



# Instituto Panamericano de Ingeniería Naval

Instituto Pan-americano de Engenharia Naval

Pan-American Institute of Naval Engineering

## XI CONGRESO PANAMERICANO DE INGENIERIA NAVAL, TRANSPORTE MARITIMO E INGENIERIA PORTUARIA.

### SMALL SHIPS PROPELLERS OPTIMIZATION USING SYSTEMATIC SERIES

PAPER N° 37

CARLOS DAHER PADOVEZI

Research Engineer of Divisao de Engenharia Naval e Oceanica  
do Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo S.A.

BRASIL

## XI CONGRESSO PANAMERICANO DE ENGENHARIA NAVAL

### OTIMIZAÇÃO DE HÉLICES DE PEQUENAS EMBARCAÇÕES UTILIZANDO SÉRIES SISTEMÁTICAS

Padovezi, C. D. (\*)

#### Resumo:

São apresentadas novas formas de utilização dos dados disponíveis em bibliografias de três séries sistemáticas de hélices (B-Troost, Kaplan com dutos e Gawn-Burriel). Estas três séries podem cobrir uma faixa ampla de utilização na propulsão de pequenas embarcações - o importante é utilizá-las da melhor maneira possível, explorando as suas boas características e evitando-se possíveis problemas de projeto.

O trabalho pretende somar subsídios à melhoria da qualidade e ao barateamento do projeto de hélices de pequenas embarcações, havendo preocupações, também, com a fabricação e com o controle dimensional das pás, para que haja a garantia do desempenho previsto no projeto do hélice.

#### 1. Introdução:

Selecionar o tipo e projetar o propulsor mais adequado à uma determinada embarcação, não resulta em tarefa simples. Deve ser levados em conta todos os parâmetros pertinentes (nem sempre facilmente estudados e entendidos), para se chegar a um propulsor ótimo para cada caso. Assim é que, no projeto de um hélice de uma embarcação, deverão ser verificados os efeitos, no desempenho final, dos parâmetros geométricos como a distribuição de cordas dos perfis ao longo do raio do hélice, o passo médio da pá, a distribuição de passo ao longo do raio, a distribuição de espessuras, o tipo de perfil, a curvatura ("camber") média de cada perfil cilíndrico da pá, a presença ou não de caiimento ("rake") ou de assimetria ("skew"), etc...

Se em cada projeto de hélice fosse necessário se estudar todos os aspectos de todas estas variáveis, muita energia deveria ser gasta em cada caso. Notadamente nos projetos de hélices de pequenas embarcações onde se procura obter bons resultados com custos relativamente baixos, o estudo teórico-experimental particular, caso a caso, é, na maior parte das vezes, inviável economicamente.

Felizmente, existem as chamadas séries sistemáticas de hélices que facilitam, em muito, a tarefa de se projetar hélices

(\*) CARLOS DAHER PADOVEZI, pesquisador da Divisão de Engenharia Naval e Oceânica do Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Est. de São Paulo.

de pequenas embarcações (e também de se fazer o projeto preliminar de hélices de navios de maior porte).

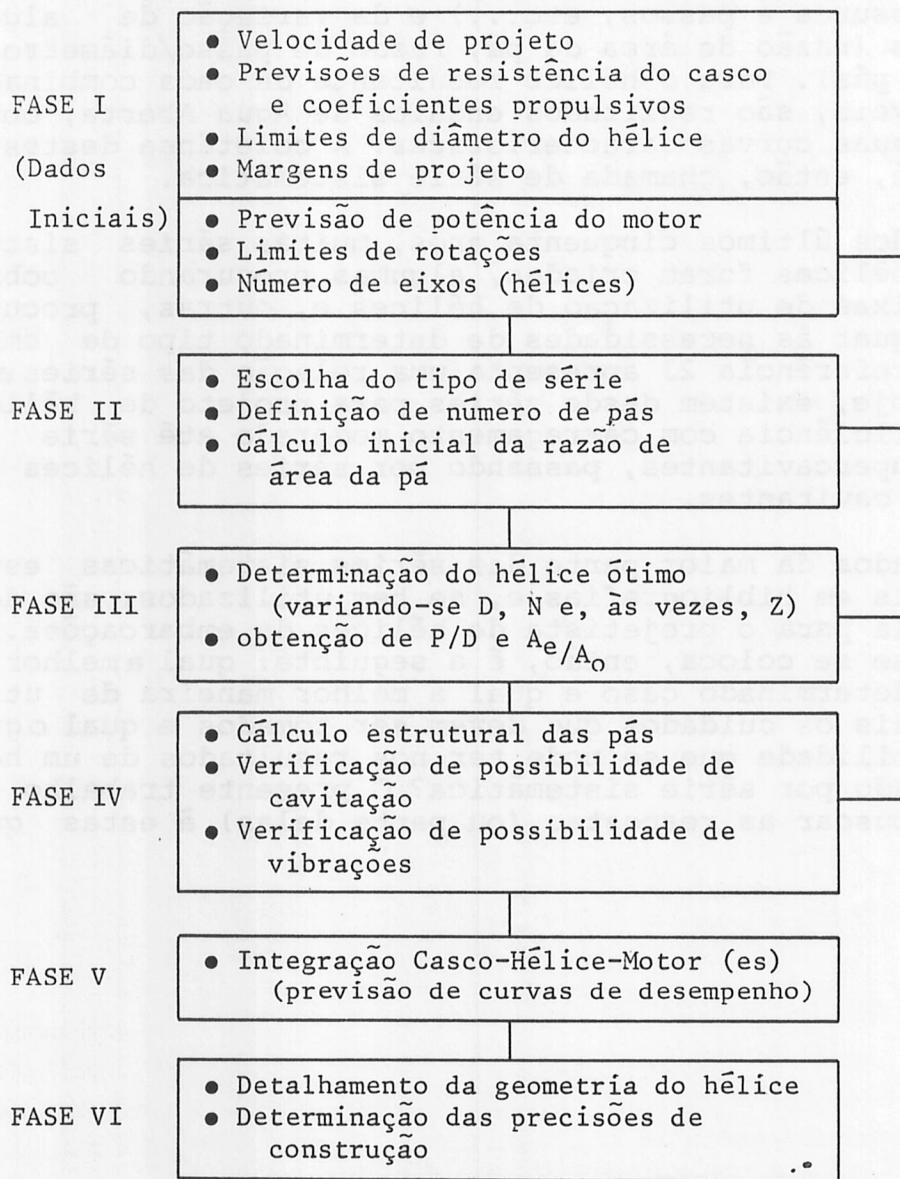
Tais séries consistem, basicamente, da fixação de uma geometria padrão de hélice (tipo de perfil, distribuições de cor das, espessuras e passos, etc...) e da variação de alguns parâmetros (razão de área da pá, razão de passo/diâmetro e número de pás). Para o hélice resultante de cada combinação das variáveis, são realizados ensaios de Água Aberta, obtendo-se as suas curvas características. A coletânea destes resultados é, então, chamada de série sistemática.

Ao longo dos últimos cinquenta anos, muitas séries sistemáticas de hélices foram criadas, algumas procurando cobrir amplas faixas de utilização de hélices e, outras, procurando se adequar às necessidades de determinado tipo de embarcação. A referência 23 apresenta uma relação das séries existentes. Hoje, existem desde séries para projeto de hélices de alta eficiência com carregamento moderado até série de hélices supercavitantes, passando por séries de hélices parcialmente cavitantes.

Os resultados da maior parte das séries sistemáticas estão disponíveis em bibliografias e, se bem utilizados, são de enorme valia para o projetista de hélices de embarcações. A questão que se coloca, então, é a seguinte: qual a melhor série para determinado caso e qual a melhor maneira de utilizá-la? Quais os cuidados que devem ser tomados e qual o grau de confiabilidade que se pode ter nos resultados de um hélice projetado por série sistemática? O presente trabalho se propõe a buscar as respostas (ou parte delas) à estas questões.

## 2. O Projeto de Hélices:

O projeto de hélices por séries sistemáticas pode seguir, basicamente, a sequência abaixo:



### 2.1 - Fase I (Dados Iniciais):

A fase I depende dos requisitos do armador e envolve uma das partes mais importante do projeto do hélice: as previsões de resistência do casco e dos coeficientes propulsivos em função da velocidade de cruzeiro. Do grau de acerto destas previsões dependerá a qualidade dos resultados finais. A maneira mais precisa de obtenção da resistência do casco e dos coeficientes propulsivos é através da realização de ensaios de resistência ao reboque e de auto-propulsão de modelo do casco em Tanque de Provas. Não sendo possível a realização de tais ensaios, é necessário se escolher adequadamente o melhor método de estimativa destes dados (métodos teóricos

e/ou empíricos, utilização de resultados de séries de cas  
cos de embarcações, comparações com resultados de embarca  
ções semelhantes).

Um dos problemas que podem aparecer na Fase I é relacionado com as características do(s) motor(es) que deverão ser utilizados. Às vezes não existe disponibilidade no mercado do tipo de motor mais apropriado para aquela potência inicialmente estimada - por exemplo, já ocorreram casos onde os projetistas resolveram utilizar três motores (três eixos e três hélices) em certas embarcações, por não conseguirem os motores ideais para a utilização de dois hélices.

As restrições ao diâmetro do hélice geralmente são resultantes da combinação entre o calado e as claras (distâncias entre as pontas das pás e o casco e o leme) recomendadas por Sociedades Classificadoras ou pela experiência do projetista. Quanto maiores as claras, menores as possibilidades de ocorrerem problemas de vibrações, solicitação estrutural local excessiva no casco, diminuição de eficiência propulsiva, etc. Para evitar-se todo o tipo de problemas, há recomendações que a distância mínima entre hélice e casco seja de 25% do diâmetro do hélice. Contudo, nem sempre é possível se projetar o hélice com clara relativamente grande - note-se que as eficiências do hélice tendem a ser maiores com diâmetros maiores.

Com relação às margens de projeto pode-se afirmar que elas dependem do tipo de embarcação e de sua missão. Geralmente, se projeta o hélice para absorver uma potência menor que a potência máxima nominal do motor, prevendo-se uma deterioração ao longo do tempo, das condições do casco, do motor e do próprio hélice - um valor médio utilizado em vários tipos de embarcações para esta redução é de 15%, ou seja, a potência de projeto seria 15% menor que a potência máxima do motor.

## 2.2 - Fase II

A escolha do tipo de série sistemática de hélices é muito importante, sendo a chave que pode abrir ou fechar determinadas possibilidades de projeto. É necessário que seja uma série adequada ao caso e que existam informações suficientes sobre elas (geometria, curvas características, previsão de cavitação, correções de efeito escala). O ítem 3 deste trabalho tratará do assunto.

A definição do número de pás normalmente se dá através da análise de vibração torsional do sistema motor-eixo-hélice, a fim de se evitar a coincidência da frequência natural de vibração do sistema com a frequência de excitação predominante do hélice, que resulta da multiplicação do número de rotações pelo número de pás.

Uma estimativa inicial de razão de área expandida para hélices de passo fixo é dada pela fórmula de Keller:

$$\frac{Ae}{AO} = \frac{(1,3+0,3.Z) T}{(Pm-Pv).D^2} + K,$$

onde  $K$  é uma constante que é igual a zero para embarcações rápidas bi-hélices; é igual a 0,10 para as demais embarcações bi-hélices e igual a 0,20 para navios mono-hélices.

### 2.3 - Fase III

O projeto propriamente dito, é feito utilizando-se as curvas características das séries sistemáticas. Atualmente, com a transformação dos resultados de ensaios de Água Aberta de várias séries em polinômios, existe extrema facilidade de realizar esta tarefa através de micro-computadores.

Uma das maneiras clássicas de se escolher o hélice é a seguinte:

- calcula-se o coeficiente  $KT/J^2$  da embarcação, utilizando a expressão:

$$\frac{KT}{J^2} = \frac{PE}{V^3 (1-w)^2 \cdot (1-t) \cdot \rho \cdot D^2}$$

- escolhendo-se um determinado hélice ( $P/D$ ,  $Ae/Ao$  e  $Z$ ), obtém os valores de  $KT/J^2$  através das suas curvas  $KT/J$ ;
- o cruzamento do valor de  $KT/J^2$  da embarcação com os valores de  $KT/J^2$  do hélice, determinarão o ponto de operação, e os valores resultantes de  $J$ ,  $KT$ ,  $KQ$  e  $n$ ;
- Repetindo-se este processo através da variação das razões  $P/D$  e  $Ae/Ao$  (às vezes de  $Z$ ) e comparando-se os rendimentos obtidos, obtém-se o hélice ótimo;
- A partir do  $KQ$  obtido e da rotação  $N$ , obtém-se a potência do motor (após acrescentar a eficiência de transmissão).

### 2.4 - Fase IV

O cálculo estrutural das pás, na maior parte dos casos, baseia-se na teoria de vigas, onde a pá é geralmente modelada como uma viga engastada carregada por empuxo e torque, distribuídas linearmente. É a base das regras das sociedades classificadoras para cálculo das espessuras mínimas requeridas das pás - aliás, a utilização destas fórmulas das classificadoras se constitue na forma mais prática de verificação estrutural das pás.

A possibilidade de cavitação nas pás deve ser verificada sempre. Como alguns resultados de coeficientes  $KT$ ,  $KQ$  x  $J$  de séries são referidos a índice de cavitação atmosférico, não é previsto o fenômeno de queda de empuxo ("thrust breakdown"), que consiste em perda de empuxo (e de torque) em determinadas condições de operação com excessiva cavitação nas pás. A mínima tarefa que o projetista é obrigado inicialmente cumprir é a comparação do hélice projetado com, por exemplo, os

resultados dados no diagrama da Figura 1, apresentada na Referência 6, a propósito dos experimentos com os hélices da série Gawn-Burril. Tal diagrama, essencialmente o mesmo publicado por Burril em 1943, tem como ordenada:

$$\tau_c = T / \left( \frac{1}{2} \rho A_p V^2 r \right)$$

onde  $T$  é empuxo,  $A_p$  é a área projetada das pás, obtida da expressão:  $A_p = A_e (1,067 - 0,229 * P/D)$  e  $V_r$  é a velocidade resultante em  $r = 0,7R$  da pás. A abscissa é  $\sigma r$ , o índice de cavitação local a  $r = 0,70R$ . O fenômeno de vibrações é de tudo complexo porque está ligado às variações de velocidades na região do hélice devido às formas da popa da embarcação. A distribuição de esteiras efetivas axial e tangencial e a sua interação com as pás do hélice, nas condições de operação da embarcação é que vão determinar a possibilidade de ocorrência de vibrações induzidas pelo propulsor. Comparações com embarcações semelhantes, estudos teóricos simplificados e fórmulas empíricas podem facilitar a previsão de problemas com variações excessivas provocadas pelos hélices (ref. 19).

## 2.5 - Fase V

A integração casco-hélice-motor é realizada utilizando-se as curvas dos coeficientes de empuxo  $K_T$  e de torque  $K_Q$  em função do coeficiente de avanço  $J$  do hélice projetado, a curva de operação do motor (Potência  $P_D$  x rotação) e a curva de potência efetiva do casco ( $P_E$  x velocidade).

Variando-se a velocidade da embarcação e utilizando o mesmo procedimento básico da Fase III, respeitando-se os limites mínimos e máximos de operação do motor, chega-se à previsão de operação do sistema.

## 2.6 - Fase VI

O detalhamento geométrico de hélices de séries sistemáticas é simples, já que as suas tabelas de cotas normalmente incluem até raios de arredondamento, espessuras nos bordos, etc. O Anexo A apresenta as tabelas das características geométricas das séries sistemáticas do item 3, a seguir.

Uma vez projetado o hélice de uma embarcação, a qualidade deste projeto deverá ser mantida na etapa de confecção do hélice. Sabe-se que distorções geométricas de certa ordem alteram as características hidrodinâmicas dos hélices, piorando as eficiências resultantes e as condições de cavitação. Uma forma de garantir o desempenho do hélice construído, próximo daquele previsto num bom projeto é através da exigência de certas precisões de confecção. Tais precisões são definidas, em grande parte dos casos, a partir da regra nº 484 da ISO (International Standard): Shipbuilding - Ship screw propellers - Manufacturing Tolerances Part 1 ( $D$  maior que  $2,5m$ ) e Part 2 ( $0,80 < D < 2,5m$ ). Nesta norma, são utilizados quatro níveis de precisão que devem ser escolhidos de acordo com o tipo e a missão da embarcação: classe S - altíssima

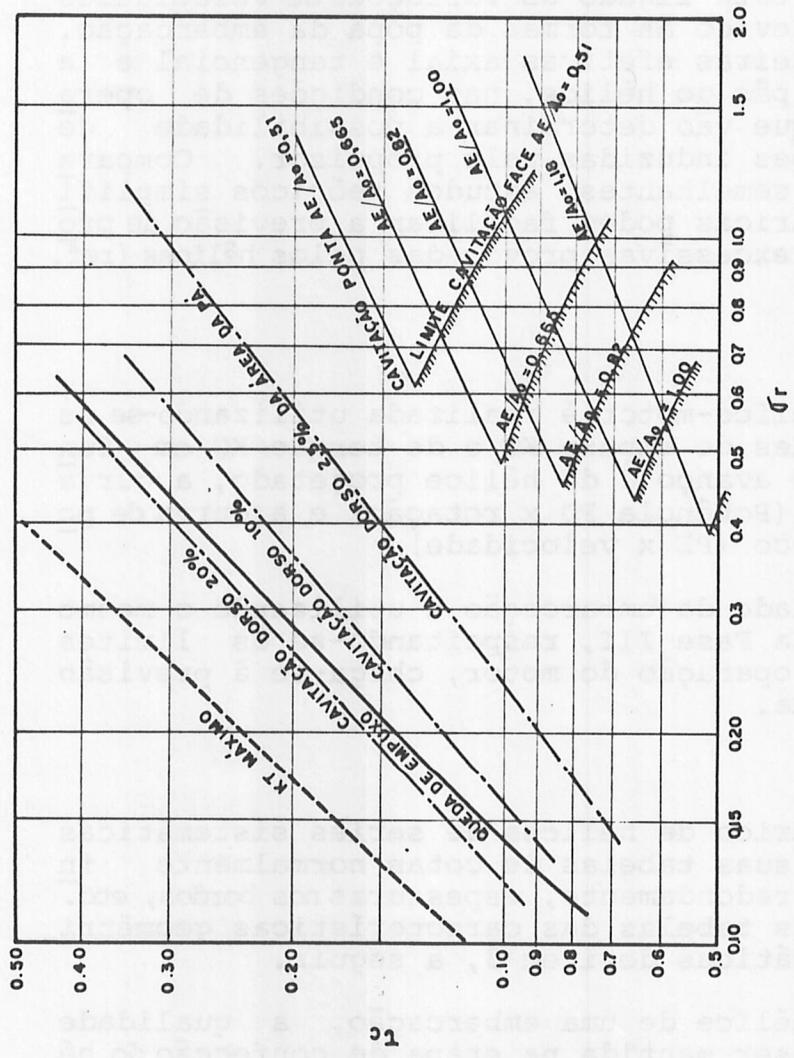


Figura 1 - Previsão de cavitação em hélices (ref. 6)

ma precisão, classe I - alta precisão; classe II - precisão média e classe III - tolerância alta.

### 3. As Séries Sistemáticas

Analisando as várias séries sistemáticas existentes, escolhemos três delas, que consideramos as mais importantes e as mais apropriadas para o projeto de hélices de pequenas embarcações, dentro das aplicações típicas de cada uma e levando-se em conta a quantidade e qualidade das informações disponíveis de geometria, de curvas características, de previsões de cavitação e de vibração. As três séries a que nos referimos são: B-Troost (Wageningen), Kaplan (com dutos) e a série Gawn-Burril (KCA), conforme mostra a Tabela 1 a seguir.

#### 3.1 - Série B-Troost

Trata-se da série de hélices mais utilizada, por cobrir a mais ampla faixa de aplicação e por possuir o maior número de estudos publicados.

Inicialmente foi estudada com 4 pás, sendo estendida para 2, 3, 5, 6 e 7 pás. Com exceção dos hélices B-Troost de 3 pás, todos os outros tem a mesma distribuição de cordas (ver Anexo A).

A distribuição do passo ao longo do raio é uniforme para todos os hélices da série, exceto para aqueles de 4 pás, onde há uma redução de passo nas regiões da raiz da pás (ver Anexo A).

A figura 2 apresenta um exemplo da geometria de um hélice B-Troost. Nota-se o ângulo de caiamento ("rake") de 15° e a assimetria em relação à linha de referência ("skew").

Toda a geometria da série B-Troost se encontra detalhada na referência 3, que também apresenta a geometria de uma variação da série B-Troost chamada de "BB". Tal variação apenas acrescenta maiores cordas nas pontas das pás, o que, em alguns casos, pode melhorar o desempenho em relação à cavitação. As curvas características da série "BB" são as mesmas da série "B-Troost".

Os polinômios  $KT = (J, P/D, AE/AO, Z)$  e  $KQ = (J, P/D, AE/AO, Z)$  também são apresentados na referência 3 que inclui, ainda, polinômios para correção de KT e KQ devido aos efeitos do número de Reynolds Re. Os resultados apresentados de KT e KQ x J são referidos a um número de Reynolds igual a  $2 \times 10^6$  e a utilização destes resultados em outros Re implicam na necessidade de sua correção.

O estudo do comportamento da série B-Troost em relação à cavitação é dado na referência 22. Estudos relacionados com vibrações dos hélices desta série são apresentados na referência 24.

TABELA I. Principais características das três séries.

### 3.2 - Série Kaplan

A invenção dos tubos Kort (uma forma de aumentar o empuxo em certas condições de operação dos propulsores, através do envolvimento dos hélices por dutos com perfis apropriados) levou à necessidade de criação de uma série especial de hélices, própria para operação dentro de dutos.

A série Kaplan, mostrada na Figura 3, tem como principal característica o fato de sua corda máxima ser localizada na ponta da pás.

Os resultados dos coeficientes de empuxo total, dos coeficientes de empuxo no duto, dos coeficientes de torque em função do coeficiente de avanço dependem da geometria do hélice e também do duto em que ele foi ensaiado. O Anexo A apresenta a geometria dos dutos NSMB nº 19a, 21, 22, 24 e 37. Os dutos 21, 22 e 24 são semelhantes ao duto nº 19a, apresentando como única diferença a razão corda/diâmetro L/D: enquanto o duto nº 19a tem  $L/D = 0,50$ , os dutos 21, 22 e 24 têm  $L/D$  iguais a 0,7, 0,8 e 1,0, respectivamente.

Os resultados disponíveis em bibliografias (ref. 10 e 11) em forma de regressões polinomiais são para os seguintes conjuntos hélices/dutos:

- hélice KA 3-65 (3 pás,  $AE/Ao = 0,65$ ) e duto 19a;
- hélice KA 4-70 (4 pás,  $AE/Ao = 0,70$ ) e duto 19a;
- hélice KA 4-55 (4 pás,  $AE/Ao = 0,55$ ) e duto 19a;
- hélice KA 5-75 (5 pás,  $AE/Ao = 0,75$ ) e duto 19a;
- hélice KA 4-70 e duto 22;
- hélice KA 4-70 e duto 24;
- hélice KA 4-70 e duto 37.

### 3.3 - Série Gawn-Burril (KCA)

Esta série foi derivada da série Gawn (referência 5), alterando-se basicamente a posição da corda máxima, que passou de  $r/R = 0,50$  para  $r/R = 0,75$ , buscando melhorar a distribuição de carregamento nas pás, melhorando o desempenho em relação à cavitação.

Devido às suas características de trabalho em altos coeficientes de avanço J e em índices de cavitação pequenos, foi a primeira série de hélices onde houve uma preocupação inicial de determinação do efeito da cavitação nas suas curvas características (referência 6).

A geometria dos hélices da série Gawn-Burril é simples: 3 pás, sem caimento, com simetria do seu contorno em relação à geratriz, passo radialmente uniforme, variação linear de espessuras, face plana, dorso com superfície circular e com simetria dos perfis em relação à linha de referência (lado

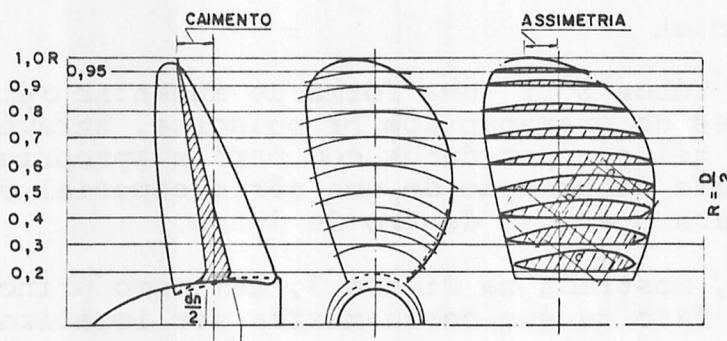


Figura 2 - Hélice da Série B-Troost

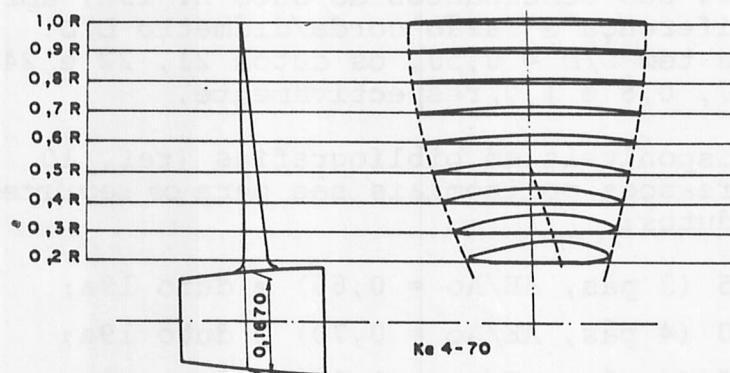


Figura 3 - Um Hélice da Série Kaplan

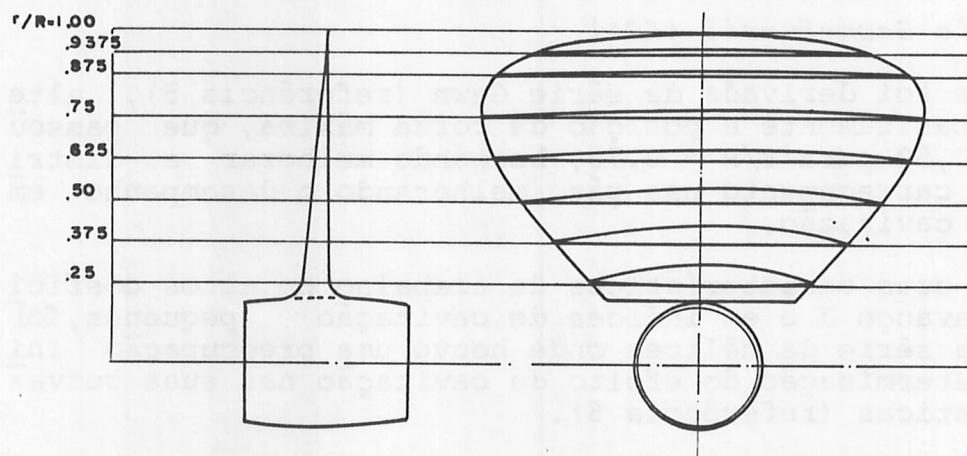


Figura 4 - Hélice da Série Gawn-Burril

do bordo de ataque é igual ao lado do bordo de fuga). Vide o Anexo A, item A.3. A Figura 4 mostra um hélice da série Gawn-Burriel.

Recentemente, aumentaram-se as facilidades de utilização desse sistema com a publicação de regressões polinomiais apropriadas pela referência 3 para as curvas características  $K_T$ ,  $K_Q$  e  $J$ , parametrizadas com o índice de cavitação  $\sigma$ .

#### 4. A Escolha das Séries

As figuras 5 e 6 mostram algumas comparações das características das três séries sistemáticas.

Na figura 5 são apresentadas as eficiências máximas dos hélices de cada série em função do coeficiente de carregamento:

$$CT = \frac{T}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V_a^2 \cdot A_o}$$

Também estão indicados os valores de eficiência ideal  $\eta_i$  em função de  $CT$ . Na parte superior da figura, tem-se indicações de valores típicos de  $CT$  para vários tipos de embarcações (conforme referência 10).

A figura 6 mostra valores (indicativos) dos limites de  $K_T/J^2$  das séries em função de  $J$ . As linhas cheias apresentam os limites em coeficiente de avanço mínimo e máximo da série B-Troost, as linhas em ponto e traço apresentam os limites para a série Gawn-Burriel e a linha tracejada apresenta a única diferença entre a série B-Troost e a série Kaplan (devido ao fato de, com  $J$  maiores, os empuxos nos dutos tomarem valores negativos, com o aumento do arrasto nos dutos).

Como pode-se notar, a utilização da série Kaplan em hélices com alto carregamento tende a ser vantajosa, em termos de eficiência. Assim, tais hélices podem ser bem utilizados em embarcações como rebocadores, empurradores e pesqueiros, que necessitam de alto empuxo em velocidades relativamente baixas. Obviamente, os custos de construção e instalação do sistema hélice mais duto são maiores que os custos de hélices sem dutos - tal questão de custos também será levada em conta na decisão.

As características da série Gawn-Burriel fazem com que seja mais aproveitada em hélices de embarcações rápidas, com altos coeficientes de avanço e baixos índices de cavitação.

A série B-Troost cobre a maior faixa de aplicação, onde hélices de carregamento moderado são necessários. Suas vantagens (alta eficiência, inúmeros subsídios para o projeto, facilidade construtiva) se constituem em enormes atrativos para sua utilização em projetos de hélices de pequenas embarcações.

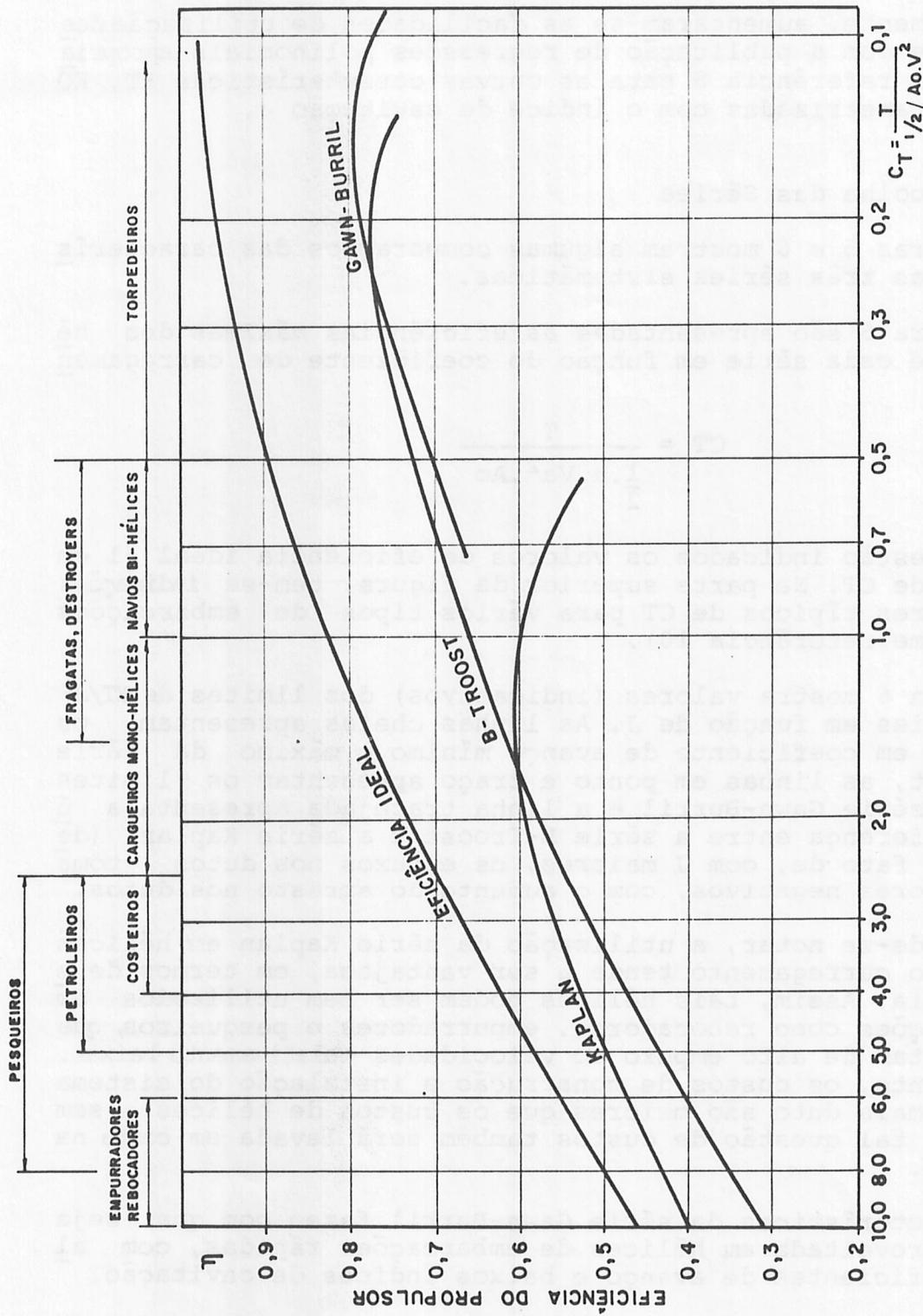


Figura 5 - Eficiências Máximas dos Hélices das Séries em Função do Carregamento

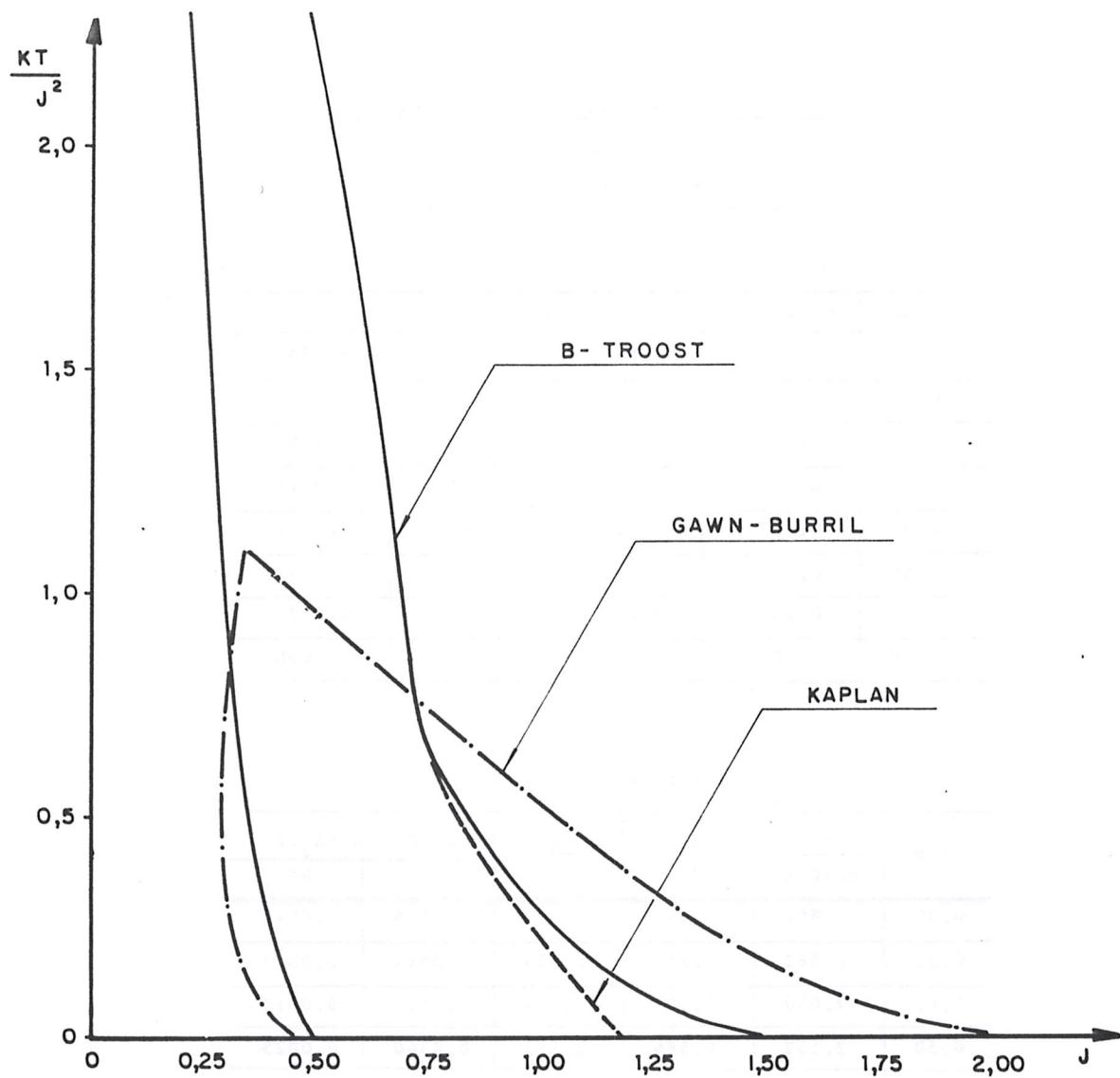


Figura 6 - Valores Típicos de  $KT/J^2 \times J$  da Séries

ANEXO A

GEOMETRIA DAS SÉRIES SISTEMÁTICAS DE HÉLICES

A.1. GEOMETRIA DOS HÉLICES DA SÉRIE B-TROOST  
(WAGENINGEN)

Z = 3 pás

r / R	<u>Cr</u> D.AE/Ao	<u>ar</u> Cr	<u>br</u> Cr	<u>tr</u> D
0,20	0,5543	0,616	0,350	0,0406
0,30	0,6107	0,611	0,350	0,0359
0,40	0,6667	0,599	0,350	0,0312
0,50	0,7067	0,583	0,355	0,0265
0,60	0,7287	0,558	0,389	0,0218
0,70	0,7227	0,526	0,442	0,0171
0,80	0,7090	0,481	0,478	0,0124
0,90	0,5523	0,400	0,500	0,0077
1,00	0	0	0	0,0030

4 ≤ Z ≤ 7 pás

r / R	<u>Cr.Z</u> D.AE/Ao	<u>ar</u> Cr	<u>br</u> Cr	<u>tr/D = A<sub>r</sub> - B<sub>r</sub>.Z</u>	
				Ar	Br
0,20	1,662	0,617	0,350	0,0526	0,0040
0,30	1,882	0,613	0,350	0,0464	0,0035
0,40	2,050	0,601	0,351	0,0402	0,0030
0,50	2,152	0,586	0,355	0,0340	0,0025
0,60	2,187	0,561	0,389	0,0278	0,0020
0,70	2,144	0,524	0,443	0,0216	0,0015
0,80	1,970	0,463	0,479	0,0154	0,0010
0,90	1,582	0,351	0,500	0,0092	0,0005
1,00	0	0	0	0,0030	0

r/R	CONTORNOS E LINHAS DE REFERÊNCIAS						ESPESSURAS	
	3 pás			de 4 a 7 pás			$\frac{tr}{D} = Ar - Br \times Z$	
	<u>Cr.Z</u> D.AE/Ao	<u>ar</u> Cr	<u>br</u> Cr	<u>Cr.Z</u> D.AE/Ao	<u>ar</u> Cr	<u>br</u> Cr	Ar	Br
0,20	1,633	0,616	0,350	1,662	0,617	0,350	0,0526	0,0040
0,30	1,832	0,611	0,350	1,882	0,613	0,350	0,0464	0,0035
0,40	2,000	0,599	0,350	2,050	0,601	0,351	0,0402	0,0030
0,50	2,120	0,583	0,355	2,152	0,566	0,355	0,0340	0,0025
0,60	2,186	0,558	0,389	2,187	0,561	0,389	0,0278	0,0020
0,70	2,168	0,526	0,442	2,144	0,524	0,443	0,0216	0,0015
0,80	2,127	0,481	0,478	1,970	0,463	0,479	0,0154	0,0010
0,90	1,657	0,400	0,500	1,582	0,351	0,500	0,0092	0,0005
1,00	0	0	0	0	0	0	0,0030	0,0000

Cr = corda da seção a um raio r

ar = distância entre o bordo de ataque e a linha geratriz na seção r

br = distância entre o bordo de ataque e a máxima espessura na seção r

tr = espessura máxima na seção r.

Cotas dos perfis - vide Referência 3.

Passo - distribuição uniforme, a menos para Z=4 pás, que tem a seguinte distribuição:

r/R	0,167	0,20	0,30	0,40	0,50	0,60	0,70	0,80	0,90	1,00
% do Passo	80	62,2	88,7	95,0	99,2	100	100	100	100	100

A.2. GEOMETRIA DOS HÉLICES DA SÉRIE  
KAPLAN E DOS TUBOS KORT

a) Hélices:

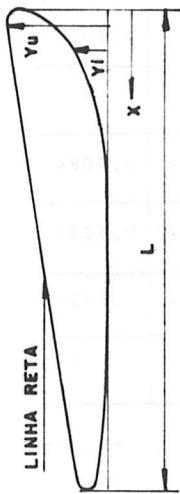
<u>r/R</u>	<u>Cr.Z</u> D.AE/Ao	<u>ar</u> Cr	<u>br</u> Cr	<u>tr</u> D
0,20	1,3222	0,550	0,3498	0,0400
0,30	1,5081	0,528	0,3976	0,0352
0,40	1,6774	0,513	0,4602	0,0300
0,50	1,8314	0,506	0,4913	0,0245
0,60	1,9690	0,501	0,4998	0,0190
0,70	2,0844	0,500	0,500	0,0138
0,80	2,1675	0,500	0,500	0,0092
0,90	2,2183	0,500	0,500	0,0061
1,00	2,2226	0,500	0,500	0,0050

- Espessura máxima no centro do eixo =  $0,049 \times D$

- Cotas dos perfis - ver Referência 10.

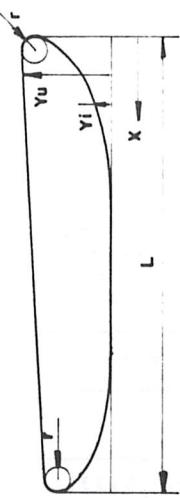
- Passo - uniforme, ao longo do raio do hélice.

DUTO N° 19a  
L/D = 0,50



PERCENTAGEM DA CORDA		
100X/L	100Y/L	100Yu/L
0	1.0.25	1.0.25
1.25	1.4.66	2.0.72
2.5	1.2.80	2.1.07
5	10.07	20.30
7.5	8.00	
10	6.34	
15	3.87	
20	2.17	
25	1.10	
30	0.48	
40		LINHA RETA
50		LINHA RETA
60		LINHA RETA
70		LINHA RETA
80		LINHA RETA
90		LINHA RETA
95		LINHA RETA
100		LINHA RETA

DUTO N° 37  
L/D = 0,50



PERCENTAGEM DA CORDA		
100X/L	100Y/L	100Yu/L
0	1.0.35	1.0.35
2.5	12.83	
5	10.00	
7.5	7.92	
10	6.25	
15	3.83	
20	2.08	
25	0.94	
30	0.33	
35	0.08	
40	0	
60	0	
70	0.08	
75	0.42	
80	1.00	
85	2.08	
90	3.83	
92.5	5.00	
95	6.50	
97.5	8.33	
100	12.42	

$$Y_u = \text{LINHA RETA}$$

$$r = 0.0667 L$$

PERCENTAGEM DA CORDA		
100X/L	100Y/L	100Yu/L
0	1.0.25	1.0.25
1.25	1.4.66	2.0.72
2.5	1.2.80	2.1.07
5	10.07	20.30
7.5	8.00	
10	6.34	
15	3.87	
20	2.17	
25	1.10	
30	0.48	
40		LINHA RETA
50		LINHA RETA
60		LINHA RETA
70		LINHA RETA
80		LINHA RETA
90		LINHA RETA
95		LINHA RETA
100		LINHA RETA

DUTO N° 21 —— L/D = 0,70

DUTO N° 22 —— L/D = 0,80

DUTO N° 24 —— L/D = 1,00

Cotas dos perfis dos dutos (referência 11)

A.3. GEOMETRIA DOS HÉLICES DA SÉRIE  
GAWN-BURRIL

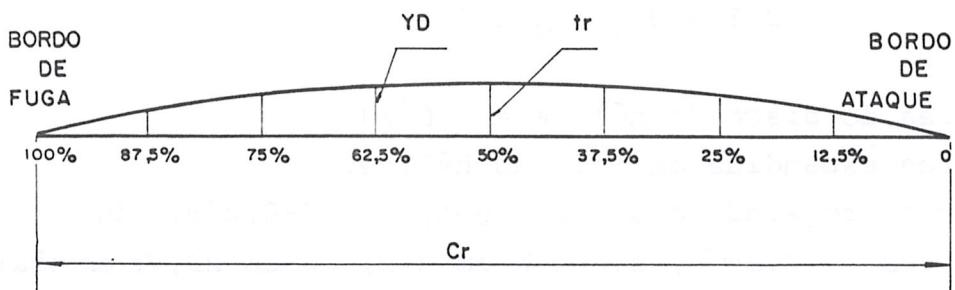
AE/AO	0,510	0,665	0,820	1,000	1,180
B.A.R.	0,50	0,65	0,80	0,95	1,10
$\frac{C_0,50}{D}$	0,3472	0,4531	0,5575	0,6794	0,8000

r/R	0,2500	0,3750	0,5000	0,6250	0,7500	0,8750	0,9375
$\frac{Cr}{C_0,50}$	0,604	0,819	1,000	1,140	1,212	1,139	0,946
$\frac{tr}{Cr}$	0,1013	0,0627	0,0415	0,0278	0,01806	0,0106	0,0076

VALORES DE  $(\frac{YD}{tr})$

$\frac{r}{R}$	0,250	0,3750	0,5000	0,6250	0,7500	0,8750	0,9375
$\frac{Cr}{C_0,50}$	0,1100	0	0	0	0	0	0
12,5	0,5505	0,4651	0,4676	0,4806	0,4923	0,5370	0,6094
75,0	0,8018	0,7642	0,7649	0,7668	0,7744	0,7963	0,8281
37,5	0,9505	0,9389	0,9405	0,9399	0,9436	0,9444	0,9531
62,5							
50	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0

YF - zero em todos os perfis, exceto no perfil  $r/R=0,25$ , nos dois bordos, quando  $\frac{YF}{tr} = 0,11$ .



YD - ordenada do dorso       $C_{0,50}$  - corda do perfil  $r/R = 0,50$

YF - ordenada da face      tr - espessura máxima de cada r

- Número de pás = 3
- $d/D = 0,20$
- $\frac{t(r/R=1,0)}{D} = 0,00125$
- Ângulo de cimento =  $0^\circ$
- Raios das pontas de pás =  $0,00125 \times D$
- Espessura na raiz da pá:  $\frac{tr_{raiz}}{D} = 0,045 = \tau$
- passo  $\frac{P}{D}$  - uniforme ao longo do raio
- sem "skew" ou seja: contorno simétrico em relação à linha geratriz

OBS.: Dados obtidos a partir da referência 6.

S I M B O L O G I A

- Ao - área do disco do hélice =  $\pi D^2/4$ ;  
Ae - área expandida das pás do hélice;  
Ap - área projetada das pás:  $Ap \equiv Ae(1,067-0,229.P/D)$   
Bp -  $(N PD^{1/2}) / Va^{2,5}$ , sendo N em RPM, PD em HP, Va em nós;  
C - corda dos perfis das seções cilíndricas das pás;  
CB - coeficiente de bloco da embarcação;  
Cp - coeficiente de potência =  $PD/(0.5\rho Ao^3 Va)$ ;  
Ct - coeficiente de carregamento =  $T/(0.5\rho Ao^2 Va)$ ;  
D - diâmetro do hélice;  
EHP - potência efetiva do casco da embarcação em HP;  
err - eficiência relativa rotativa;  
g - aceleração da gravidade;  
I - imersão do centro do eixo propulsor;  
J - coeficiente de avanço =  $Va/(ND)$ ;  
KQ - coeficiente de conjugado =  $Q/(\rho N^2 D^5)$ ;  
KT - coeficiente de empuxo =  $T/(N^2 D^4)$ ;  
L - corda dos perfis do duto;  
N - número de rotações do hélice;  
Pm - pressão média do hélice =  $Patm + \rho g I$ ;  
Patm - pressão atmosférica  
PD - potência entregue ao hélice;  
P - passo do hélice (relacionado à face);  
PE - potência efetiva do casco;  
Pv - pressão de vaporização da água;  
Q - conjugado do hélice;  
r - raio do perfil cilíndrico;  
R - raio do hélice;  
T - empuxo do hélice;  
t - coeficiente de redução da força propulsora;  
V - velocidade da embarcação;  
Va - velocidade de avanço =  $V(1-w)$ ;  
Vr - velocidade resultante do hélice =  $[Va^2 + (0,7\pi.N.D)^2]^{1/2}$ ;  
W - coeficiente de esteira efetiva média;  
σn -  $(P-Pv)/(0.5 \rho N^2 D^2)$ . Índice de cavitação baseado na rotação do propulsor;

- $\sigma$  -  $(P - Pv)/(0.5 \rho Va^2)$  - índice de cavitação baseado na velocidade de avanço;  
 $\sigma_r$  -  $(P - Pv)/(0.5 \rho Vr^2)$  - índice de cavitação baseado na velocidade resultante da pás;  
 $\delta$  -  $(N D)/Va$ , sendo em RPM, D em pés, Va em nós;  
 $\rho$  - densidade da água (em Kgf.seg<sup>2</sup>/m<sup>4</sup>);  
 $\eta_d$  - eficiência quase-propulsiva = PE/PD;  
 $\eta_h$  - eficiência do casco =  $(1-t)/(1-w)$ ;  
 $\eta_i$  - eficiência ideal do hélice;  
 $\eta_t$  - eficiência em empuxo = CT/CP  
 $\tau_c$  - coeficiente de carregamento =  $T/(0,5 \cdot \rho \cdot Ap \cdot Vr^2)$  baseado em Vr.

## REFERÉNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. TROOST, L. Open Water test series with modern propeller forms; part 3: two-bladed and five-bladed propellers extension of the three and four-bladed B series. Transactions of North East Coast Institution of Engineers Shipbuilder, 67:89 - 130, 1950/1951.
2. LAMMEREN, W.P.A. Van & MANEN, J.D. Van. The Wageningen B - screw. Transactions of the Society of Naval Architects and Marine Engineers, 77:269-317, 1969.
3. OOSTERVELD, M.W.C. & VAN OOSSANEM, P. Further computer analysed data of the Wageningen B-screw series. International Shipbuilding Progress, 22 (251): 251-262, July 1975.
4. YOSHIKOV, K.; Zlatev, Z.; STANEVA, A. Optimum characteristics equations for the K-J propeller design charts, based on the Wageningen B-Screw series. International Shipbuilding Progress - 33 (382): 101 - 111, June, 1986.
5. GAWN, R.W.L. Effect of Pitch and blade width on propeller performance. Transactions of the Royal Institution of Naval Architects, 95: 157-193, 1953.
6. GAWN, R.W.L. & BURRIL, L.C. Effect of cavitation on the performance of a series of 16 inch model propellers. Transactions of the Royal Institution of Naval Architects, 99: 690-728, 1957.
7. BURRIL, L.C. & EMERSON, Propeller cavitation, further tests on 16 inch propeller models in the King's College cavitation tunnel. Transactions of the North East Coast Institution Engineers & Shipbuilders, 79: 295-320, 1962-1963.
8. KOZHUKHAROV, P.G. Regression analysis of Gawn - Burril series for application in computer - aided high-speed propeller design - In: International Conference on High-Speed Surface Crafts, 5., Southampton May 7-8, 1986. Proceedings.
9. MANEN, J.D. Van. The design of screw-propellers in nozzles. International Shipbuilding Progress, 6 (55): 95-113 Mar. 1959.
10. OOSTERVELD, M.W.C. Ducted propeller characteristics. In: Symposium on Ducted Propellers Teddington, May 30 June 1, 1973, Proceedings. London, RINA, 1973, p. 35-69.
11. GENT, W. Van & OOSTERVELD, M.W.C. Ducted propeller systems and energy saving - In: International Symposium on Ships Hydrodynamics and Energy Saving - El Pardo, September, 1983. Paper nº VI-3.

12. SAUNDERS, SNAME, E. Hydrodynamics in ship design. New York, 75, 2v.
13. MANEM, J. Van. The choice of the propeller. Marine Technol, 3 (2): 158-171, April 1966.
14. SILVERLEA A. Projects for unconventional marine propulsor devices. London, MPL, 1969. (National Laboratory Ship Report 131) 7<sup>o</sup> Symposium on Naval Hydrodynamics, Rome, August, 25-30, 1968. 885-917
15. O'BRIEN. P. The design of marine screw propeller. London. Hutchinson, 1962. 397p.
16. BAHGAT, F. Marine propellers - new design methods. Alexandria U.A.R. Al Maaref Establishment, 1966. 473p.
17. KRESS, R. LORENTZ, E.L. Marine propeller selection. SAE Transactions, 79:334-345, 1970.
18. KRUPPA, C. Practical aspects in the design of high-speed small propellers. International Shipbuilding Progress, 23(267):375-385, Nov. 1976.
19. PADOVEZI, C. D.; HIRATA, H. Escolha e projeto de propulsores. 9º Congresso Nacional de Transportes Marítimos e Construção Naval. Rio de Janeiro, setembro 1982, SOBENA, 113 p.
20. BLOUNT, D. & FOX, D.L. Small - craft power prediction. Marine Technology, 13(1):14-45, Jan. 1976.
21. TRIANTAFYLLOU, M.S. Computer-aided propeller preliminary design using the B-Series. Marine Technology, 16 (4): 381-391 October 1979.
22. BLOUNT, D. & FOX, D.L. Design considerations for propellers in a cavitating environment. Marine Technol, 15(2):144-178, April 1978.
23. PADOVEZI, C.D. & HIRATA, K. - Marine Propellers - 1º Pan American Symposium on Propellers and Gear Boxes, Rio de Janeiro, Junho 1989, IPEN.
24. PARSONS, N. G. & VORUS, W.S. - Added mass and damping estimates for vibrating propellers. In: Propellers'81 Symposium, Virginia Beach, May 26-27, 1981. New York, SNAME, 81, 0. 273-302.

код та відповідь на нього відповідає згаданому

загальним змістом та засобами, якими вони використовують

для цих функцій. Але вони не використовують згадані засоби, а лише використовують засоби, якими вони використовують для цих функцій.

Задача залогової установи - зберегти згадані засоби, якими вони використовують для цих функцій.

Задача залогової установи - зберегти згадані засоби, якими вони використовують для цих функцій.

Задача залогової установи - зберегти згадані засоби, якими вони використовують для цих функцій.

Задача залогової установи - зберегти згадані засоби, якими вони використовують для цих функцій.

Задача залогової установи - зберегти згадані засоби, якими вони використовують для цих функцій.

Задача залогової установи - зберегти згадані засоби, якими вони використовують для цих функцій.

Задача залогової установи - зберегти згадані засоби, якими вони використовують для цих функцій.

Задача залогової установи - зберегти згадані засоби, якими вони використовують для цих функцій.

Задача залогової установи - зберегти згадані засоби, якими вони використовують для цих функцій.

Задача залогової установи - зберегти згадані засоби, якими вони використовують для цих функцій.