

PROJETO ESPECIAL DE PROPULSORES DE EMBARCAÇÕES FLUVIAIS

Carlos Daher Padovezi

IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, Brasil,
e-mail: padnaval@ipt.br

RESUMO

O presente trabalho apresenta considerações técnicas sobre a importância de uma concepção adequada dos propulsores e avalia o impacto de um projeto adequado de hélices no resultado final da eficiência de um sistema de transporte fluvial.

São analisados os seguintes aspectos dos propulsores de embarcações fluviais: número de hélices, posição de instalação na popa, número e formas de pás, resistência estrutural, área de pás, distribuições de espessuras e de passos, efeitos de alterações geométricas de perfis das pás, adoção de tubos Kort, integração dos propulsores às formas de popas das embarcações.

É apresentada uma proposição de sistematização de um projeto especial de propulsores, levando em consideração todos os aspectos identificados como importantes para o desempenho operacional de embarcações fluviais.

Ao final, é mostrada uma nova concepção de hélices de alto carregamento para utilização em embarcações fluviais de transporte de carga, desenvolvida pelo autor em estudos no IPT.

ABSTRACT

This work presents technical considerations about the importance of an adequate conception of inland ship propellers and evaluates the impact of an adequate propeller design on the efficiency of inland transport system. The following aspects of inland ships propellers are analyzed: number of propellers, position of installation in the ship stern, number and forms of blades, structural resistance, blades propeller area, distributions of thicknesses and pitches, effect of geometric alterations of profiles of the blades, adoption of Kort nozzle (ducted propellers and propeller integration to the ship stern. A proposal of systematization of a special propeller design is presented, leading in consideration all the aspects identified as important for the operational performance of inland ships. To the end, a new conception of high loading propellers for use in cargo transport inland ships, developed for the author in studies in the IPT (Technological Research Institute of São Paulo).

1 INTRODUÇÃO

Os propulsores de embarcações fluviais de transporte de cargas podem ser considerados como propulsores de alto carregamento, ou seja, aqueles que recebem muita potência para produzir alto empuxo em áreas de pás relativamente reduzidas. Portanto, são propulsores que convivem com grandes diferenciais de pressões em suas pás, com baixas eficiências finais e com possibilidade de ocorrência de cavitação e de vibrações induzidas.

Tais características, por si só justificam a necessidade de haver atenção especial e uma busca de novas concepções de propulsores para as embarcações fluviais de carga. O desafio é desenvolver um estudo das condições operacionais dos propulsores deste tipo de embarcações, para, ao final, propor alterações em geometrias e em concepções dos hélices, com o objetivo principal de obter ganhos em desempenho operacional.

2 PROPULSORES DE EMBARCAÇÕES FLUVIAIS DE CARGA

As embarcações fluviais de carga apresentam, geralmente, duas características determinantes: calados reduzidos, devido às restrições de profundidades da maior parte das vias navegáveis, e grandes deslocamentos, por conta da necessidade de aumento da eficiência econômica do transporte de cargas.

A combinação destes dois fatores - calados reduzidos e grandes deslocamentos – resulta em hélices com restrição importante de diâmetro com forças de empuxo elevadas, o que configura altos carregamentos das pás, ou seja, grandes diferenças de pressões distribuídas em áreas relativamente pequenas de pás. Altos carregamentos das pás implicam em eficiência baixa e em possibilidade de ocorrência de sérios problemas relacionados com cavitação e vibrações.

Além do problema já citado de alto carregamento das pás, há alguns outros problemas que podem interferir no desempenho dos hélices de embarcações fluviais de carga:

- ✓ freqüentes alterações da quantidade de carga das embarcações, com grandes variações de calados, resultando em variações significativas dos valores de resistência ao avanço e de coeficientes propulsivos;
- ✓ no caso de empurrador em um comboio, podem ocorrer alterações do número e da formação do conjunto de barcaças, o que leva a mudanças dos valores de resistência ao avanço;

- ✓ necessidade de realização freqüente de manobras, exigindo boa eficiência a ré dos propulsores e características que não prejudiquem a manobrabilidade da embarcação e garantam um bom desempenho em parada brusca;
- ✓ operação em águas rasas e restritas, implicando em interferências no desempenho hidrodinâmico dos hélices;
- ✓ as formas cheias e de fundos planos dos seus cascos, às vezes até com a adoção de túneis de popa, piorando a distribuição de esteiras nas regiões de instalação dos hélices;
- ✓ possível presença de troncos ou outros corpos na água, podendo tornar necessária a instalação de estruturas para proteção dos hélices e dos lemes contra choques, ou, no mínimo, exigir reforço estrutural das pás a fim de aumentar a resistência a choques.

Neste sentido, o projeto dos hélices de embarcações fluviais de carga deve levar em conta este conjunto complexo de fatores: inevitabilidade de altos carregamentos nas pás, todos os fatores físicos condicionantes (como restrições de calados, formas de popa, etc.) e as alterações das condições de operação.

Algumas soluções tecnicamente atraentes quando há alterações importantes de condições operacionais, como hélices de passos controláveis, tendem a não ser adotadas em grande parte das embarcações por apresentarem custos inicial e de manutenção mais altos.

Existe muito pouco em referências bibliográficas sobre hélices de embarcações fluviais de cargas, e não muito mais sobre qualquer tipo de propulsor de alto carregamento.

Há uma concordância de vários autores de que devem ser utilizados métodos de análise e de projeto diferentes daqueles utilizados para hélices de carregamentos leves, como em VOLKER (1976), NARITA et alli. (1975) e CHRISTOPOULOS & LATORRE (1983).

CHRISTOPOULOS & LATORRE (1991) desenvolveram um procedimento de projeto para embarcação fluvial de alto carregamento, aplicando-o, anos após, no desenvolvimento de um hélice por eles denominado “semi-Kaplan”, com alterações das distribuições de cordas e de passos da série sistemática de hélices em dutos “Kaplan”, esta mostrada em GENT, Van & OOSTERVELD (1983). Os resultados do desempenho em viagens com os hélices “semi-Kaplan” mostraram que o novo procedimento de projeto introduziu uma melhoria em cerca de 10% da eficiência propulsiva do empurrador, comparando-se consumos de combustível e velocidades médias.

3 A GEOMETRIA DE PROPULSORES

A geometria do hélice é definida pelas seguintes características: diâmetro, área das pás, número de pás, ângulos de passos, perfis das seções ou distribuição de espessuras ao longo das cordas, distribuições de espessuras máximas das pás e diâmetro do bosso. Cada uma delas tem sua importância dentro do projeto, a qual deve ser verificada à luz das particularidades apresentadas por hélices com altos carregamentos de pás aplicados a embarcações fluviais.

Dada a extrema complexidade da operação de embarcações fluviais, a tendência atual é que a geometria dos seus hélices tenha algumas características como simetria do contorno das pás, espessuras maiores que aquelas de séries sistemáticas de propulsores, grande área de pás e diâmetros reduzidos. Para compensar a restrição de diâmetros, são utilizadas pequenas razões de redução de rotações dos motores, a fim de resultar em altas rotações nos eixos dos hélices.

3.1. Número de Hélices

A escolha do número de hélices de uma embarcação tem reflexo direto sobre a geometria que deverá resultar de um projeto, pois quanto maior o número de hélices, menor o carregamento das suas pás, pois haverá uma maior divisão da produção de empuxo necessário para mover a embarcação em uma determinada velocidade. O diâmetro necessário dos hélices pode ser diminuído se aumentada a quantidade de hélices da embarcação, o que leva a uma subdivisão maior da potência disponível em cada eixo.

Em embarcações que navegam em águas extremamente rasas, pode ser conveniente adotar três ou quatro hélices. Neste caso, a maior quantidade de motores, redutores, eixos e mancais necessários resultará em custos proporcionalmente maiores.

3.2. Diâmetro

A eficiência dos hélices tende a crescer com o aumento do diâmetro, porque o carregamento específico das pás (representado por $C_{TH} = \frac{T}{\frac{1}{8} \cdot \rho \cdot V_A^2 \cdot \pi \cdot D^2}$) decresce. A

eficiência ideal η_I aumenta com a diminuição de C_{TH} , conforme PADOVEZI, C. D. (1977).

O diâmetro de um hélice é limitado pela geometria da região onde vai ser instalado. Tal região deve ficar totalmente imersa para que não ocorra aeração (recolhimento de ar pelas pás do hélice). Em embarcações com restrições extremas de calado, pode haver a necessidade de aplicação de túneis de popas, que, com geometria apropriada de uma “escavação” nas

linhas da popa da embarcação, de modo a permitir hélices com diâmetros superiores ao calado (até cerca de 10% a mais) CHRISTOPOULOS & LATORRE (1983).

A experiência tem mostrado que os túneis de popa, que encarecem a construção e aumentam riscos de vibrações e de perdas de eficiência, devem ser adotados como alternativa radical, quando não há possibilidade de absorção das potências necessárias dos motores por diâmetros menores que os calados das embarcações.

A distância das pontas das pás ao casco deve ter um valor mínimo que garanta que os esforços variáveis induzidos pelo propulsor não sejam elevados, a ponto de introduzir intensidades de vibrações indesejadas. Quanto maiores as distâncias das pás ao casco, menores as possibilidades do hélice induzir vibrações. Estas distâncias (claras) são recomendadas por projetistas e sociedades classificadoras em valores que variam de 8% a 25% do diâmetro do hélice, dependendo do tipo de embarcação, conforme BROCKETT et alli. (1981).

No caso de embarcações fluviais de cargas, onde as restrições de calados são determinantes, há uma tendência de utilizar os maiores diâmetros possíveis, diminuindo as claras em valores próximos dos limites onde as vibrações induzidas pelo propulsor podem tornar-se inconvenientes e danosas. Em alguns casos, há a necessidade de diminuição do diâmetro de hélices de determinada embarcação em operação, devida à constatação de altas intensidades de vibrações na popa, ocasionadas por uma distância do hélice ao casco insuficiente.

3.3. Área das Pás

A área das pás de um hélice tem influência sobre dois aspectos importantes: em princípio, quanto menor a área das pás, menores as perdas por atrito (arrasto) e maior a eficiência do hélice; por outro lado, quanto menor a área da pá maior a sua suscetibilidade ao fenômeno de cavitação. Uma forma prática e confiável de se prever problemas relacionados com cavitação é a utilização do diagrama de Burril [BRESLIN & ANDERSEN (1994)], Figura 1, baseado em dezenas de ensaios em túneis de cavitação de hélices de geometrias variadas. O diagrama relaciona o coeficiente de carregamento referido com pressões presentes nas pás τ_c e o índice de cavitação relativo à velocidade resultante na seção a $r/R=0,70$ das pás $\sigma_{0,7R}$.

Os projetistas tendem a buscar sempre a utilização da menor área possível das pás, pois a eficiência tende a decrescer com o aumento da área devido ao fato das perdas por atrito aumentarem. No caso de hélices de alto carregamento (altos valores de C_{TH}), as perdas axiais são tão grandes que as pequenas perdas por atrito passam a ser irrelevantes, quando se considera a vantagem de haver uma maior margem de segurança em relação à cavitação proporcionada por uma área maior de pá.

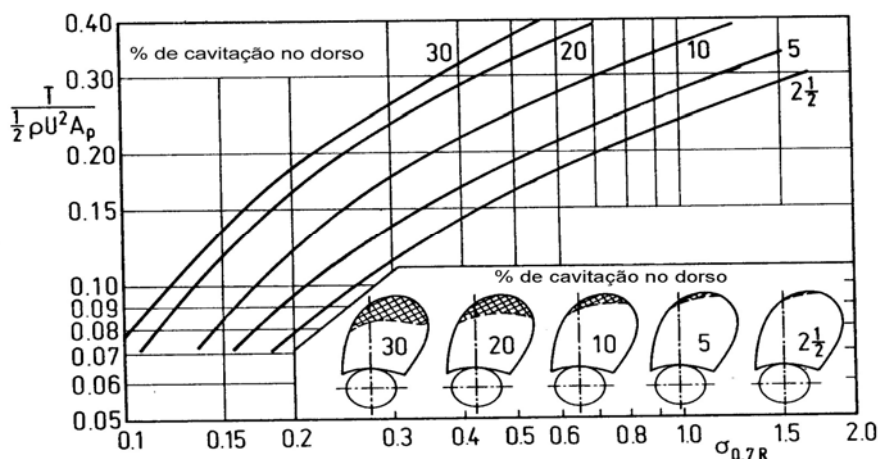


Figura 1 - Diagrama de Burril para Previsão de Quantidades de Cavitação em Pás de Hélices.

Fonte: Burril & Emerson, "Propeller Cavitation: Further Tests on 16 in Propeller Models in the King's College Cavitation Tunnel". Transactions of NECIES, 1962, vol.79, pp. 295-320, [BRESLIN & ANDERSEN (1994)].

$$\tau_C = \frac{T}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V_R^2 \cdot A_p} \quad \sigma_{0,7R} = \frac{P_o - P_V}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V_R^2} \quad V_R = \sqrt{V_A^2 + (0,7 \cdot \pi \cdot n \cdot D)^2} \quad A_p = (1,067 - 0,229 \cdot \frac{P}{D}) \cdot A_E$$

A Tabela 1 mostra alguns valores de eficiências em água aberta de três hélices da série B-Troost de 4 pás e razão $P/D=1,0$, mas com razões de áreas expandidas A_e/A_o diferentes (0,40, 0,70 e 1,00), variando com o coeficiente de carregamento das pás C_{TH} . Como se pode notar na Tabela 1, as diferenças de eficiências só são importantes em valores menores de C_{TH} . A razão principal pode ser explicada pela Figura 2, baseada em dados de BRESLIN & ANDERSEN (1994), que mostra as várias componentes das perdas de eficiências em hélices. A eficiência de um hélice em água aberta pode ser definida da seguinte forma:

$$\eta_o = 1 - (\text{perdas axiais}) - (\text{perdas rotacionais}) - (\text{perdas por arrasto nas pás}).$$

Tabela 1 - Comparações de Eficiências em Água Aberta de Hélices B-Troost com Três Razões de Áreas Expandidas, em Função do Coeficiente de Carregamento C_{TH} . 4 Pás, $P/D = 1,00$ - PADOVEZI (1997)

C_{TH}	EFICIÊNCIAS EM ÁGUA ABERTA η_o (%)		
	$Ae/Ao=0,40$	$Ae/Ao=0,70$	$Ae/Ao=1,00$
0,5	69,9	69,0	63,8
1,0	64,8	63,7	61,0
3,0	49,6	48,3	47,6
5,0	41,7	40,7	40,3
6,0	39,0	38,0	37,8
7,0	36,7	35,8	35,7
8,0	34,8	34,0	33,9
9,0	33,2	32,4	32,4
10,0	31,8	31,0	31,0

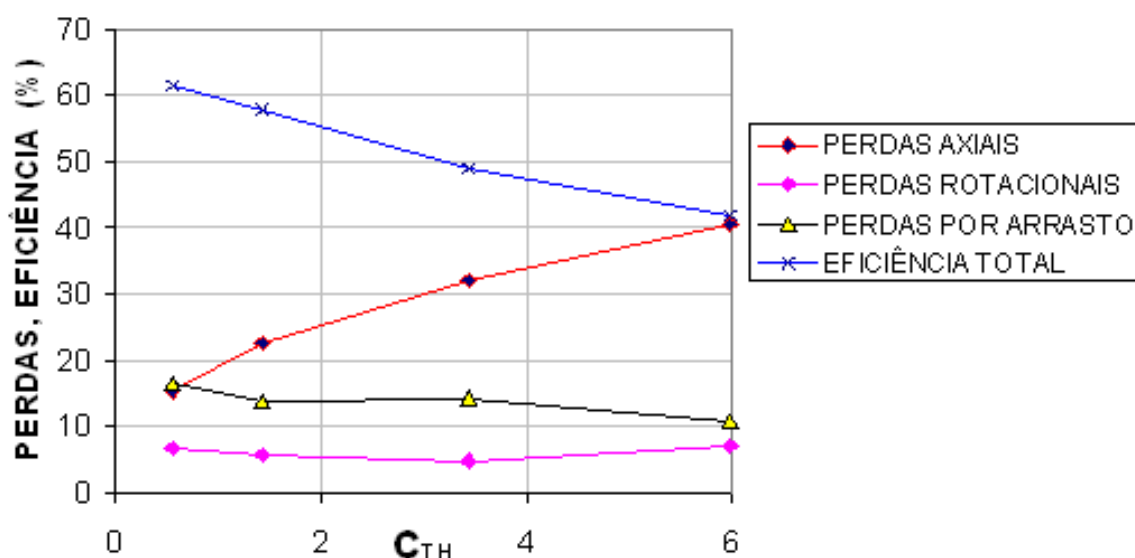


Figura 2 - Perdas de Eficiência de Um Hélice em Função do Carregamento das Pás, baseada em BRESLIN & ANDERSEN (1994)

As perdas relacionadas com a área das pás são aquelas devidas ao arrasto nas pás, que apresentam tendência de diminuir com o aumento de C_{TH} . Proporcionalmente, a importância das perdas por arrasto diminui mais ainda com o acréscimo de C_{TH} , devido ao fato das perdas axiais crescerem de uma maneira significativa, fazendo cair drasticamente a eficiência total.

3.4. Número de Pás

O número de pás de hélices de embarcações fluviais varia geralmente de 3 a 5, sendo mais comum hélices de 4 pás. Hélices com menores números de pás tendem a ter eficiências levemente maiores que aqueles com mais pás. Por outro lado, os hélices com números de pás

menores apresentam níveis de vibrações induzidas significativamente maiores que os hélices de maior número de pás.

Contudo, o aspecto mais importante ligado à escolha do número de pás de um hélice está relacionado com a frequência de excitação de vibrações no casco e no sistema eixo-propulsor. A frequência de excitação (frequência da passagem das pás $Z.n$) deve ser diferente das frequências de ressonâncias do casco e do sistema de eixos propulsores.

Quando não há problemas de proximidades de frequências de ressonâncias, há uma tendência de utilizar 4 pás porque há uma maior facilidade de construção e balanceamento estático e dinâmico das pás e porque está entre $Z=3$ (eficiência um pouco maior) e $Z=5$ (vibrações induzidas menores).

3.5. Espessuras Máximas

Basicamente, a determinação das espessuras máximas das seções das pás de um hélice depende do cálculo de resistência estrutural necessária. As sociedades classificadoras indicam formulações para calcular as espessuras mínimas requeridas que, inclusive, levam em consideração a probabilidade de fadiga do material.

No caso de embarcações que operam em águas onde há grande probabilidade de ocorrência de choques nas pás de seus hélices, como acontece com navios quebra-gelo e algumas embarcações fluviais, pode haver necessidade de aumento das espessuras para que haja uma resistência adicional que evite fraturas e deformações das pás durante sua operação.

A Tabela 2 mostra os valores de razões de espessuras máximas por diâmetro de hélices da série B-Troost, obtidos de OOSTERVELD & OOSSANEN, Van (1975), e série Kaplan, obtidos de GENT, Van & OOSTERVELD (1983), e de um navio quebra-gelo, obtidos de WALKER et alli. (1997). No caso do navio quebra-gelo, o diâmetro do bossó é cerca de 30% do diâmetro do hélice e nota-se que o aumento de espessuras é maior proporcionalmente nas proximidades das pontas das pás, onde há maiores riscos de choques.

O'BRIEN (1962) apresenta alguns dados de correções de passos e de eficiências medidos em hélices com aumentos de espessuras de 100% com relação às espessuras previstas pela série B-Troost. Os resultados obtidos para hélices operando em coeficientes de avanço J baixos e com alto carregamento, para que o hélice com o dobro de espessuras mantenha a mesma condição de operação que outro com espessuras de série (mesmo empuxo resultante, em mesmo número de rotações) foram os seguintes:

- na condição de tração estática (“bollard-pull”), a correção em passo deve ser de 3%,

- para velocidades entre 3 e 4 nós (1,5 a 3,0 m/s), as correções de passos devem ser de 6%;
- em velocidades maiores, a correção necessária de passo chega a 10%;
- a diminuição de eficiências nas várias condições é da ordem de 2%, para o caso de embarcações onde o projeto do hélice é feito a partir de restrição de diâmetro.

O aumento de espessuras máximas implica em aumento da razão t/c (espessura/corda) das seções, alterando a forma dos perfis das seções das pás (distribuições das espessuras ao longo das cordas). As distribuições de pressões sofrem alterações que podem fazer com que piorem as condições de cavitação dos perfis mais próximos das pontas das pás. Para compensar o aumento de espessura, uma solução satisfatória é aumentar as cordas das pás (a área expandida).

Tabela 2 – Distribuições de Espessuras Máximas das Seções das Pás ao Longo do Raio para Séries B-Troost, Kaplan e Navio Quebra-Gelo. Hélices de 4 pás – PADOVEZI (1997)

r/R	tr/D		
	B-TROOST	KAPLAN	QUEBRA-GELO
0,200	0,0366	0,0400	-
0,300	0,0324	0,0352	0,0530
0,400	0,0282	0,0300	0,0476
0,500	0,0240	0,0245	0,0421
0,600	0,0198	0,0190	0,0367
0,700	0,0156	0,0138	0,0313
0,800	0,0114	0,0092	0,0259
0,900	0,0072	0,0061	0,0204
1,000	0,0030	0,0050	0,0150

3.6. Passos

A distribuição de ângulos de passos ao longo do raio está diretamente ligada à distribuição de circulação e de carregamento das pás. Neste sentido, às vezes, modifica-se a distribuição de passos para resolver problemas específicos, como, por exemplo, aliviar o carregamento das pontas das pás de embarcações de guerra, a fim de diminuir intensidades de cavitação e, conseqüentemente, de ruído.

Em navios de grande porte, com altos coeficientes de blocos, geralmente há necessidade de se moldar a distribuição de passo às variações médias dos valores de esteiras nominais (velocidades de escoamento na região de instalação do hélice). Geralmente, o limite da variação radial de passos de uma pá é dado pela praticidade construtiva, ou seja: são evitadas distribuições de passos que levem a geometrias de pás muito complexas e de difícil implementação.

No caso de embarcações fluviais, em princípio, é recomendado que sejam adotadas distribuições de passos simplificadas das séries sistemáticas, com passos constantes ao longo do raio, o que, no mínimo, facilita a construção dos hélices.

3.7. Caimento (“rake”) e Assimetria do Contorno das Pás (“skew”)

O caimento é uma inclinação do eixo das pás no sentido longitudinal da embarcação, geralmente para ré. Trata-se de um expediente para aumentar as distâncias das pontas das pás ao casco ou para aumentar o diâmetro do hélice possível de ser instalado em determinada popa. O aumento das distâncias das pás ao casco diminui o risco de ocorrência de vibrações induzidas pelo propulsor. Como inconveniente, introduz momentos que obrigam a adoção de maiores espessuras nas raízes das pás.

O “skew”, assimetria do contorno em relação à linha geratriz da pá, apresenta uma grande contribuição para a redução dos níveis de cavitação intermitente (que pode provocar erosão) e de vibrações induzidas pelo propulsor em operação em campo não-uniforme de velocidades. A adoção de “skew” exige um projeto estrutural das pás mais elaborado por conta da assimetria do contorno, que leva à uma composição complexa de esforços resultantes em cada perfil radial. O “skew” torna mais suave a passagem das pás pelas várias regiões de velocidades diferentes do campo de esteiras, diminuindo as intensidades das flutuações de pressões junto às pás.

Tanto o caimento como o “skew” não introduzem diferenças significativas nas eficiências dos propulsores em condições de operações normais, a vante. Contudo, quando em operação à ré, os hélices com estas assimetrias apresentam certa redução de eficiência quando comparados com hélice sem caimento e sem “skew”. Nas embarcações fluviais, onde a operação à ré dos hélices é freqüente, tem havido uma tendência de evitar-se tanto o caimento como o “skew” no projeto dos hélices.

4 CONSIDERAÇÕES SOBRE OS PROBLEMAS E SOLUÇÕES DOS PROPULSORES DE EMBARCAÇÕES FLUVIAIS E DE APOIO OCEÂNICO

- 4.1. O problema da baixa eficiência do sistema propulsivo das embarcações fluviais de carga, praticamente inevitável por conta do alto carregamento das pás, pode piorar muito se as linhas da popa e os sistemas auxiliares de manobras e de proteção contra choques levarem a um comprometimento dos coeficientes propulsivos, refletidos em baixos valores de eficiência do casco η_H .

- 4.2. A condição de projeto do hélice deve ser escolhida, de preferência, fazendo-se uma média ponderada (em função do tempo) de todas as condições de operação do comboio. O projeto de hélices de passo fixo para a condição de tração estática não é recomendável para as embarcações fluviais, pois tem como consequência a limitação da razão passo/diâmetro, implicando em sub-utilização das potências disponíveis dos motores quando em condições normais de operação a vante. A obtenção de grandes forças de tração estática, para aumentar a segurança e a manobrabilidade com a embarcação em velocidade zero, pode ser garantida pela adoção de hélices em dutos.
- 4.3. A Figura 3 apresenta uma comparação entre as eficiências em água aberta de hélices de duas séries (B-TROOST e KAPLAN, esta em dutos) e a eficiência ideal η_I , obtida através da Teoria do Disco Atuador, em função do coeficiente de carregamento em empuxo dos hélices. Como pode ser verificado, em altos carregamentos, os hélices em dutos apresentam maiores eficiências em água aberta, o que é explicado pela contribuição do empuxo resultante nos dutos. Quanto menor a velocidade da embarcação, maior o carregamento C_{TH} das pás e maior o diferencial entre velocidades externa e interna nos dutos, resultando em maior empuxo. À medida que a velocidade da embarcação (a velocidade externa do duto) aumenta, diminui a contribuição em empuxo do duto (a sustentação) e aumenta a sua resistência (arrasto).

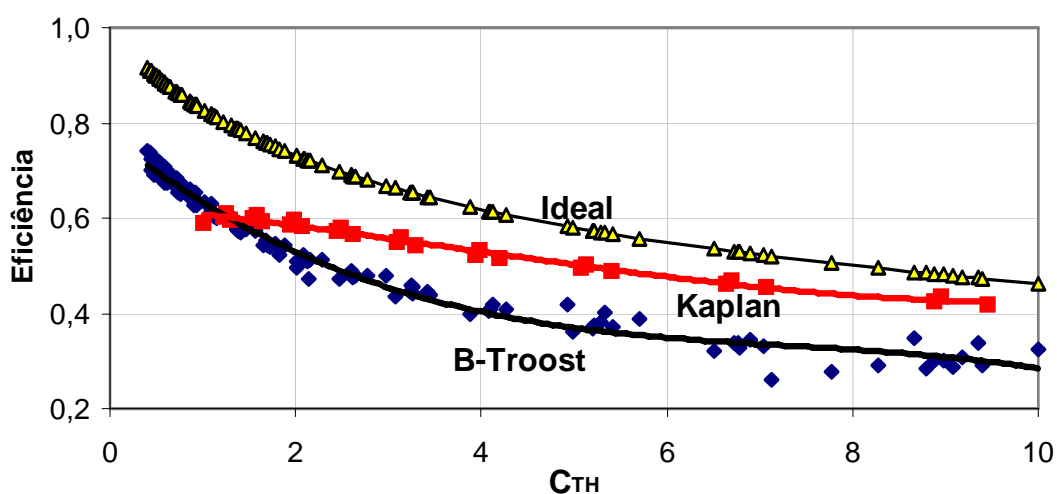


Figura 3 - Eficiência Ideal e das Séries Sistemáticas B-Troost e Kaplan em Função de Coeficiente de Carregamento C_{TH} PADOVEZI (1997)

$$C_{TH} = \frac{T}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A_0 \cdot V_A^2} = \frac{T}{\frac{1}{8} \cdot \rho \cdot \pi \cdot D^2 \cdot V_A^2} \qquad \eta_I = \frac{2}{1 + \sqrt{1 + C_{TH}}}$$

4.4. Para muitas embarcações, pode ser vantajosa a adoção de hélices em dutos (tubos Kort), pois possibilita maiores empuxos a baixos coeficientes de avanço, garantindo bom desempenho em tração estática (“bollard-pull”) e em velocidades de cruzeiro. Para embarcações fluviais de carga, as maiores desvantagens (certa porcentagem do duto pode não contribuir com empuxo devido à proximidade do casco e exigência de cuidados redobrados em não permitir choques das pás com pedaços de troncos) podem ter uma relevância tal que torne impeditiva a utilização de hélices em dutos. Em embarcações fluviais de carga que operam em locais de água mais limpa, sem muito detrito, e com calados relativamente maiores, será sempre vantajosa a adoção de hélices em dutos.

4.5. A geometria adequada das pás dos hélices de embarcações fluviais de cargas deve possuir:

- contorno simétrico (ou aproximadamente simétrico) das pás (ou seja, sem “skew”) e não utilização de caimento (“rake”), a fim de possibilitar maior eficiência em operação à ré. As embarcações fluviais operam em certos períodos à ré, devido à realização de manobras de aproximação, de formações de comboios e para ultrapassagens de pontos críticos das vias. Para que as eficiências à ré dos hélices não sejam muito menores que as eficiências a vante, os hélices de embarcações fluviais devem preferencialmente ter uma certa simetria. No caso de embarcações convencionais, o “skew” contribui na diminuição dos níveis de vibrações induzidas pelos propulsores em operação em regiões de esteiras não-uniformes. Em embarcações fluviais, contudo, a desvantagem de utilização do “skew” nos hélices, pela diminuição de eficiência à ré, é maior que o possível ganho em diminuição de vibrações.
- diâmetros que permitam a instalação dos hélices nas popas sem problemas - é preferível operar com hélices de menores diâmetros (eficiências de hélice um pouco menores) do que correr riscos de comprometer a eficiência do casco, cujos efeitos sobre a eficiência propulsiva tendem a ser mais determinantes;
- áreas de pás suficientes para haver garantia de não ocorrência de cavitação excessiva, a partir da constatação que, com altos carregamentos, as diferenças de eficiências de hélices de diferentes razões de áreas expandidas não são muito significativas;

- aumento das espessuras máximas das seções das pás, de uma forma mais localizada nas pontas, tomando como base a experiência acumulada em embarcações “quebra-gelo”, para que as pás possam resistir a choques com uma certa intensidade, evitando distorções nas formas das pás, que irão influenciar no rendimento operacional e obrigarão a antecipar docagens da embarcação para reparos. A avaliação dos efeitos dos acréscimos de espessuras sobre o desempenho hidrodinâmico dos hélices deve ser feita a partir de experimentos e resultados obtidos em referências bibliográficas, como, por exemplo, em O’BRIEN (1962) e em PADOVEZI et alli. (1994).

5 UM PROJETO INICIAL DE PROPULSOR

A partir de considerações técnicas referentes a cada uma das características geométricas importantes dos hélices (espessuras, diâmetro, passos, etc.), foi inicialmente proposto um hélice (Tabela 3), para realização de investigações experimentais sobre seu desempenho. Este propulsor, sem dutos, teve sua geometria baseada inicialmente no contorno da pá da série KCA, mostrada em CARLTON (1994), e na distribuição de espessuras de hélices de navios quebra-gelo, mostrada em WALKER (1997). No presente estágio, estão sendo realizados ensaios em Tanque de Provas e em Túnel de Cavitação para avaliação quantitativa de seu desempenho, comparando-o com hélices de série sistemática. Em seguida, serão construídos dois protótipos para instalação e testes em uma embarcação em escala real.

Tabela 3 – Detalhes geométricos do hélice projetado (em testes em escala reduzida). 4 pás, $A_e/A_o=0,88$; $P/D = 0,7$; Perfis NACA 16-021, Linha média NACA $a=1,0$

r/R	Raio (mm)	Corda (mm)	Espessura Máxima (mm)	Curvatura Máxima (mm)	Ângulo de Passo (grau)
0,200	20	45,21	10,600	3,000	48,09
0,300	30	62,65	9,650	2,750	36,60
0,400	40	77,36	8,700	2,500	29,12
0,500	50	90,73	7,750	2,250	24,02
0,600	60	101,18	6,800	2,000	20,37
0,700	70	107,20	5,850	1,750	17,66
0,800	80	109,23	4,900	1,500	15,56
0,900	90	97,22	3,950	1,250	13,91
0,950	95	79,77	3,475	1,125	13,20
1,000	100	0,00	3,000	1,000	12,56

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BRESLIN, J. P. & ANDERSEN, P. (1994) **Hydrodynamics of Ship Propellers**. Cambridge Ocean Technology Series 3, Cambridge University Press, 1994, 559 pages, Cambridge, USA.
- BROCKETT et alli. (1981) **Design Theory for Marine Propellers**. Cambridge MIT Course on Design Theory for Propellers - Lecture Notes, June 1981.
- CARLTON, J. S. (1994) **Marine propellers & Propulsion**. Butterworth-Heinemann, Oxford, 1994, 498 pages.
- CHRISTOPOULOS, B & LATORRE, R. (1983) **River Towboat Hull and Propulsion**. Marine Technology, SNAME, vol. 20, no. 3, July 1983, pp. 209-226.
- CHRISTOPOULOS, B & LATORRE, R. (1991) **Design and Trials of a New River Towboat Propeller**. Marine Technology, vol. 28, no. 4, July 1991, pp. 236-246.
- GENT, W. Van & OOSTERVELD, W. C. (1983) **Ducted Propeller Systems and Energy Saving**. International Symposium on Ship Hydrodynamics and Energy Saving. El Pardo, September 6-9, 1983. Paper No. VI-3, 19 pages.
- GENT, W. Van (1979) **On the Use of Lifting Surface Theory for Moderately and Heavily Loaded Ship-Propellers**. Netherlands Ship Model Basin, Publication 536, 1979, 89 pages.
- HARVALD, S. A. (1976) **Wake and Thrust Deduction at Extreme Propeller Loadings for a Ship Running in Shallow Water**. Transactions of the Royal Institution of Naval Architects. vol. 118, 1976, pp. 213-233.
- KINNAS, S.A. (1992) **A General Theory for the Coupling Between Thickness and Loading for Wings and Propellers**. Journal of Ship Research, vol. 36, no. 1, March 1992, pp. 59-68.
- LATORRE, R. (1976) **Flow Around Full Ship Stern: Translation of Selected Japanese and German Technical Articles**. Department of Naval Architecture and Marine Engineering, Report No. 198, University of Michigan, Ann Arbor, 1976.
- LATORRE, R. et alli. (1981) **Improvement of Inland Waterway Vessel and Barge Tow Performance**. Department of Naval Architecture and Marine Engineering, Report No. 249, University of Michigan, Ann Arbor, September 1981.
- LATORRE, R. & DÜNOW, H-H (1981) **Improvement of River Towboat Propulsion: Translations of Selected German and Russian Technical Articles**. Department of Naval Architecture and Marine Engineering, Report No. 243, University of Michigan, Ann Arbor, November 1981.
- LUTHRA, G. (1981) **Investigation of the Wake Distribution of a Towboat Pushing a Barge Train**. Hansa, vol. 111, no. 18, September 1974, pp. 1515-1521. English translation: LATORRE & DÜNOW (1981).
- MANEN, Van, J.D. (1954) **Recent Data on Cavitation Criteria**. International Shipbuilding Progress, vol. 1, no. 1, 1954, pp. 39-47.
- NARITA, H. et alli. (1975) **Application and Development of a Large Ducted Propeller for the 280,000-dwt Tanker MS Thorsaga**. Transactions of Society of Naval and Marine Engineering - SNAME. vol. 83, 1975, pp. 244-273.
- O'BRIEN, T.P. (1962) **The Design of Marine Screw Propellers**. Hutchinson & Co. LTD. London, England, 1962, 397 pg.
- OOSTERVELD, M.W.C. & OOSSANEN, P. Van (1975) **Further Computer Analyzed Data of the Wageningen B-Screw Series**. International Shipbuilding Progress, vol. 22, no. 251, July 1975, pp. 251-262.
- PADOVEZI, C.D. & HIRATA, K. (1982) **Escolha e Projeto de Propulsores**. 9º. Congresso Nacional de Transportes Marítimos e Construção Naval - SOBENA. Proceedings. Rio de Janeiro, Setembro, 1982.
- PADOVEZI, C.D., TACHIBANA, T. & TAKEI, Y. (1994) **Avaliação Experimental dos Efeitos de Imperfeição nas Pás de Hélices**. 15º. Congresso Nacional de Transportes Marítimos e Construção Naval - SOBENA. Proceedings. Rio de Janeiro, Agosto/Setembro, 1994.
- PADOVEZI, C. D. (1994) **Propulsores de embarcações fluviais de carga**. 15º Congresso Nacional de Transportes Marítimos, Construção Naval e Offshore, Rio de Janeiro, Outubro, 1994.

- PADOVEZI, C. D. (1997) **Aplicação de resultados de escala real no projeto de hélices de embarcações fluviais**. Dissertação (Mestrado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Naval e Oceânica. São Paulo: 1997, 87 p.
- SCHWANECKE, H. (1979) **On the Propulsion Quality of Ships Operating at Restricted Water Depth**. Ocean Engineering, vol. 6, pp. 571-580, 1979.
- TRIANAFYLLOU, M.S. (1979) **Computer-Aided Propeller Preliminary Design Using the B-Series**. Marine Technology, SNAME, vol. 16, no. 4, October 1979, pp. 381-391.
- VOLKER, H. (1976) **written discussion to POHL, K.H., Über die Wechsel Wirkung Zwischen Schiff und Propeller**. English translation: LATORRE (1976)
- WALKER, D. et alli. (1997) **Hydrodynamic Load on Ice-Class Propellers During Propeller-Ice Interaction**. Journal of Marine Science and Technology, SNAJ. 2:12-20. 1997.
- WU, T. Y. (1962) **Flow Through a Heavily Loaded Actuator Disc**. Schiffstechnik, Band 9, 1962, Heft 47, pp. 134-138.

LISTA DE SÍMBOLOS

- A_E - área expandida do hélice,
 A_o - área do disco do hélice : $A_o = \pi \cdot D^2 / 4$,
 C_r - corda da seção da pá de raio r,
 C_T - coeficiente de resistência total,
 C_{TH} - coeficiente de carregamento do propulsor: $C_{TH} = T / (1/2 \cdot \rho \cdot A_o \cdot V^2)$,
 D - diâmetro do propulsor,
 g - aceleração da gravidade,
 J - coeficiente de avanço do hélice,
 K_Q - coeficiente de torque do hélice, em água aberta,
 K_T - coeficiente de empuxo do hélice, ou da soma hélice+duto no caso de hélices em dutos,
 K_{Tn} - coeficiente de empuxo do duto,
 n - número de rotações,
 P - passo geométrico das pás do hélice,
 R - raio total do hélice: $R = D/2$,
 r - raio de uma determinada seção da pá,
 R_T - resistência ao avanço da embarcação,
 R_n - número de Reynolds,
 T - empuxo fornecido pelo hélice, ou pelo soma hélice+duto no caso de hélices em dutos,
 V - velocidade da embarcação,
 V_A - velocidade de avanço: $V_A = V \cdot (1 - \omega)$,
 Z - número de pás de um hélice,
- γ - densidade da água (= massa / volume),
 ρ - densidade específica da água: $\rho = \gamma / g$,
 η_o - eficiência do propulsor em água aberta: $\eta_o = J \cdot K_T / (2 \cdot \pi \cdot K_Q)$