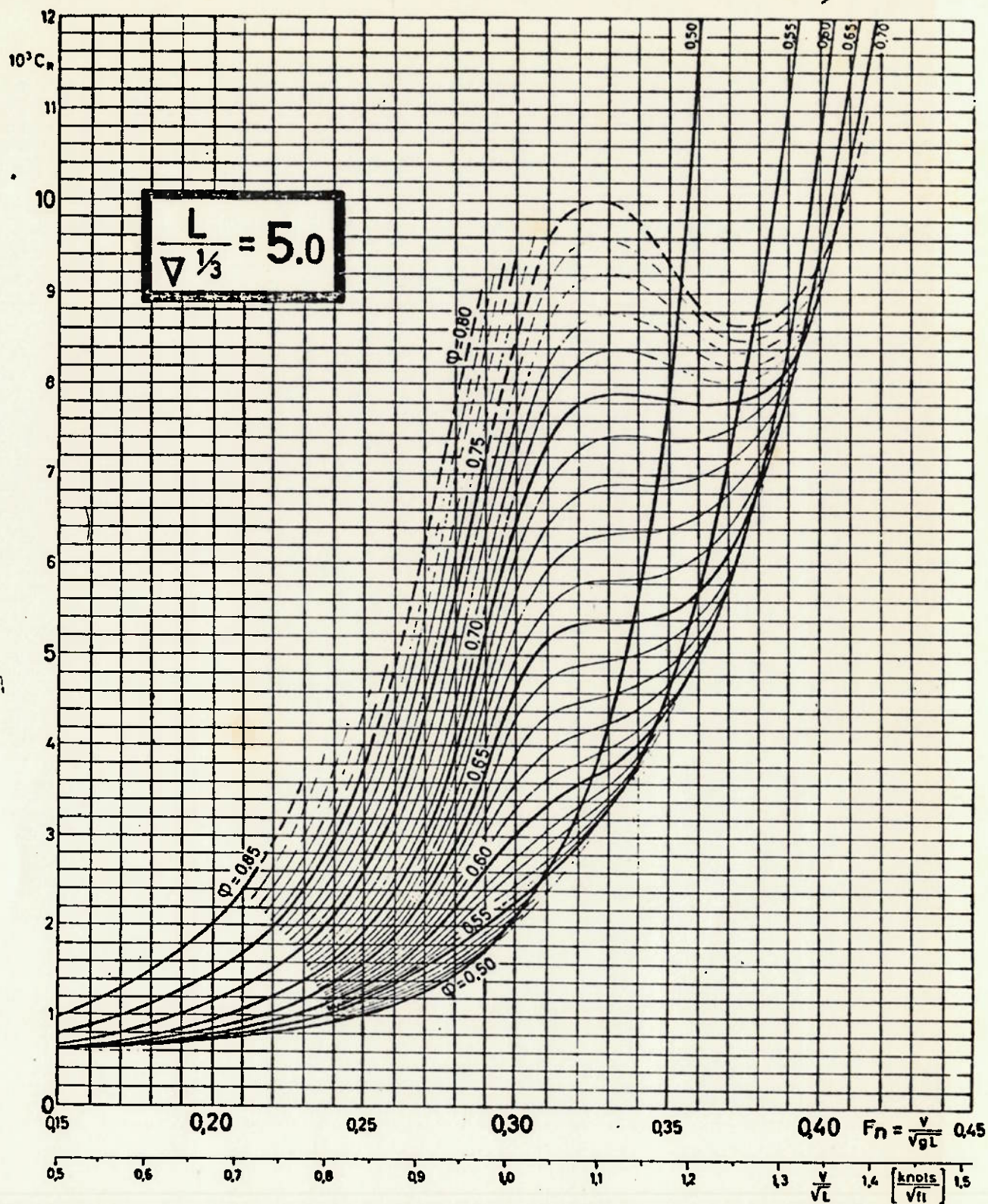


Figure 5.5.7. Residuary resistance coefficient versus speed-length ratio for different values of longitudinal prismatic coefficient. $L/\nabla^{1/3} = 5.0$.

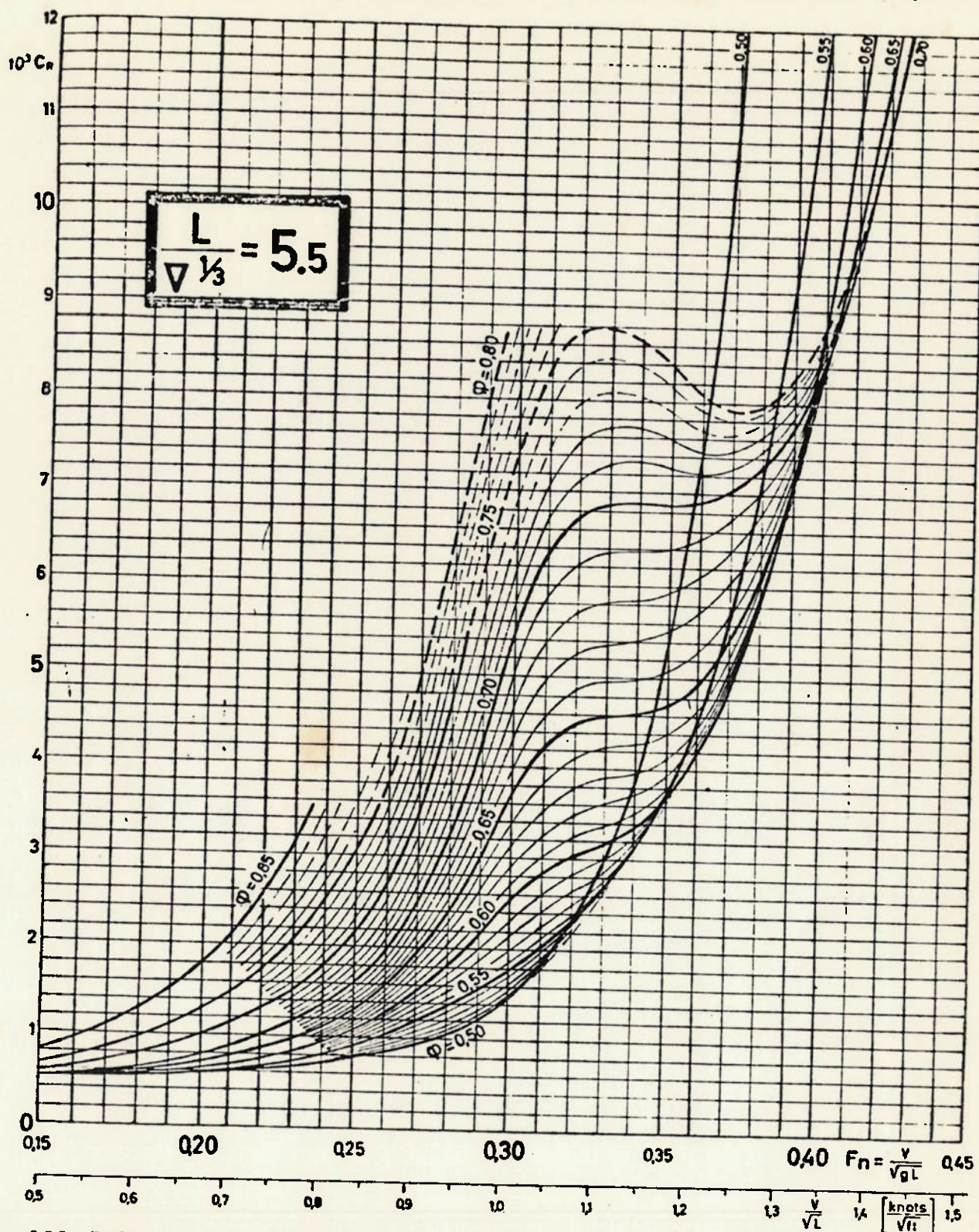


Figure 5.5.8. Residuary resistance coefficient versus speed-length ratio for different values of longitudinal prismatic coefficient.
 $L/\nabla^{1/3} = 5.5$.

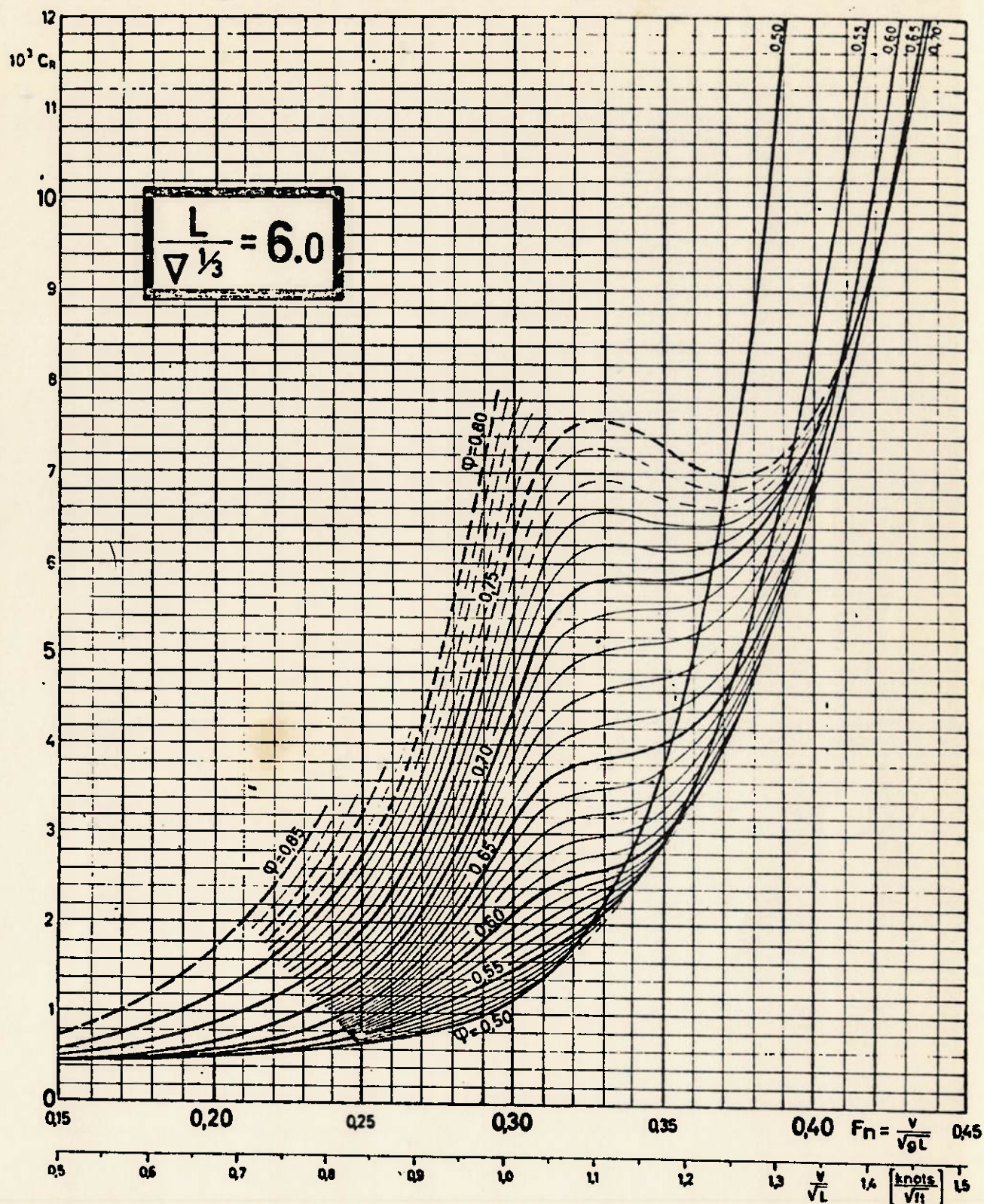


Figure 5.5.9. Residuary resistance coefficient versus speed-length ratio for different values of longitudinal prismatic coefficient. $L/\nabla^{1/3} = 6.0$.

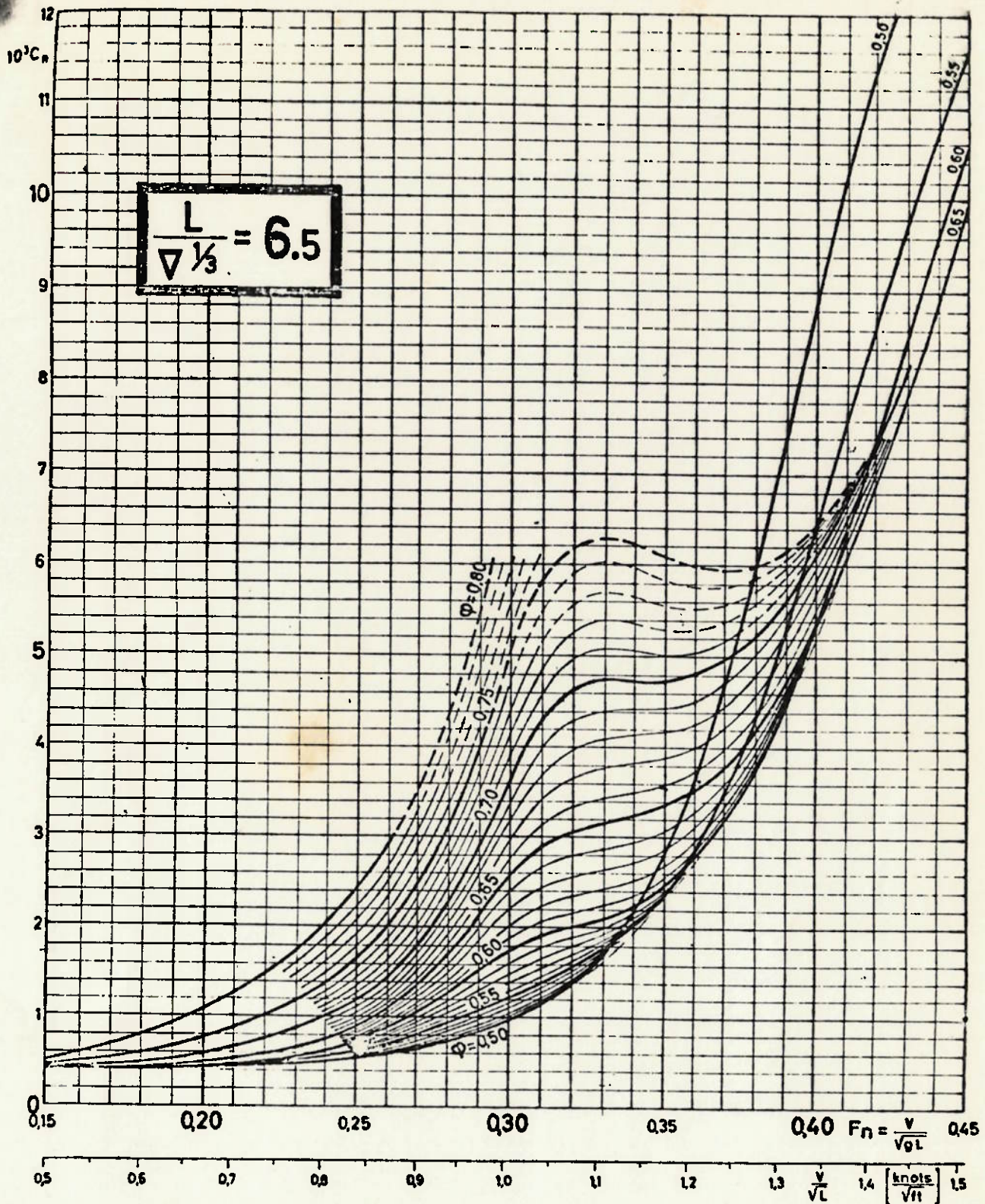


Figure 5.5.10. Residuary resistance coefficient versus speed-length ratio for different values of longitudinal prismatic coefficient. $L/\nabla^{1/3} = 6.5$.

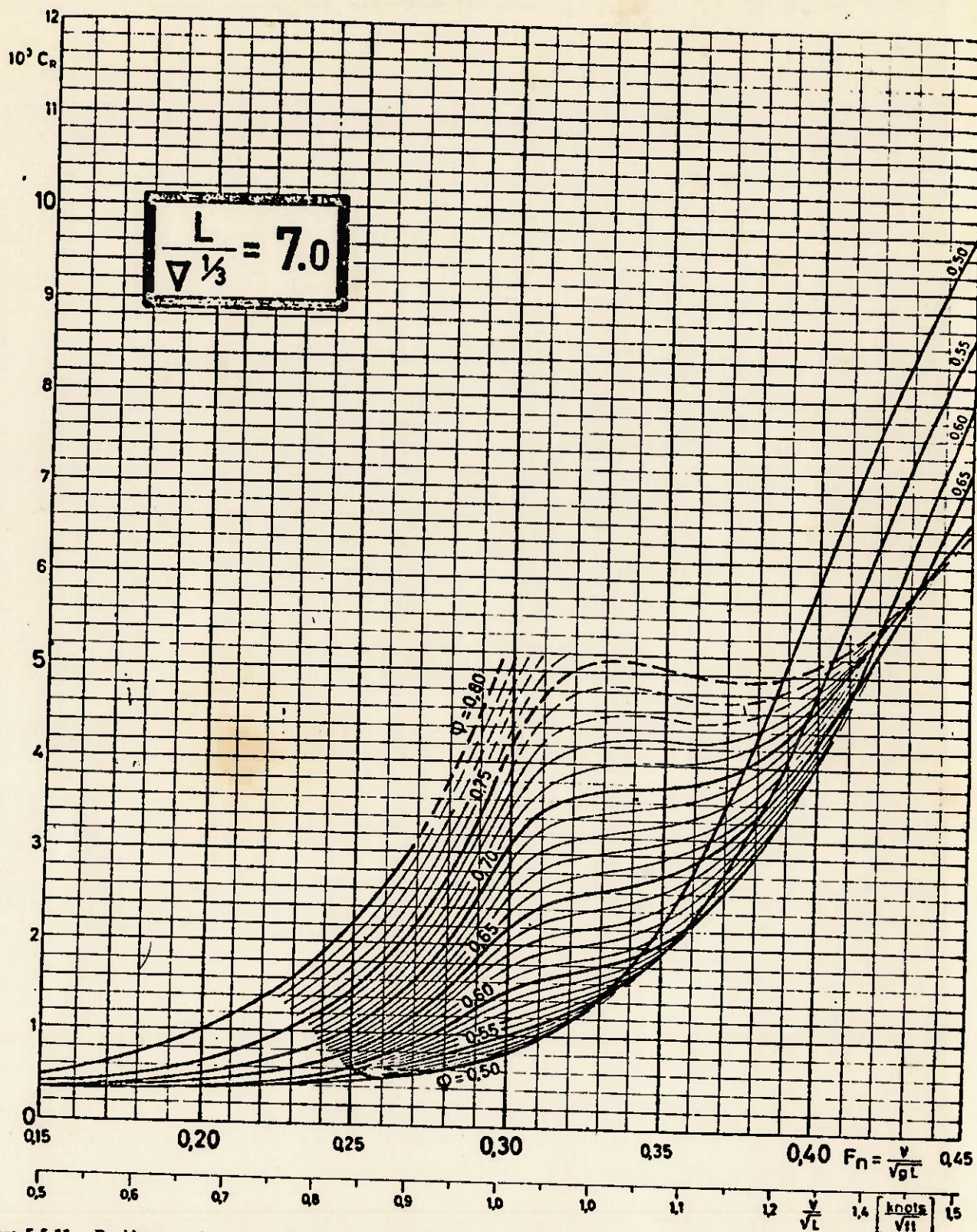


Figure 5.5.11. Residuary resistance coefficient versus speed-length ratio for different values of longitudinal prismatic coefficient. $L/\nabla^{1/3} = 7.0$.

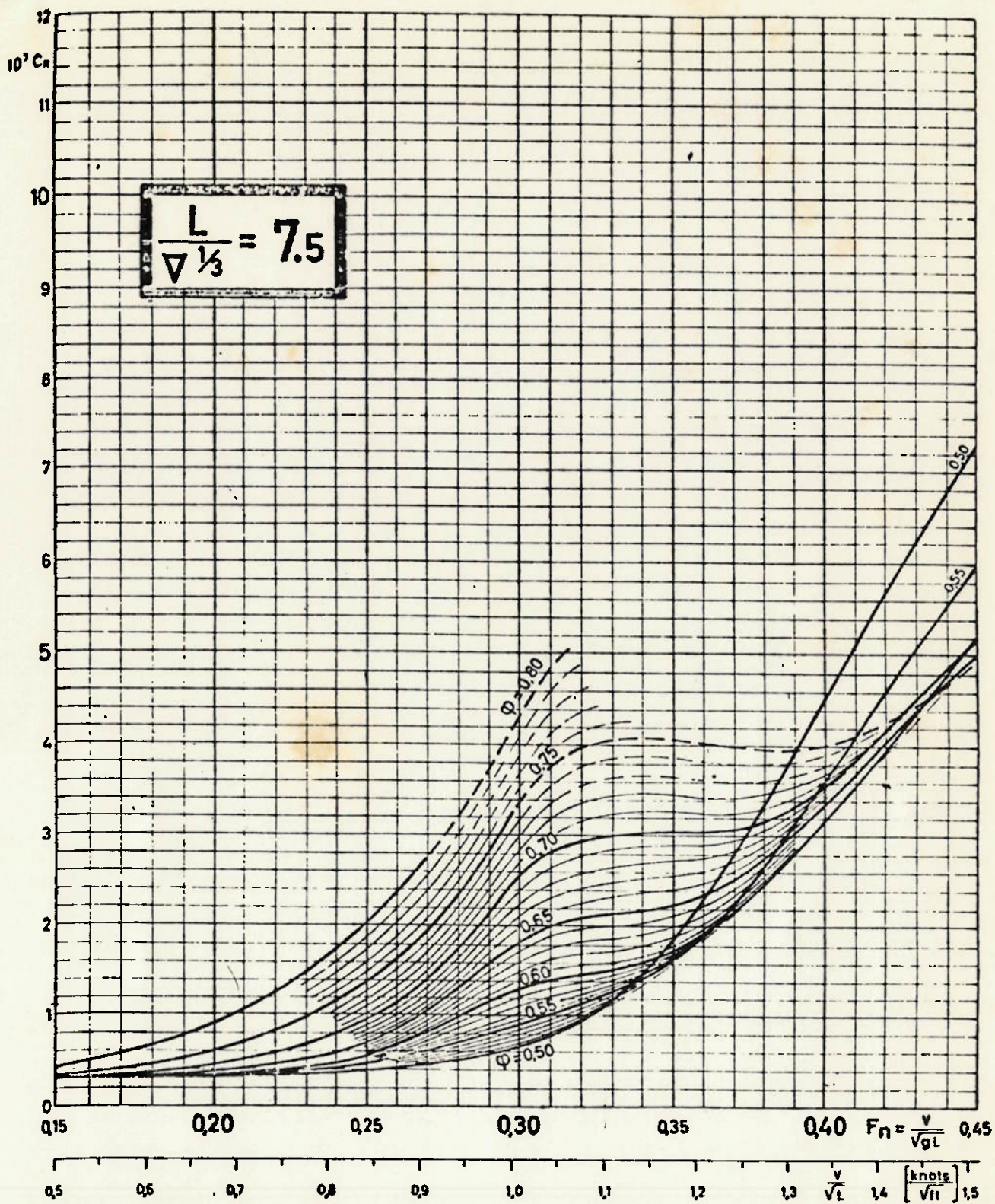


Figure 5.5.12. Residuary resistance coefficient versus speed-length ratio for different values of longitudinal prismatic coefficient. $L/\nabla^{1/3} = 7.5$.

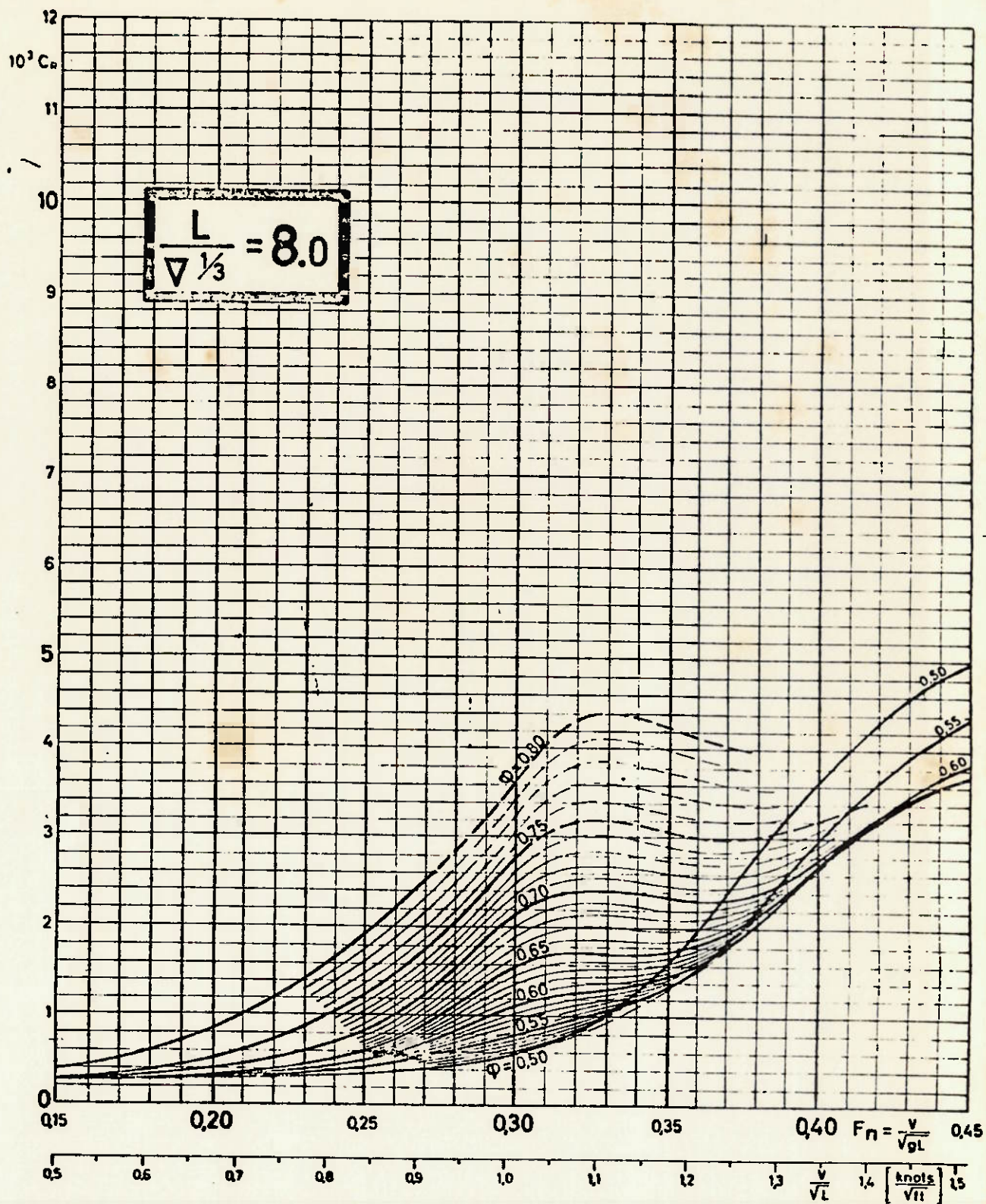
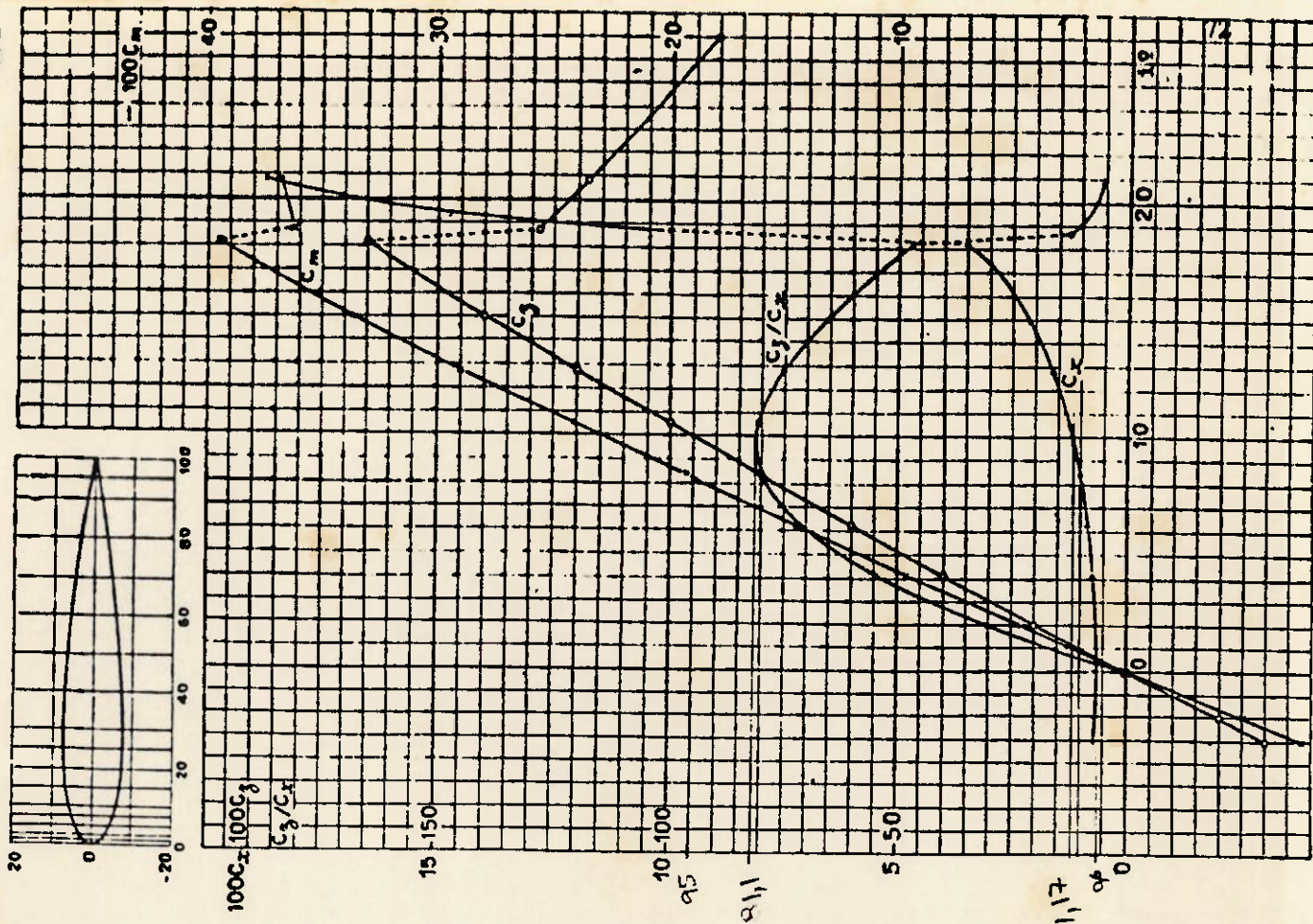
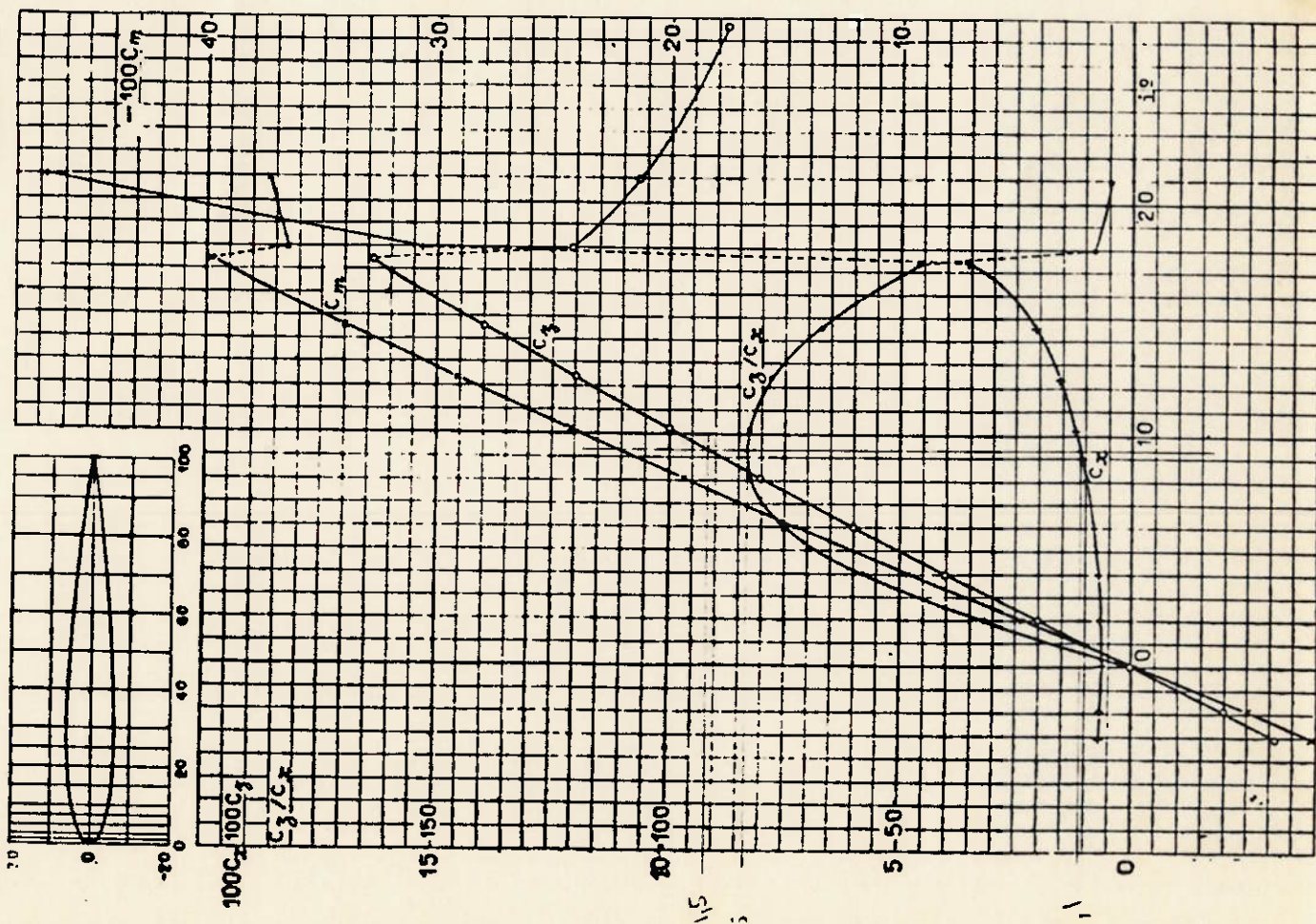


Figure 5.5.13. Residuary resistance coefficient versus speed-length ratio for different values of longitudinal prismatic coefficient. $L/\nabla^{1/3} = 8.0$.

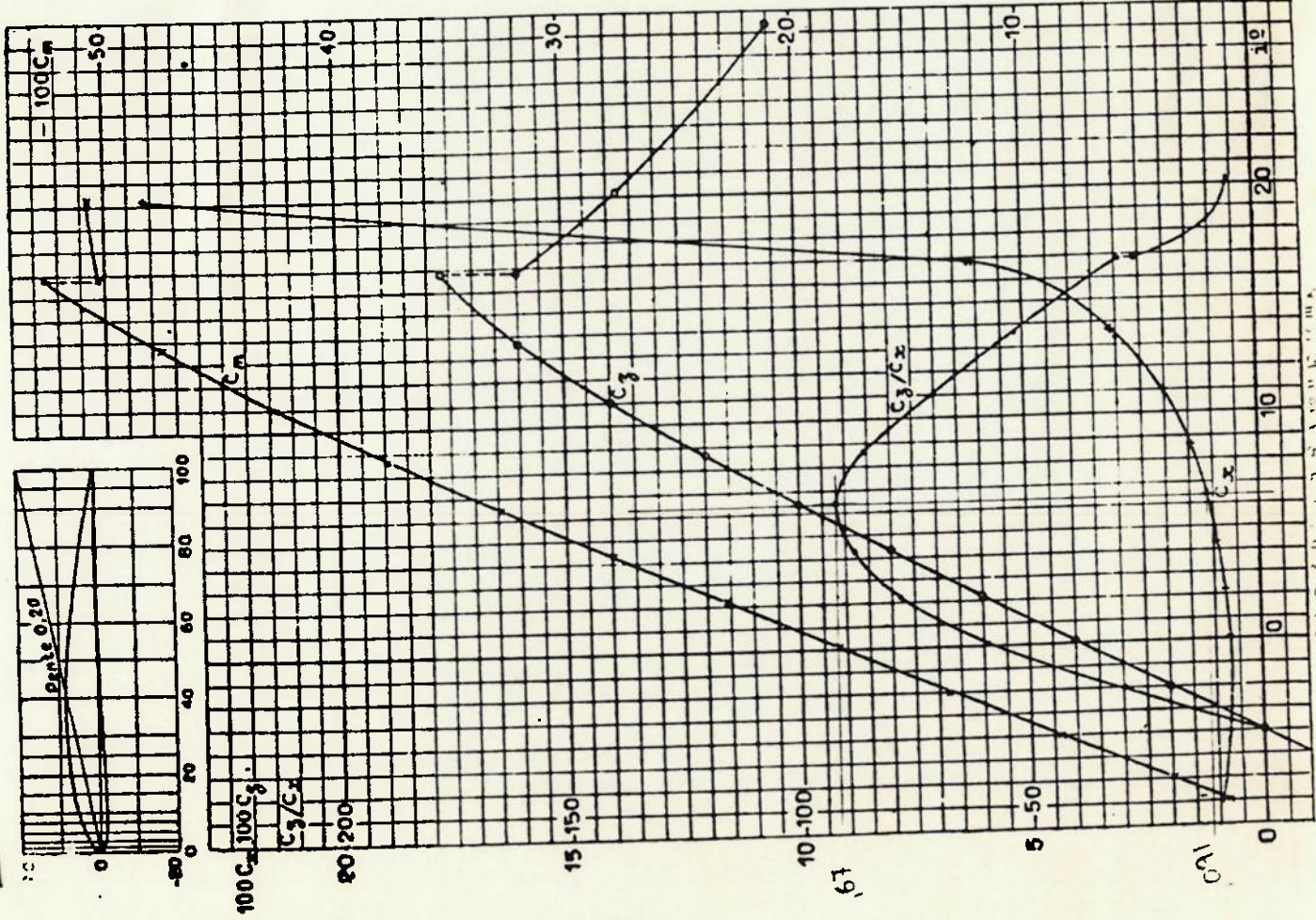


Profil N. A. C. A. 0015, 2 - 00.



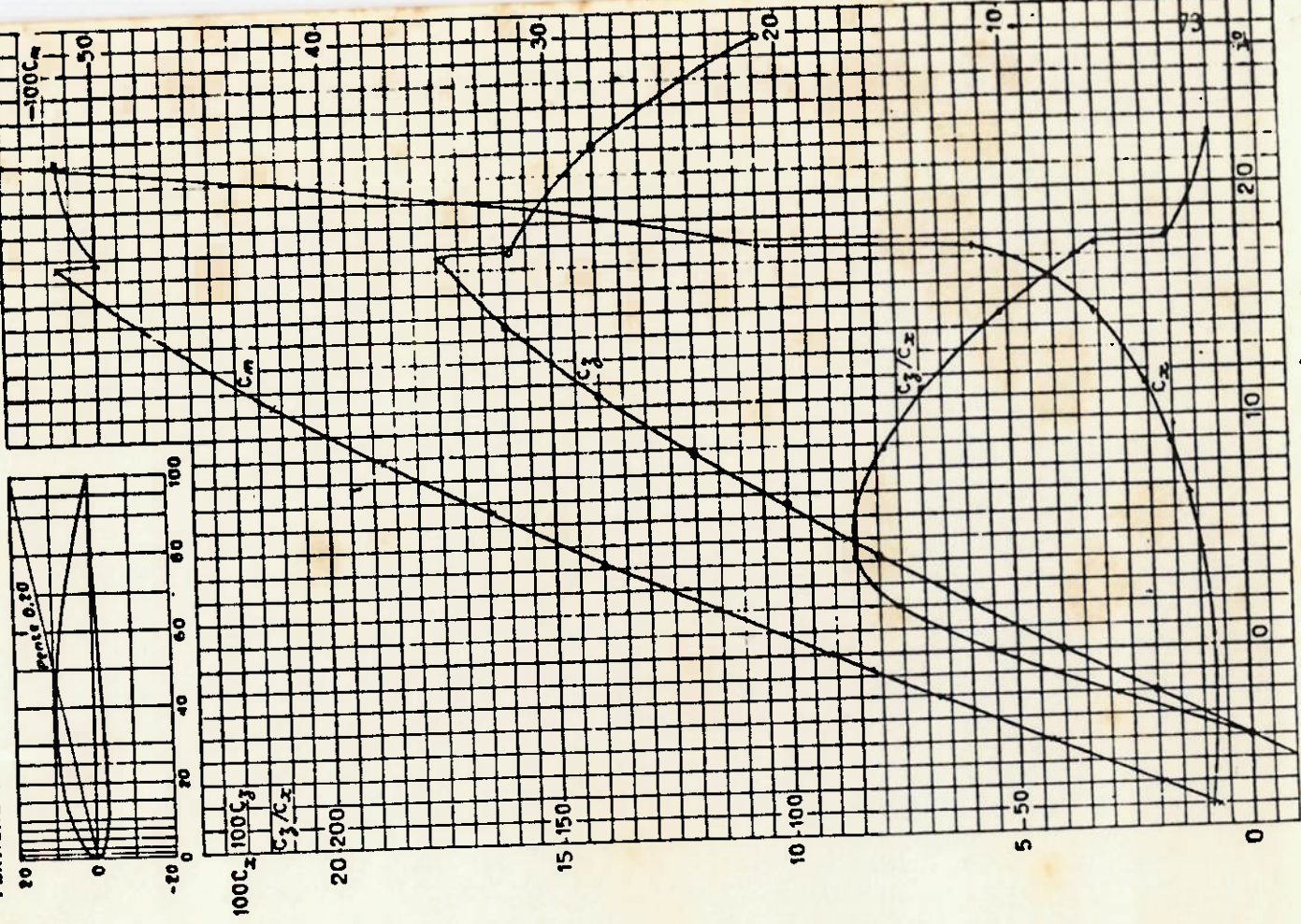
Proj N. A. C. A. 0012, 2 = 8.

PLANCHE 18



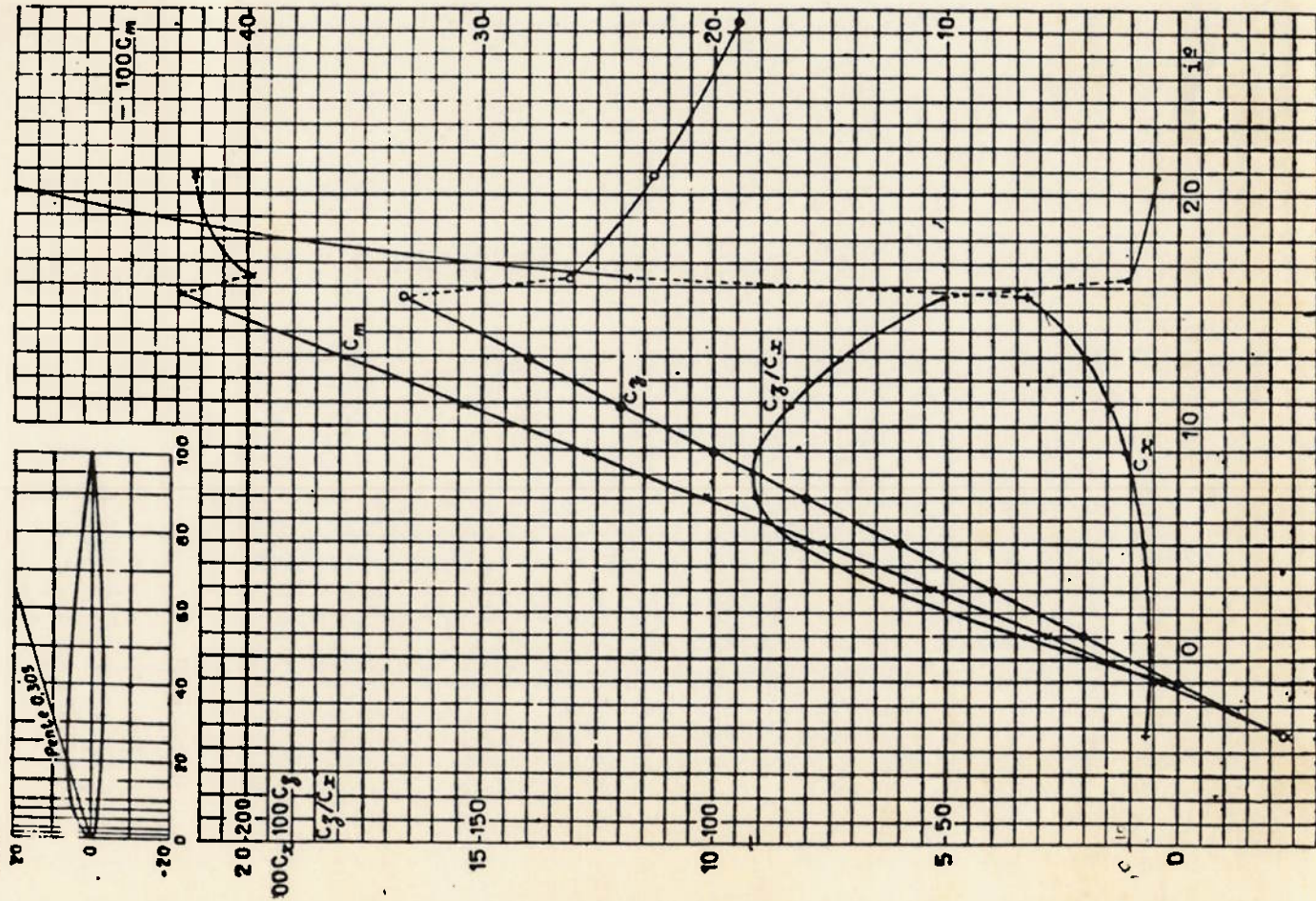
01 Profil N. A. C. A. 4409, $\lambda = \infty$.

PLANCHE 19



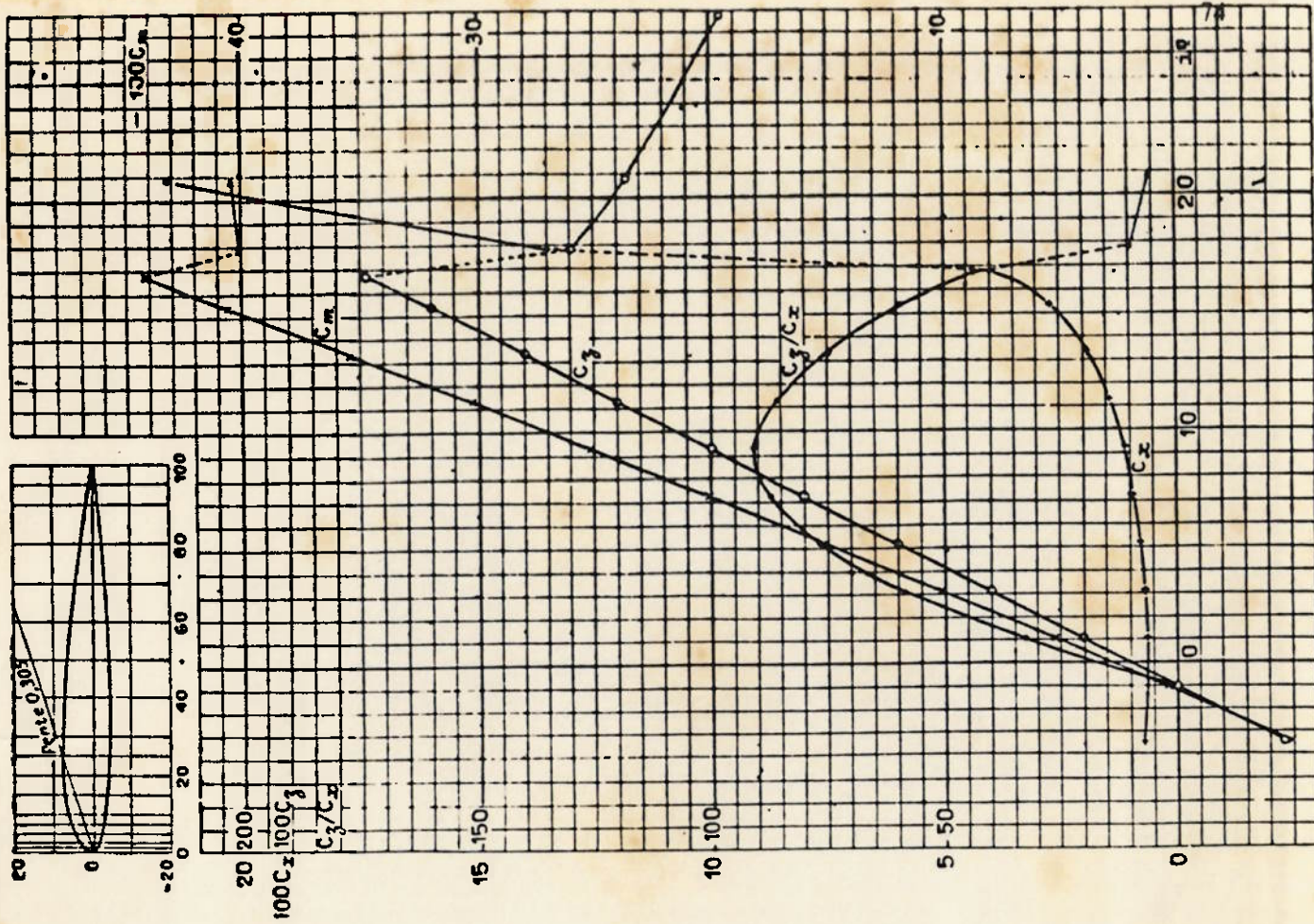
Profil N. A. C. A. 4412, $\lambda = \infty$.

PLANCHE 20



Profil N. A. C. A. 23009, $\lambda = \infty$.

PLANCHE 21



Profil N. A. C. A. 23012, $\lambda = \infty$.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Projeto de Otimização de Veículo de Propulsão Humana
Luiz Roberto Moledo Secco
EPUSP - 1988

- [2] Aérodynamique Expérimentale
Pierre Rebuffet
DUNOD - 1969

- [3] Resistance and Propulsion of Ships
Harvald
New York - 1983

- [4] Scientific American
Human - powered Watercraft
Dez. 1986