"DESEMPENHO HIDRODINÂMICO DE EMBARCAÇÕES FLUVIAIS"

Giuliana Bonatelli Dario, Toshi-ichi Tachibana
Departamento de Engenharia Naval e Oceânica da Universidade de São Paulo
e-mail : giuliana@usp.br , tatibana@usp.br

IPEN XV COPINAVAL Meeting
Montevideo - Uruguay
11 - 14 Nov. 1997

RESUMO

O trabalho apresenta uma análise hidrodinâmica das principais embarcações fluviais, os empurradores, chatas e comboios das mesmas, e autopropelidos, que poderão facilmente ser adaptados às condições de projeto de integração do Mercosul.
Para tanto, são apresentados os parâmetros principais necessários para um projeto hidrodinâmica. Seus resultados são representados em função das dimensões principais, seus coeficientes geométricos e restrições das vias navegáveis.

ABSTRACT

This paper presents a hidrodynamic analisys of the principal inland vessels, such as tugs/pushers, barges and theirs convoy, and self-propelled vessels, which can be easily adapted to the conditions of the Integration project of MERCOSUL.
For this, it present the main parameters for hidrodynamic design. The results are based upon the dimensions of the hull, the geometric coefficients and waterway's restrictions .

1- INTRODUÇÃO

O projeto do Tietê-Paraná tem muitas fases, mas um dos fundamentos é o desenvolvimento completo de um moderno sistema de transporte intermodal através de uma ampla região.
Os rios Tietê-Paraná e Paraguai formam o eixo do sistema intermodal de Transporte do Mercosul.
O rio Tietê-Paraná é uma união natural de São Paulo ao Oceano Atlântico, através de uma rica região agrícola no oeste do Brasil; por outro lado, este sistema cobrirá grandes distâncias tão longe como Assunção, Montevidéo, Buenos Aires e o Mar. ë por isto que também é conhecido como : "Sistema de transporte através do coração do Mercosul - Mercado Comum do Cone Sul".
A crescente necessidade de buscar-se o barateamento do custo do transporte de cargas como grãos, minérios, combustíveis, etc., tem motivado um crescimento do número de embarcações nas várias hidrovias brasileiras.
A imensa maioria das informações técnicas e estudos para subsidiar projetos é apropriada para embarcações marítimas, havendo pouco material bibliográfico relativo a projetos de embarcações fluviais. Uma das razões deste descompasso é que o projeto de embarcações fluviais, além de depender de fatores como missão, autonomia e capacidade de carga, como ocorre com o projeto de embarcações marítimas, também depende das especificidades da via onde cada embarcação irá operar. Ou seja, elaborar um projeto otimizado de uma embarcação para

navegar em uma determinada via fluvial acaba sendo um problema local ou regional.

As características físicas da via fluvial são determinantes para o projeto das embarcações que irão nela operar. Assim, aspectos do efeito de águas rasas, como restrições de calados e de larguras, raios de curvaturas mínimas do canal navegável, presença de correntezas, aproximações de eclusas, cruzamentos de embarcações em espaços relativamente restritos, levam a preocupações específicas que interferirão no projeto dos sistemas, de uma forma completamente diferenciada das embarcações marítimas convencionais.

O presente trabalho de pesquisa teve a finalidade de propor alguns procedimentos e métodos para auxiliar o projeto de embarcações fluviais que operarão em vias brasileiras, tomando como base os métodos de auxílio a projetos de embarcações convencionais, onde já se encontra automatizadas algumas considerações aqui abordadas.

2- Concepção das Embarcações

Respeitando as características peculiares de cada uma das embarcações, são apresentadas e resultados de análise dos seguintes itens do projeto de embarcações fluviais:

- **Dimensões Principais;**
- **Análise de Resistência;**
- **Propulsão;**
- **Estabilidade.**

No entanto, antes de apresentar os resultados, há a necessidade de uma análise prévia das características básicas de cada uma das embarcações que são objetos do presente trabalho.

2.1) Automotores :

Possuem propulsão própria e capacidade de transporte de cargas pesadas e diversas. Apresentam peculiaridades que os distinguem das embarcações marítimas convencionais, trabalham em geral com restrição de profundidade ; em locais onde a presença de ondas é constante, como lagos extensos e baías, apresentando, nestes casos, melhor comportamento que os comboios fluviais. São características da região sul do país (Lagoa dos Patos) e são freqüentes na navegação da calha principal do rio Amazonas; onde o transporte fluvial é quase exclusivo e onde é empregado no transporte misto de cargas e passageiros; são ainda, bastante comuns nos rios europeus e norte-americanos, e têm se mantido como uma alternativa ao sistema chatas - empurrador.

Os automotores também podem ser utilizados em determinados trechos de navegação de cabotagem, atuando como veículos de integração com o transporte fluvial.

2.2) Chatas :

Embarcações de pequeno calado, sem propulsão própria e com capacidade de transporte de cargas pesadas. Como não tem autonomia para se locomoverem, são empurradas/rebocadas por embarcações denominadas empurradores/rebocadores. São a forma mais simples de embarcações, a simplicidade das suas linhas decorrem do fato de navegarem sempre em velocidades relativamente baixas, com pequenos números de Froude, nas quais a formação de ondas é menos pronunciada. Por outro lado, a perspectiva de compor comboios, altera o conceito de formas finas, com baixos coeficientes prismático e volumétrico, ou seja, navegando isolada, a chata pode ter bom desempenho hidrodinâmico, mas quando integrada com outra ou outras, pode apresentar rendimento menor.

Algumas restrições geométricas importantes sem dizer das condições do meio, por exemplo correnteza, para a definição das dimensões das chatas são resultantes das características da via navegável, principalmente as profundidades, larguras e

raios de curvaturas dos canais de navegação, os vãos e alturas das pontes que cruzam os rios e as dimensões das eclusas de transposição de barragens. Na figura 1 apresenta-se o comboio tipo Tietê.

2.3) Empurradores :

Embora o papel do empurrador fluvial se assemelhe ao de rebocadores marítimos, ou seja, não passa de um "cavalo mecânico", as formas de um e de outro são bastantes diferentes pelo fato de existirem restrições severas de calado nos empurradores fluviais. Como opera a ré das chatas na maior parte do tempo há a necessidade de se considerar o conjunto do comboio resultando em formas bastantes características em função da hidrovia. Suas dimensões podem ou não depender da hidrovia; em rios como o Amazonas, certamente existirão poucas restrições de dimensões máximas, o que permite uma ampla liberdade neste aspecto. Em outros rios como o Tietê/Paraná, onde existem restrições de profundidade e/ou navegação através de eclusas as dimensões ficam limitadas pelo comprimento útil da eclusa e pelo porte das chatas, o calado em geral fica limitado pela profundidade da hidrovia. Como ilustração são apresentados na figura 2 empurradores típicos utilizados na navegação americana, européia e ex-União Navegação, com o intuito de mostrar empurradores quinados, de formas curvas, bi e tri-hélices e com popa em semi-túnel.

3- Dimensões Principais

Os primeiros passos da espiral de projeto são as definições das dimensões principais mais importantes para a concepção da embarcação; pois é nela que se decide as formas e todos os parâmetros que influem na resistência hidrodinâmica do casco, bem como na consideração das restrições físicas da via e os requisitos do armador.

As dimensões principais aqui consideradas são :

A1- Comprimento (L);
A2- Boca (B) ;
A3- Calado (H);
A4- Pontal (T) ;
A5- Deslocamento(∇)
A6- Coeficientes de Forma .

É uma tendência natural de cada hidrovia estabelecer embarcações padrões ou embarcações tipo. Esta padronização tem a vantagem de facilitar tanto os aspectos de construção quanto de operação, manutenção e reparo, tendo desta forma um sistema hidroviário mais eficiente, indicando tendências a padronização dos diversos trabalhos necessários para operação de uma hidrovia.

Apesar do item padronização ser importante, foram analisadas as várias formas de embarcações e, comparando as formulações usadas pelos diversos autores estudados (Latorre, Bari, IPT e outros), obteve-se algumas fórmulas relevantes aplicáveis às hidrovias brasileiras que poderão auxiliar na automação de projetos levando a sistemas mais eficientes e competitivos a outros meios de transportes.

A.1- Comprimento (L):

Empurradores:

i)Latorre :

$$L = 62.0 + 75\chi - 0.235\chi^{1.8} \text{ (ft)}$$

$(50 < L < 200)$, $(3.0 \leq \chi \geq 32.4)$ (1)

χ - (BHP/número de eixos) / 100.0).

Assim para bi-hélices de potência 2400HP, o resultado preliminar de comprimento é L = 131.4 ft ou

L = 40.0 m .(figura 3)

Chatas:

i) Bari :

$$Lpp = 4.356 * \nabla^{1/3} \quad (2)$$

Esses dados foram obtidos da análise da figura 4, das chatas de Bangladesh.

ii) IPT :

$$L = 0.5326\nabla^2 - 13.821\nabla + 250$$

$(20 < L < 100)$ (3)

Obtido da regressão dos resultados de diversas embarcações ensaiadas no laboratório do IPT[4].

Automotores :

i) Bari :

$$L_{PP} = \left(4.9878\ V^{1/3} + 20.80\right) / C_b^{\ 1/3} \qquad (4)$$

Formulação aqui apresentada porque as dimensões principais dos automotores considerados por Bari se aproximam muito com as dimensões dos automotores do Brasil,

ii) IPT :

A partir dos dados apresentados na referência 6, foi feita uma regressão que fornece valores típicos de comprimento de automotores em função do deslocamento, de forma análoga a obtida por Bari.

$$L = 0.8166\nabla^2 - 27.38\nabla$$

$$(\ 10 < L < 120\ ) \qquad (5)$$

A.2- Boca :

Empurradores :

De acordo com a referência [1] Bari apresenta todas as dimensões preliminares usadas para empurradores, em função do comprimento. Assim, pode-se chegar a uma boca compreendido entre 2 < B < 10 (figura 5). No entanto na prática a sua escolha é mais em função das dimensões das chatas e o volume necessário para acomodar o motor necessário para a propulsão do comboio.

Chatas :

i) Bari :

$$B = 0.235 L_{PP} \qquad (6)$$

ii) IPT :

$$B = 0.1418 L + 4$$

$$(4 < B < 20) \qquad (7)$$

É importante notar que, em rios canalizados, a definição da boca das chatas deve sempre levar em consideração as formações dos comboios, resultante da análise econômica e as restrições das vias em que deverão operar (larguras das câmaras de eclusas, vãos de pontes, etc.). Por exemplo, na hidrovia Tietê a menor largura da câmara de eclusa é 11,76 m o que fez escolher a boca máxima do comboio até 11m em função das operações exigidas dentro da eclusa e outras restrições existentes na via.

Automotores :

i) Bari :

$$B = \left(\left(1.8443\left(V / L_{PP} C_b^{\ 1/3}\right) + 0249\right) / C_b^{\ 1/3}\right) \qquad (8)$$

Na figura 6, Bari apresenta uma relação entre a boca calculada, através da equação 8 e a boca real da embarcação onde pode-se verificar os desvios encontrados na formulação.

ii) IPT :

A partir da referência 6 (figura 7) foi feita uma regressão de uma curva média que nos dá os valores típicos de comprimento de boca de automotores em função do comprimento.

$$B = 0.1786\ L$$

$$(4 < B < 20) \qquad (9)$$

A.3- Calado:

Trata-se de um item difícil de indicar parâmetros ou fórmulas, pois depende basicamente das restrições físicas da via navegável e representa um dos mais importantes nesta fase do projeto, já que deve-se aproveitar ao máximo permitido pelas condições físicas da via e nas dinâmicas do escoamento em águas rasas. Apesar disto, são apresentadas algumas formulações elaboradas a partir dos dados do IPT para orientação da escolha deste parâmetro.

Automotores

Nota-se (figura 8) grande dispersão dos pontos pois essa dimensão depende muito das características da via.

$$H = 0.0337 L + 0.2045 \qquad (10)$$

Empurradores:

O calado do empurrador não é aqui abordado porque deverá integrar o comboio com as chatas, e este, desde que não seja maior que o das chatas não deverá apresentar problemas.

Chatas

A referência 5 (figura 9), apresenta relação de vários valores de calados de várias

chatas em função do comprimento, para algumas das vias que são os calados dos respectivos rios citados acima de alguns outros.

A.4- Pontal:

Este parâmetro depende basicamente do tipo de carga (o pontal é maior para embarcações de cargas de baixo fator de estiva), das relações com o calado e da borda livre exigida e outras restrições físicas da via, tais como na eclusagem e passagem sobre a ponte.

A.5- Deslocamento :

Empurradores:

O deslocamento normalmente é consequência dos outros parâmetros e o volume necessário para alojar o motor que propulsionarão conjunto; no entanto Bari apresenta como $\nabla = 250$ tons um padrão para dimensões principais (L, B, H) das embarcações-tipo de Bangladesh.

Chatas :

i) IPT :

A referência 5 (figura 10) apresenta uma relação Cb x Deslocamento onde o valor do deslocamento está compreendido entre $250 < \nabla < 4500$ (tons), que poderá auxiliar na definição da embarcação.

ii) Bari :

A figura 11, mostra a variação do deslocamento x peso leve em relação a todos os tipos de embarcações estudados por Bari ($100\ t < \nabla < 800\ t$).

Assim, nota-se nas figuras que o deslocamento de chatas também são funções das restrições físicas da via e resultado da analise econômica. Neste item, deve-se aproveitar o deslocamento máximo permitido em função do número de Froude do calado ou da profundidade do local, que influencia no escoamento ao redor da chata/comboio.

Automotores :

Para este item, somente a fórmula de Bari mostrou-se como informação orientativa :

$$\Delta = 1.281 * DWT + 7.726 \qquad (11)$$

A.6- Coeficientes de forma :

A análise dos coeficientes de forma só tem sentido nos automotores, pois os coeficientes das chatas são conseqüência dos outros itens em função do número de Froude anteriormente citados.

a) para Cb, duas concentrações principais de valores , um em torno de 0.60 e outro em torno de 0.80;

b) para a relação L/B em função do comprimento duas linhas de crescimento;

c) com relação a tendência B/H é de maior dispersão;

d) a relação comprimento-deslocamento tende a estabilizar-se para comprimentos maiores, em valores entre 6 e 7;

e) a relação Cwl em função de Cp mostra uma concentração de valores em torno de Cwl de 0.7 a 0.8.

4- Análise de Resistência

4.1- Observações Iniciais

É apresentada a resistência à propulsão procurando fornecer meios de estimar este valor em função das características de forma, e ainda orientações gerais para elaboração das linhas do casco.

É o item mais importante, já que este deverá definir a máquina propulsora (motor), assim o dimensionamento inadequado poderá repercutir durante a vida da embarcação, podendo resultar empreendimento de retorno má ao armador, viabilizando a empreitada em alguns casos.

Automotores:

Devemos considerar três aspectos principais:

I. a embarcação deve ter capacidade mínima de velocidade para vencer as correntezas do rio onde irá operar. Como não existe um requisito único e geral, mas particular para cada rio, o projetista deve conhecer as características hidráulicas do rio, ao longo do trecho de operação e sua variabilidade longo do ano;

II. a embarcação deve ter distância de parada brusca, utilizando a reversão dos propulsores, relativamente pequena, devido a segurança da nevegação. A prática nos nossos rios é para embarcações com L > 86 m , operando carregadas e em velocidade de máxima de parada de 3 vezes o seu comprimento;

III. a embarcação deve ter boa manobrabilidade. Com relação às velocidades de acionamento de lemes sugere o valor de 4 graus/s.

O cálculo da resistência de automotores poderá ser realizado como se navegassem em águas profundas através de séries sistemáticas, hoje, em sua grande maioria, já automatizadas, que mais se aproximem das linhas dos cascos. Posteriormente, devem ser efetuadas as correções devido ao efeito de águas rasas, tais como o apresentado em PNA[09], através de curvas de Schilichling que fornece a correção na velocidade em função do $(\sqrt{A_X / h})$ versus $V^2/g\ h$, onde A_X = área da seção mestra; h = profundidade local ; V = velocidade do automotor ; g = aceleração da gravidade (figura 12), que tem fornecido bons resultados.

Empurradores :

Os empurradores deverão estar na esteira da chata ou de seu comboio, assim a resistência deverá ser uma porcentagem a acrescentar sobre o das chatas. Assim, Bari apresenta, como sugestão para este acréscimo, a seguinte formulação :

Bari:

$$R = 0.07289 * e^{\left(\frac{1.45}{H-T}\right)} * V^{2.0} * * T^{\left(0.60+\frac{50}{W-B_F}\right)^{0.38}} * L_F^{0.38} * B_F^{1.19} \qquad (12)$$

onde $L_F = L * N.C$; $B_F = B * NR$ (13)

Chatas:

Na figura 13, observa-se as várias formas típicas de chatas que Roorda lista (1957)

Na maior parte dos casos, as chatas são utilizadas em conjunto, através de formação de um comboio composto por um empurrador e de uma determinada quantidade de chatas, compatível com as restrições geométricas da via e com a potência disponível do empurrador. Para a formação de um determinado comboio, são colocadas chatas lado a lado (em paralelo) ou em série (em linha), o que resulta em uma embarcação com características completamente diferentes daquela formada por uma chata isolada. Daí a importância de se prever formas que facilitem a integração entre chatas, levando em conta o número e a disposição de chatas ótimos para determinada via navegável. Se as chatas vão ser utilizadas em linha ou paralelo, é imprescindível que tenham formas que permitam unir-se entre si sem deixar grandes descontinuidades geométricas, as quais fatalmente levarão a acréscimos de resistência. Nota-se também que a formação em paralelo apresenta maiores resistências hidrodinâmicas que a formação em linha, assim como várias chatas em linha tendem a ter menor resistência que a multiplicação de seu número pela resistência de uma chata isolada.

Estudos experimentais de laboratório e dados de campo permitiram deduzir as seguintes considerações para a resistência hidrodinâmica das chatas isoladas, que são úteis no desenvolvimento das linhas:

a) A altura livre da superfície da água à chapa de encosto de vante deve ser tal que evite o empilhamento da água na velocidade de operação. Deve-se evitar também que a água embarque pela proa. Isto é tanto mais válido quanto maiores forem as velocidades.

b) O raio de concordância do fundo entre corpo de vante e paralelo médio tem a importância maior que o ângulo de inclinação do fundo do corpo de vante.

c) Raios crescentes no bojo tendem a diminuir a resistência à propulsão. Mas deve-se evitar raios maiores que o calado leve, pois assim minimiza-se o

escorregamento lateral, quando navegando nesta condição. Na maioria dos casos este limite está em torno de 30 cm.

d) Raios de curvatura na bojo do corpo de vante tendem a melhorar a escoamento diminuindo a resistência.

e) A inclinação do corpo de saída deve ser mais suave que o corpo de vante, aumentando-se os raios de concordância a fim de minimizar os efeitos de separação. A inclinação máxima permissível estaria entre 22 e 23 graus.

f) Introduzindo-se uma altura de fundo no corpo de vante produz uma redução na resistência.

g) Um estreitamento lateral do corpo de vante produz uma redução na resistência. Mas, para utilização em comboios este afilamento é desfavorável.

h) Para chatas de maior velocidade (8 a 12 nós) , introduzindo uma imersão da chapa de encosto de popa de cerca de 15 cm, tem-se uma redução na resistência ao avanço.

i) A variação de Cr (coeficiente residual) em função de L/B (comprimento x boca) , observa-se a tendência de diminuição de Cr com o aumento de L/B, como nas demais embarcações.

j) A relação Boca-Calado (B/H), que nos indica a forma da seção mestra, é muito difícil se prever o que acontecerá com o coeficiente de resistência residual, ao se aumentar B/H, pois seu aumento levará a superfícies molhadas maiores, o que poderá ou não compensar aumento de resistência residual.

k) Em se tratando de chatas isoladas em condição leve, percebe-se tendência de diminuição de Cr com aumento de B/H, porém quando se analisa somente embarcações na condição carregada, observa-se uma grande dispersão.

l) Em todas as relações analisadas, houveram grandes variações de Cr para um valor de um determinado adimensional (ou Cv., ou L/B, ou B/H), o que nos indica que além destes, outros fatores estão influenciando na determinação do coeficiente de resistência residual Cr. Entre outros fatores, as formas do corpo de entrada e de saída, bem como o tipo de proa e o raio de concordância entre o corpo de vante e o fundo da chata.

4.2- Resistência

A partir das considerações acima, são sugeridas três equações para calcular a resistência :

por **HOWE**:

$$R = e^{\left(\frac{1.46}{H-T}\right)} * V^2 * T^{\left(\frac{0.6+50}{W-B}\right)} * L^{0.38} * B^{1.19} \qquad (14)$$

por **Bronzini**:

$$R = r*V^2 \qquad (15)$$

onde :

$$r = 0.0118 B_C H^{\frac{2}{5}} \left[L_C + 70.5 + \left(1 - \frac{L_C}{328}\right) * \sqrt{\frac{C_B}{(1-C_B)}} \right] * K_C * n * K_F \qquad (16)$$

onde :

$$K_C = 2.42 C_B^2 - 3.43 C_B + 1.34 \qquad (17)$$

$$K_F = 1.0 \text{ (chatas isoladas)} \qquad (18)$$

por **Schale**:

$$EHP = 5.113 * 10^{-5} * D * \left(\frac{L}{B}\right)^{-0.473} * V^{3.46} \qquad (19)$$

Restrições para aplicação da fórmula de Schale:

- Le : em torno de 20% de L;
- Ls : em torno de 10% de L;
- calado da ordem de 3m;
- profundidade igual ou superior a 5 vezes o calado;
- coeficiente de bloco em torno de 0.9.

Foi feita uma comparação entre os dados de ensaios de resistência ao avanço da chata do Comboio do Rio Araguaia e estas formulações, chegando-se para faixas usuais de velocidade de operação, a resultados com as três formulações foram bastantes satisfatórios, o que leva a crer que

se possa utilizar para estimativas preliminares de resistência.

5- Propulsão :

A principal característica dos propulsores de embarcações fluviais é a necessidade de adaptação à operação em profundidades pequenas, com deslocamentos relativamente grandes, ou seja, os propulsores tem que operar com altos carregamentos, que resultam da combinação de pequenos diâmetros com altos empuxos. De modo semelhante, há uma influência do "fator fluvial" (águas rasas, formas cheias, grandes bocas, etc...)sobre as distribuições de velocidades e pressões ao longo dos cascos e, principalmente nas regiões dos propulsores, alterando de maneira significativa as forças de resistência ao avanço e os coeficientes propulsivos das embarcações.

Altos carregamentos significam baixas eficiências dos propulsores, em uma faixa situada entre 25% e45%. Assim, por ser um *aspecto crítico*, a eficiência do propulsor adquire uma importância vital para o desempenho de uma embarcação fluvial, apesar de tal fato não despertar a devida atenção da maioria dos armadores fluviais brasileiros, tendo assim um sistema de transporte inadequado o que muitas vezes levam a condenar até o sistema em detrimento aos outros sistemas de transporte. Apresenta-se a seguir a relação dos propulsores indicados para automotores e empurradores, visto que as chatas não apresentam propulsão própria.

As opções dos tipos de propulsores para automotores e empurradores não divergem das opções para embarcações marítimas de pequeno e médio portes: hélices convencionais de passos fixos (Série B-Troost), hélices em dutos (Série Kaplan), hélices de passo controlável, hélices de eixo vertical, etc. Contudo, dadas as características da nossa navegação fluvial, que exige baixo custo de investimento, facilidade de manutenção e a maior eficiência hidrodinâmica possível, apenas dois tipos de propulsores tem sido mais utilizados: os hélices convencionais e os hélices em dutos, sendo este último utilizados também como protetor de hélice necessários devido as condições de contorno críticas que a navegação fluvial impõe.

Os hélices convencionais são os mais conhecidos e utilizados, apresentam como maiores vantagens o baixo custo de fabricação e a quantidade de informações acumuladas e disponíveis para o seu projeto adequado. Os hélices em dutos, cujos projetos também derivam dos estudos do NSMB em Wageningen, apresentam custos um pouco maiores que os hélices convencionais na maior parte da faixa de operação das embarcações fluviais.

Do ponto de vista estritamente hidrodinâmico, seria recomendável que fossem utilizados, na maior parte dessas embarcações, os hélices em dutos, já que a presença do duto representa um ganho de eficiência em baixas velocidades e uma melhor uniformização do campo de velocidades do hélice, desde que seja elaborado adequadamente, caso contrário poderá ocorrer exatamente o contrário, maior resistência e eficiência pior do conjunto propulsor (hélice+duto+casco).

Os cálculos deverão seguir os procedimentos normais de projeto, considerando-se a potência efetiva em águas rasa, bem como as eficiências propulsivas nestas condições de escoamento restritivas.

6- Estabilidade:

De forma geral, devido às suas formas relativamente cheias, com altos coeficientes de bloco, fundos chatos e grandes bocas, tanto as chatas como os automotores tendem a não apresentar problemas de estabilidade quando consideramos as cargas gerais.

Assim as aplicações dos critérios de estabilidade consagradas para embarcações marítimas poderão ser suficientes. Praticamente, pode-se afirmar que a estabilidade destas embarcações poderá constituir-se em problema apenas na hipótese de haver um carregamento com distribuição completamente inadequada de suas cargas ,ou de seus passageiros, pertences e acessórios - tal fato é facilmente evitável através da elaboração de recomendações de procedimentos de carga e descarga, o que, aliás, é necessário para todos os tipos de embarcações, fluviais ou marítimas.

Por outro lado, a estabilidade dos empurradores, principalmente navegando escoteiro (fora do comboio), merece atenção especial, devido, principalmente, às suas características de pequeno comprimento, baixos calados e altas potências instaladas. É importante notar que os empurradores possuem áreas vélicas relativamente grandes assim como são levados a realizar manobras bruscas com curvas de pequeno raio. Estes dois fatores dinâmicos (força lateral de vento e curvas "fechadas") podem, em condições operacionais desfavoráveis, aumentar o risco à integridade de uma embarcação que não tenha uma margem satisfatória de estabilidade estática.

Assim é apresentada a análise somente para empurrador .

Bari analisou que há várias formulações para garantia da estabilidade de empurradores em diferentes países. Entretanto, considera a fórmula de Simpson satisfatória. Tal fórmula calcula um valor de boca B para garantir-se um valor de altura metacêntrica GM que satisfaça aos critérios de estabilidade:

$$B = \left[KM - \left[T\left(\frac{\left(5C_{WP} - 2C_B\right)}{6C_{WP}} \right) \right] \frac{T}{mx} \right]^{\frac{1}{2}} \qquad (20)$$

$$GM = KB + BM - KG \qquad (21)$$

A faixa de estabilidade de um empurrador é muito importante. Para o empurrador, a faixa de estabilidade positiva pode ser de até 70 graus.

No projeto final, ela é adotada para garantir uma adequada borda-livre. Pelo critério de Simpsom deve-se ter uma borda livre mínima igual a 10% da boca. Uma limitação é incorporada como segue abaixo:

$$f \geq 0.10*B \qquad (22)$$

7- SIMBOLOGIA

A_X - área da secção mestra;
V - velocidade do automotor ;
α - ângulo de mudança de rumo em graus.
B - boca moldada.
C_b - coeficiente de bloco .
C_f - coeficiente de resistência ao atrito

$$C_f = \frac{R_f}{\left(0.5 * r * S_m * V^2\right)}$$

C_r - coeficiente de resistência residual

$$C_r = \frac{R_r}{\left(0.5 * r * S_m * V^2\right)}$$

C_t - coeficiente de resistencia total
($C_t = C_r + C_f$)
C_v - coeficiente volumétrico ($C_v = \nabla / L^3$)
C_{WS} - coeficiente de superfície molhada
($C_{WS} = S_m / L^3$)
f - mínima borda-livre.
g - aceleração da gravidade
L - comprimento na linha d'água .
L_{pp} - comprimento entre perpendiculares.
P - profundidade.
R - resistência total .
R_f - resistência de atrito.
S_m - superfície molhada.
D - deslocamento.
χ - fator de potência
GM - altura metacêntrica.
BM - raio metacêntrico
KB - posição vertical do centro de carena.
KG - posição vertical do centro de gravidade.
C_t - coeficiente de carregamento do hélice

D - diâmetro do propulsor
L - comprimento total
NZ - número de eixos
P - passo do propulsor
H – calado
x - BHP/(100 NZ)
w - coeficiente de esteira efetiva
∇ - volume de deslocamento
ρ - densidade d'água
η_D - eficiência propulsiva
DWT = dead weight
IPT = Instituto de Pesquisas Tecnológicas.

8- AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a todos do IPT e EPUSP que direta ou indiretamente auxiliaram na presente pesquisa e na ordenação de informações, ainda pelo incentivo fornecido para a efetivação até o momento.
Ainda os reconhecimentos de gratidão pelo apoio à pesquisa fornecidos pela FAPESP-Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo e a CAPES-Coordenadoria de Pós Graduação do Ministério da Educação e Cultura.

9- BIBLIOGRAFIA

[1] BARI, A. ,CHOWDHURY, K. H. - "Design Of Small Inland Commercial Vessels". International Shipbuilding Progress, 36, n° 405 - 1989.
[2] CHRISTOPPOULOS, B. , LATORRE , R. - "River Towboat Hull and Propulsion". Marine Tecnology, Vol. 20, n° 3, July ,1983.
[3] MARCHAL, J. L. J. - "Avant-Projet de Navire"- Universite the Liége - Faculté des Scienes Appliquées - L. H. C. N. 1988.
[4] HIRATA, K. ; PADOVEZI, C. D. ; Gonçalves, A. L. "Projeto Hidrodinâmico de Chatas In. : CONGRESSO NACIONAL DE TRANSPORTES MARÍTIMOS E CONSTRUÇÃO NAVAL, 14, 1992, Rio Janeiro. Anais. Rio de Janeiro : Sobena, 1992, V.2.
[5] HIRATA, K. ; PADOVEZI, C. D. ; Gonçalves, A. L. "Projeto Hidrodinâmico de Automotores" In. : CONGRESSO NACIONAL DE TRANSPORTES MARÍTIMOS E CONSTRUÇÃO NAVAL, 14, 1994, Rio Janeiro. Anais. Rio de Janeiro : Sobena, 1994, V.2.
[6]IPT/SIDARPA/SINDARMA"Projeto de Embarcações para o Transporte Interior de Passageiros e cargas - Metodologia e Critérios - Manual do Usuário" - IPT. 1989 .
[7] RIVA , J. C. T. - "Sobrelargura de Canais". Tese de doutorado. 1982.
[8] ROORDA, E. M. N. - "Small Seagoing Craft and Vessels for Inland Navigation"- Tech. Publ. Company - Holanda - 1957.
[9] PNA - Principles of Naval Architecture, Volume I, II, III 1988.
[10] LATORRE, R,. DUNOW, H.H. "Improvement of River Towboat Propulsion: Translactions os selected German and Russian Technical Articles". University of Michigan. DNAME. Report n. 243. Nov/81.
[11] LATORRE, R. ,"Shallow River Pushboat Preliminary Design". Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, ASCE, Vol.111, July/85. pages 678-692.
[12] LATORRE, R. LUTHRA, G. TANG, K. ,"Improvement of Inland Waterway Vessel and Barge Tow Performance: Translactions of Selected Chinese, German and Russian Technical Articles". University of Michigan. DNAME. Report n.249. Sept/82.
[13] BABADOPULOS, J. L. & REIS, M.A.S . "Critérios, normas e recomendações de projeto, construção e operação de embarcações fluviais" 13º Congresso Nacional de Transportes Marítimos e Construção Naval. Rio de Janeiro 1990 .
[14] BAIER, L.A. "American River Towboats". International Shipbuilding Progress, , v.6, no. 63, Novembro 1959.
[15] DANN, A.W.: "Modern Developments in Towboats and Barges for Inland Waterways". Civil Engineering. 1940 .
[16] EDWARDS, V.B., Cole, F. C. :"Water Tansportation on the Inland Rivers". HISTORICAL TR 1983-1943 SNAME.
[17] HIRATA,K., LOPEZ, M. R. F., GONÇALVES, A. L., "Dados Preliminares para Projeto de Embarcações de Pequeno Porte "- IPEN 1991.
[18] PADOVEZI, C. D.: "Características de propulsão e de manobras de comboios fluviais para uma navegação segura". 16º CNTMCN SOBENA, Rio de Janeiro.1996.
[19] TACHIBANA,T. ; CALTABELOTI, O ; GARCIA, F. C. V. "Integrated System for Inland Transportation in Tietê-Paraná Waterway". The Sixth Inetrnational Symposium on Pratical oh Ships and Mobile Units , PRADS, September, 1995, Seul , Korea, pages 21501-21513.
[20] HIRATA, K.; PADOVEZI, C. D. ; DARIO, G.B. "Projeto Hidrodinâmico de Empurradores Fluviais" .Sobena , Rio de Janeiro, 1996, páginas 107-117.

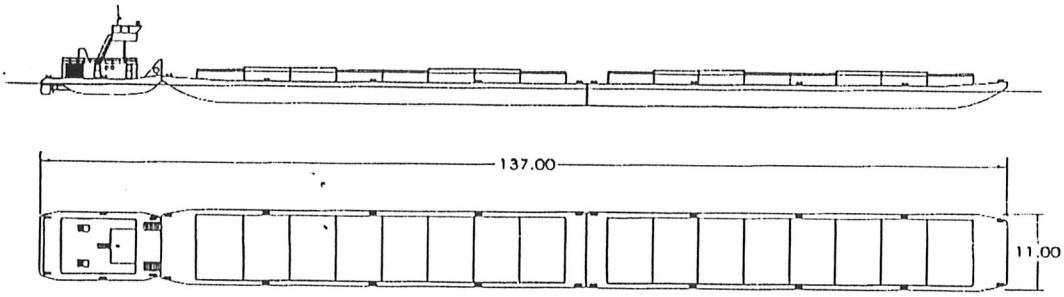

Figura 1 - Comboio Tipo-Tietê [6]

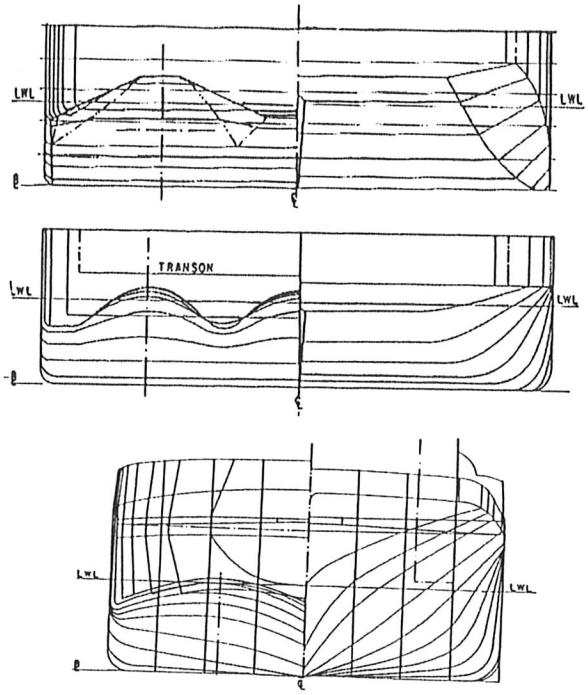

Figura 2 - Empurrador quinado, de formas curvas bi e tri-hélice e com semi-túnel.[11,10]

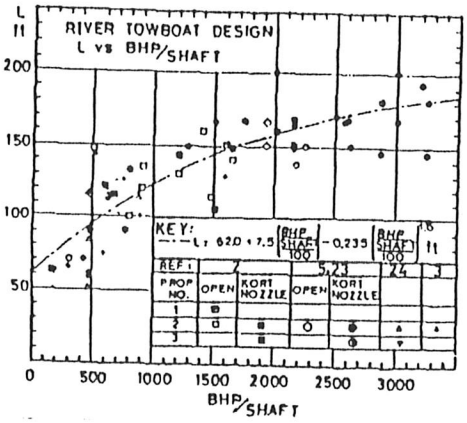

Figura 3 - L x BHP/SHAFT [2]

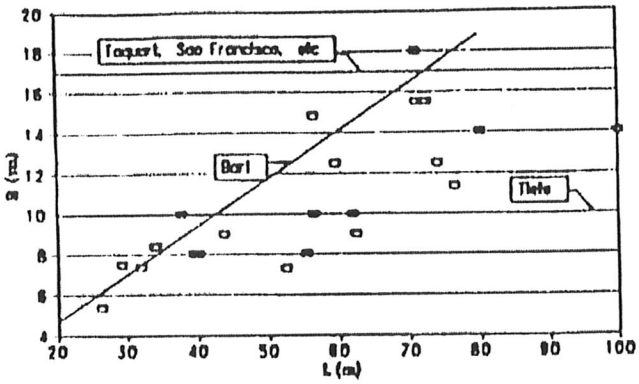

Figura 7 - Boca x Comprimento [4]

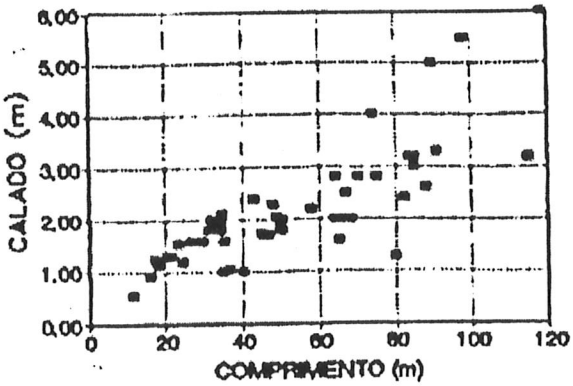

Figura 8 - Calado x Comprimento [5]

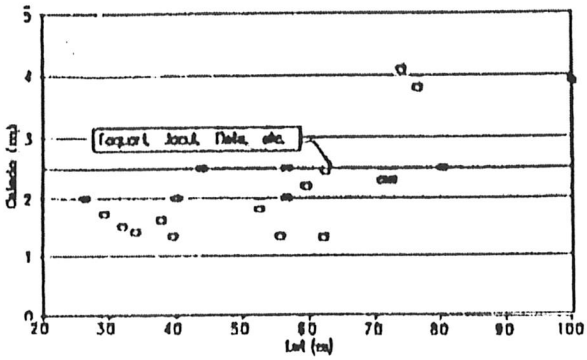

Figura 9 - Calado x Comprimento [4]

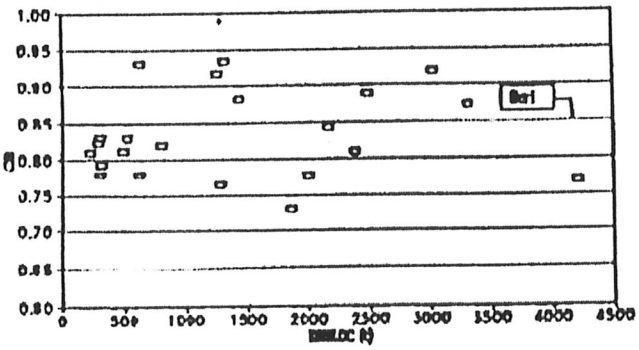

Figura 10 - C_b x Deslocamento [4]

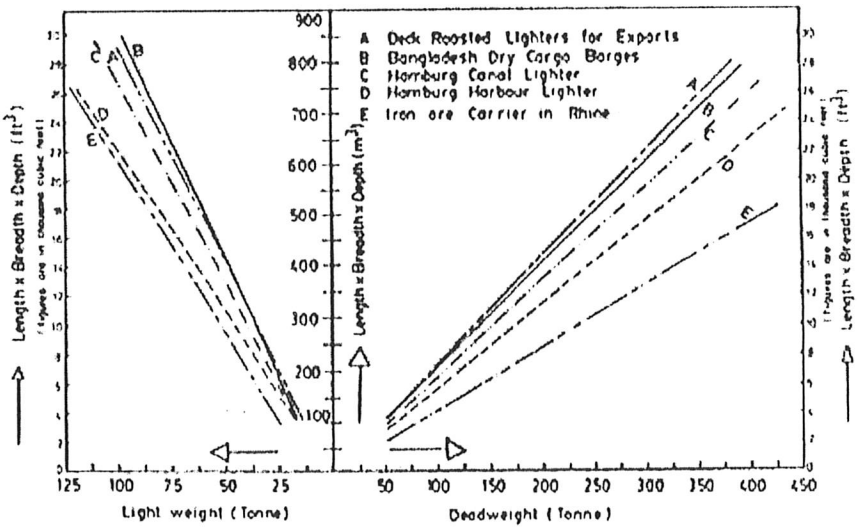

Figura 11 - Dimensões dos Diferentes Tipos de Chatas [1]

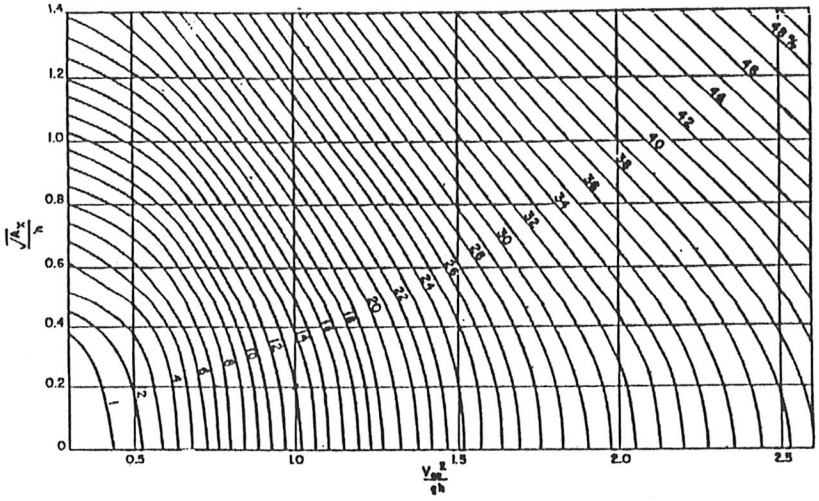

Figura 12 - $\frac{\sqrt{A_x} * V^2}{gh}$ [1]