



Plano Diretor da Hidrovia Tietê-Paraná

Volume I

**Anexo: Considerações sobre a utilização de
comboios de 9.000 toneladas úteis**

(Junho/2021)



Governo do Estado de São Paulo

João Doria

Governador do Estado de São Paulo

Rodrigo Garcia

Vice-Governador do Estado de São Paulo

Secretaria Estadual de Logística e Transportes

João Octaviano Machado Neto

Secretário Estadual

Priscila Ungaretti de Godoy Walder

Chefe de Gabinete

Luiz Alberto Fioravante

Assessor Técnico

Departamento Hidroviário

Eng. Jose Manoel de Oliveira Reis

Diretor

Expediente:

Eng. Jean Douglas Cordeiro

Eng. Joaquim Carlos Teixeira Riva



Plano Diretor da Hidrovia Tietê-Paraná

Considerações sobre a utilização de comboios de 9.000 toneladas úteis

Prólogo - Sumário do Trabalho

Esse trabalho técnico tem por objeto a análise da navegação de comboios formados por seis chatas ao longo da Hidrovia Paraná e Tietê.

As onze eclusas construídas no Rio Tietê possuem câmaras que possibilitam a ultrapassagem de apenas duas chatas.

Entretanto, desde o início (1992) e por razões econômicas, a hidrovia é navegada por comboios de quatro chatas e empurrador. Os tempos de eclusagem mostram-se elevados. Porém, mediante a realização de algumas obras e emprego de equipamentos de manobra, esses tempos poderão ser significativamente rebaixados.

Em outras palavras: a substituição da configuração quatro para seis chatas, aliada a alguns avanços nas condições de manobra do comboio e melhor conceituação para as obras complementares, por certo, trará condições mais eficientes em termos de segurança e menores tempos para a operação dos comboios de maior capacidade de carga útil.

Um dos problemas da navegação no Velho Anhembi consiste na insegurança de manobra dos comboios nas ultrapassagens dos vãos das pontes. A situação melhorou bastante após a realização de obras envolvendo o alargamento dos vãos úteis da maioria das pontes. Essas obras iniciaram com a Companhia Energética de São Paulo e tiveram seguimento pelo Departamento Hidroviário do Estado de São Paulo que resultaram no.

Contudo, em algumas delas ainda se faz necessário o desmembramento dos comboios, tarefa demorada e fatigante para a tripulação.

Todas as eclusas da hidrovia do Tietê e do Paraná estão em plena operação e com índice de disponibilidade anual que supera os 95%. Quase todas são dotadas de muros guia tanto por jusante quanto montante. São e estão francamente operacionais.

Contudo as garagens de barcos não foram adequadamente. Foram implantados pontos de espera, a maioria muito afastada das eclusas que comprometem os tempos de transposição.



Não anexado ao escopo desse trabalho, mas necessários à operação hidroviária, há a necessidade imediata de concluir o derrocamento de um canal, imediatamente à jusante de Nova Avanhandava, interno ao reservatório de Três Irmãos. Seu custo está avaliado em R\$ 300 milhões. Para que a navegação seja conservada é necessário que o nível mínimo do Reservatório de Ilha Solteira e de Três Irmãos seja mantido 2,50 m acima da cota mínima de geração. O interessante dessa história é que, quase todos os anos, o Operador Nacional do Sistema seja obrigado a remanejar águas dos demais reservatórios de montante para garantir as normas estabelecidas para a geração concessionada.

Não entendemos os motivos, mas a área governamental responsável pela navegação não disponibiliza a verba necessária para a obra. Enquanto isso, o setor de energia prefere manter a ginástica hidráulica anual. O que tem de interessante na história são dois fatos: (1) o volume de água entre as cotas mínimas geração e navegação poderiam render, a cada ano, mais que o valor da obra do canal; (2) a hidrovía foi planejada segundo os conceitos dos usos múltiplos das águas e não exclusividade da geração.

Novamente, esse ano, ressurgira com mais ênfase e novamente as discussões se prolongarão sem encarar o problema de frente e objetivamente.

Sem o referido canal não existirá navegação.

Mas qual a importância da hidrovía? Os ferroviários minimizam a sua importância desde a época da extinta FEPASA. Hoje, com a ferrovia RUMO em operação, segundo alguns a hidrovía perdeu espaço, pois Santos é alcançado com maior facilidade e preços menores aos do caminhão. A hipótese é verdadeira, porém perde para a realidade da vida vivida. O comparativo dos custos ferroviários é o caminhão e não a composição de seus próprios custos e deveres fiscais. A realidade observada é o frete ferroviário começar na realidade e progressivamente ir aumentando até alcançar 85% do preço rodoviário.

Nesse ponto a hidrovía torna-se ainda mais importante. Transportará a sua carga tida como cativa e balizará, mediante concorrência, os custos ferroviários.

Voltemos ao tema do trabalho, cujo fundamento é elevar a capacidade competitiva da hidrovía.

Analisamos nesse trabalho a adoção de comboios maiores, 9.000 toneladas de carga útil para a Hidrovía Tietê.

Nada do que já é normalizado. No segmento à jusante de Nova Avanhandava e até São Simão está franqueado, pela Marinha do Brasil, o tráfego de comboios de 9.000 toneladas utilizando o mesmo empurrador que trafega com o trem formado por quatro chatas.

O comboio de 9.000 toneladas não percorre o trecho de montante até Pederneiras pelas deficiências em manobra e governo. Realmente a carência de obras



complementares nas eclusas e as pontes impedem ganhar mais esse estirão de navegação.

Pois bem, vimos propor alternativas que possam viabilizar esse intento.

A primeira alternativa será melhorar a capacidade de manobra e governo dos comboios de 9.000 toneladas os permitindo alcançarem, pelo menos, os terminais de Pederneiras.

Sugere-se assim a utilização de uma Embarcação de Manobra de Proa. Essa embarcação, utilizando um propulsor azimutal, operaria a propulsão e manobra do comboio de seis chatas. É amplamente conhecido o desempenho desse tipo de embarcação, como mencionado em detalhes nesse trabalho. Amplia de forma acentuada a capacidade manobreira do comboio e auxilia na eclusagem.

Na condição comboio carregado o azimutal auxiliará na manutenção da velocidade de singradura, 10 km/h. Na condição comboio vazio será basculhada para a posição emersa.

A embarcação de Manobra de Proa garantirá segurança nas ultrapassagens das pontes, mesmo com seis barças.

A utilização de comboios maiores obrigará a construção das obras complementares nas eclusas. Garantimos que, tais obras poderão ser construídas de forma eficaz e com menores preços que os previstos.

Por jusante das eclusas planejamos derrocamentos a seco para construção das garagens de barcos. Por montante abandonamos a possibilidade de obras fixas. Contemplamos assim que as áreas de garagens de barcos sejam delimitadas por boias de amarração.

A sugestão de embarcações de manobra, construídas pelos armadores, como observada em outros países, trará vantagens imediatas em tempos de percurso e maior capacidade de carga (6.000 t para 9.000 t). Poderá os comboios ser propulsados pelos atuais empurradores de 800HP com a complementação de potência e manobra conferida pela embarcação de manobra.

Óbvio que essas vantagens terão que ser comprovadas em condições reais

Sugere-se que o Departamento Hidroviário de São Paulo coordene uma série de testes em escala real utilizando os comboios atuais da hidrovia.

Para a simulação da embarcação de manobra de proa ocorrem duas hipóteses, lançando-se mão do que já existe na hidrovia: (i) – empurrador atual com proa amarrada no proa do trem de chatas; (ii) – utilizar um dos empurradores construídos pela Companhia Transpetro, pois utilizam propulsão azimutal. Esses empurradores estão em Araçatuba.



Sugere-se também que o Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo seja responsável pelo encaminhamento, realização e análise dos testes.

Observou-se durante o estudo que possíveis testes realizados em Tanque de Provas virtual não trarão a segurança necessária nos resultados. As simulações empregando-se algoritmos oferecem resultados mais generalizados do comportamento do comboio, mas não os detalhes que serão observados nos testes em escala real.

Insistimos: Sem os avanços na navegação e sem as intervenções indicadas não há condições de haver hidrovia.

Sumário Executivo

Considerações sobre a Atual Hidrovia

1. Na atualidade, maio de 2021, a Hidrovia Tietê encontra-se subaproveitada. Transporta algo como 30% da capacidade nominal de cargas a longas distâncias destinadas à exportação. Como carga de baixa distância movimente cana-de-açúcar e material de construção esse último no entorno de cinco milhões de toneladas.
2. O Brasil atual, dado sua vastidão territorial e elevada produção de grãos os maiores projetos de transportes encontram-se vinculados às cargas destinadas à exportação. Nesse contexto destacam-se as vias navegáveis formadas pelos rios Madeira e Tapajós.
3. A Hidrovia Paraná Tietê, desde sua entrada em operação em 1992, para longas distâncias, recebeu investimentos privados voltados à construção de terminais e embarcações. Os armadores trouxeram conceitos do Rio Mississippi e navegam com comboios formados por quatro chatas e empurrador de 800HP e 6.000 toneladas úteis.
4. Os principais terminais localizam-se em São Simão, Três Lagoas, Pederneiras, Anhembi e Santa Maria da Serra. No início dos anos 90 as Indústrias de Alimentos Caramuru construíram uma unidade de moagem em São Simão, Goiás, visando ser atendida pela hidrovia. Assim foi até o choque de rebaixamento dos níveis de Ilha Solteira ocorrido em 2014/15. Após essa data as demandas de grãos e farelos daquela empresa foram sendo compartilhadas com a rodovia e, hoje, operam coma ferrovia RUMO.



5. Há menos de uma década foram construídos comboios para a movimentação de etanol entre Mato Grosso do Sul e região de Araçatuba com destino à Paulínia. Foram construídos 16 chatas de 1.500 t cada e quatro empurradores de 1.200 HP utilizando propulsão azimutal. Essas embarcações encontram-se paralisadas em Araçatuba. Jamais foram utilizadas.
6. Como referido acima, em 2015 a Hidrovia permaneceu paralisada por 18 meses em virtude do rebaixamento anormal do Reservatório de Ilha Solteira. Estudei bastante o tema e estou convencido que tal procedimento foi indevido. Contudo, há certo tabu ou constrangimento à discussão do assunto.
7. Para correção definitiva do problema, assegurando-se a independência da navegação frente à geração, é necessário o derrocamento de um canal de 60 m de largura ao longo de 10 km à jusante das eclusas de Nova Avanhandava. O referido canal está orçado em R\$ 300 milhões. Mostra-se crônico o problema de obtenção de verbas para a realização desse canal. No meu entender há argumentos robustos para delegar essa construção ao setor energético. Não representará um custo, mas um investimento.
8. O evento do rebaixamento do reservatório de Ilha Solteira por 18 meses trouxe desânimo quanto à utilização da hidrovia. O fato é acentuado pela inexistência de um cronograma de obras para o canal mencionado, cujo início todos os anos é postergado.
9. Para a operação contínua e com segurança da hidrovia fazem-se importantes a conclusão de uma série de obras complementares. Uma expressiva parte encontra-se já em operação e refere-se às pontes. Contudo, cinco pontes exigem ainda o desmembramento dos comboios de quatro chatas. Também será necessária a construção de garagens de barcos tanto a jusante quanto a montante das eclusas. Já existem projetos para tanto. Entretanto julgo tais projetos exagerados em quantitativo de obras e custos. Esse trabalho inclui alternativas para a complementação definitiva da hidrovia.
10. Recentemente a Companhia RUMO venceu leilão do Governo Federal para a concessão, por 32 anos, de mil quilômetros da Ferrovia Norte Sul, entre Anápolis e o Estado de São Paulo. Em pouco mais de um ano a RUMO já opera o tramo ferroviário que tangencia os terminais hidroviários localizados em São Simão. Nesse local encontra-se em operação um terminal ferroviário.
11. Por outro lado, a Companhia MRS que atende ao Terminal Hidro ferroviário de Pederneiras constrói novo terminal visando transportar a celulose oriunda de Lençóis



Paulista, próximo a Pederneiras, e possivelmente celulose e grãos oriundos de Mato Grosso do Sul e Goiás.

12. Ou seja, não é muito difícil concluir que a hidrovia se encontra em um impasse. Ou recebe investimentos para concorrer com a ferrovia RUMO e trazer a carga até Pederneiras ou continua no atual processo de extinção por inanição.
13. Há um argumento muito forte para que a hidrovia ganhe músculos. Promover a concorrência natural e não predatória com a ferrovia RUMO. Sem concorrentes diretos, apenas o caminhão, ao longo do tempo os valores dos fretes irão paulatinamente aumentando até atingirem 85% aos praticados pelos caminhões. Também não haverá interesse da Companhia RUMO pelos menores exportadores os deixando ao sabor dos fretes rodoviários.
14. Ou seja, o único rumo da hidrovia é concorrer com a Companhia RUMO visando contemplar a política de estado voltada à minimização do custo Brasil.

A Embarcação de 9.000 toneladas

1. Desde 1992 a hidrovia opera, de forma precária, comboios com 6.000 toneladas formados por quatro chatas empurradas por empurradores cuja potência varia entre 800HP e 950HP.
2. Nesses quase 20 anos os modais concorrentes, ferrovia e rodovia, ganharam em competitividade pelo aumento da capacidade de carga e efetividade.
3. Salvo reformas em várias pontes a hidrovia permaneceu sem grandes alterações. Ocorreu um declínio paulatino de competitividade também em virtude da falta de harmonia entre energia e navegação o que sempre ocorreu, mas era relativizada pela Companhia Energética de São Paulo.
4. Esses fatos acentuam a necessidade da hidrovia ser repensada tanto nas suas obras complementares quanto nas dimensões das embarcações.
5. Para tanto surgiu a oportunidade de operar a hidrovia mediante utilização de comboios de maior capacidade de carga. No primeiro momento, a sugestão parece pouco atraente (ou inoportuna e inconcebível), pois – se a navegação já é complicada com comboios de 6.000 toneladas mais complicada será com os de 9.000 toneladas.
6. Pois bem, a conjugação dimensões versus exequibilidade de obras mais simples e baratas conduziu à solução do problema: a utilização de uma embarcação de

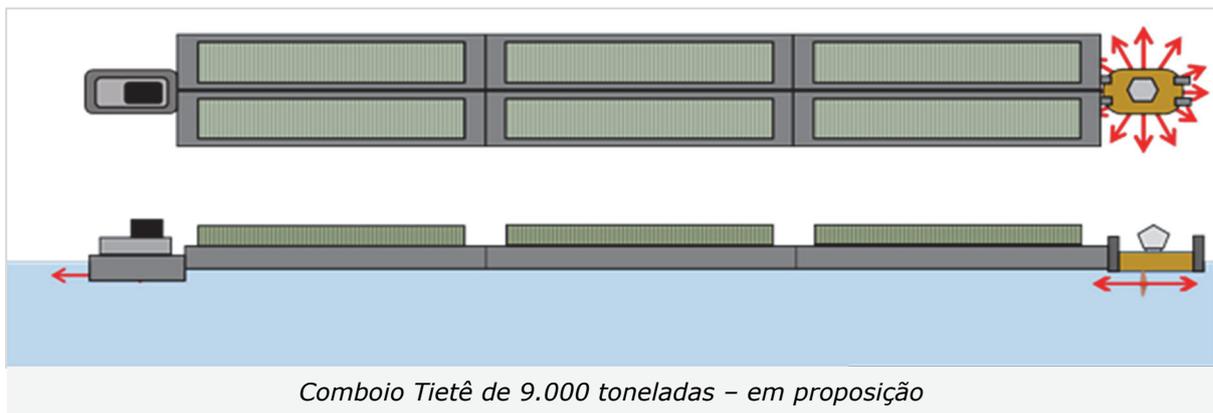
governo e manobra atrelada na proa do comboio. A potência e empuxo da embarcação de manobra deve ser tal com potência tal que, assegure as manobras necessárias nas pontes e incremente a efetividade de ultrapassagem das eclusas.

7. A hidrovia tem dois grandes problemas a serem equacionados: o espaçamento entre pilares das suas 15 pontes e baixa operacionalidade a ultrapassagem dos desníveis vencidos pelas eclusas capazes de transpor 3.000 toneladas por hora.
8. Na verdade, a ideia não traz nada de original. O processo é utilizado na região do Golfo de México para transporte de várias cargas, introduzindo-se na proa das barcaças uma embarcação com propulsor azimuthal. É também usado no Rio Mississippi como mostra a foto de capa desse trabalho. O propulsor de proa pode ser do tipo azimuthal (giro de 360 graus em relação ao plano horizontal) ou do tipo Voith que é um sistema de propulsão constituída por pás rotativas verticais.
9. As vantagens enumeradas pelos fabricantes e operadores merecem respeito e estão inseridas nesse trabalho.
10. As pesquisas indicam razoabilidade na aplicação do mesmo conceito nos comboios do Rio Tietê. Contudo em dimensões menores, uma vez que a navegação se processa em reservatórios com águas calmas na maioria do tempo.

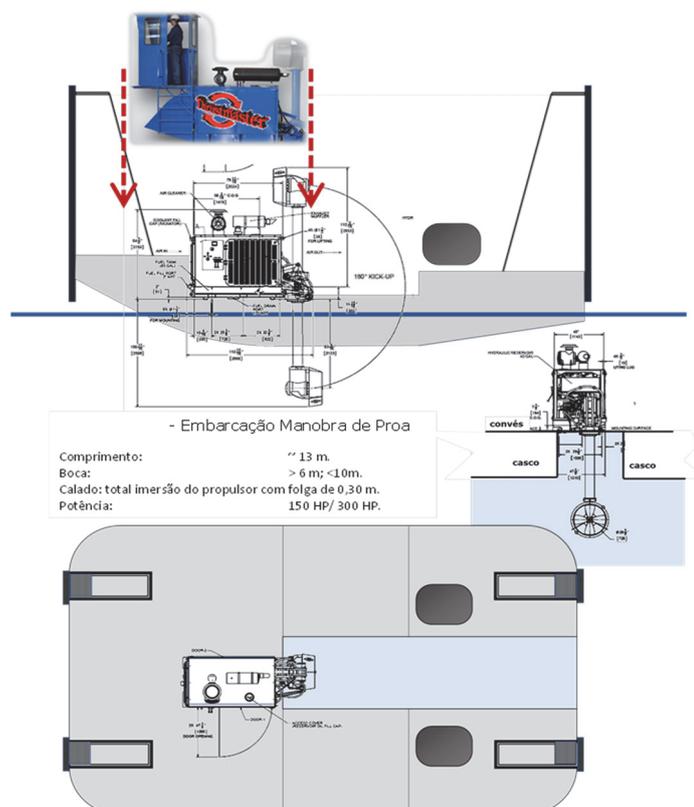


Comboio Americano de 9.000 toneladas de carga com embarcação de proa para manobra.

11. No caso Tietê a situação das manobras em pontes se agravam nas condições de comboio leve a em baixas velocidades. A área exposta ao vento atinge perto de 900 m² o que compromete a manobra do comboio apenas com os lemes de singradura (os instalados na popa do empurrador). Segue ilustração do comboio vazio, no calado de 0,45 metros.



12. Após análise do problema e suas condicionantes optou-se em utilizar as seis chatas empurradas por 800HP e uma embarcação de manobra de proa com empuxo de 1.500 kgf em 360 graus. As avaliações indicam que o comboio terá condições superiores de manobra nas ultrapassagens dos vãos de pontes atuais e levará entre 180 e 210 minutos para ultrapassagem das eclusas. Ilustração abaixo.





13. Com o monitoramento da navegação a capacidade da hidrovia será de 13 milhões de toneladas por sentido de navegação operando 330 dias anuais, 24 horas ao dia e avaliada com fator de congestionamento de 75%.
14. Avaliei que as obras complementares poderão ter custos significativamente menores aos previstos.
15. Esse relatório será ampliado pela denominada Parte 02 que fará a análise analítica do sistema proposto. Contudo, não ocorrerão surpresas nos resultados.
16. Para total confiabilidade recomendam-se testes em escala real utilizando os equipamentos disponíveis na hidrovia.

Conclusões

- I. Constata-se que a Hidrovia do Tietê se situa em uma posição desfavorável no tempo. Suas obras complementares foram sucessivamente postergadas o que colocou os armadores em posição desconfortável quanto à sua utilização. Em suma, se nada for feito, continuará o declínio da Hidrovia onde foram investidos alguns bilhões de reais.
- II. As obras complementares necessitam de novos projetos tal que possam receber comboios de 9.000 toneladas de carga para que o modal não perca sua inegável competitividade. Por paradoxal que possa parecer os custos das obras complementares poderão ser significativamente rebaixados.
- III. O canal à jusante de Nova Avanhandava deverá ter sua construção custeada pela energia. Os rios Tietê e Paraná foram planejados para a utilização múltipla de suas águas. O evento do rebaixamento de nível de Ilha Solteira, e sequenciamentos, indica que há nítido privilégio das águas para a geração de energia. Contudo esquece-se que se toda água for usada para manutenção financeira da energia, em pouco tempo não haverá água para os demais usos.
- IV. Em paralelo às obras deve ser estimulada a formação de comboios de 9.000 t de capacidade e dotados de embarcação de manobra de proa.
- V. No curto prazo sugere-se a realização de testes em escala real utilizando as embarcações hoje em operação na Hidrovia. Qualquer tipo de simulação em tanque virtual não trará os detalhes necessários e a confiança operacional que será completada pelos testes.



Plano Diretor da Hidrovia Tietê-Paraná

Considerações sobre a utilização de comboios de 9.000 toneladas úteis

Índice

1. Comboios que Atuam na Hidrovia	13
2. Comboios de 9.000 toneladas	15
3. Principais Dúvidas sobre o Comboio 9.000 toneladas	18
Atuais comboios de 6.000 toneladas.....	18
Pontes	20
4. Conceitos sobre Manobra e Governo de Comboios Fluviais.	23
5. Forças, Momentos e outras variáveis atuando sobre o Comboio.	26
6. Avaliação dos Quantitativos dos Parâmetros de Manobra para o Comboio de 9.000 toneladas.....	33
7. A Embarcação de Manobra de Proa.....	38
O que já existe operando	39
8. Dimensionamento Preliminar da Embarcação de Manobra de Proa.....	43
a. Resistência Hidrodinâmica dos Comboios.	44
b. Propulsão.....	45
9. Conceito das Obras Adaptadas ao Comboio de 9.000 toneladas.	47
10. Tempos de Transposição das Eclusas e Velocidades do Comboio.	53
11. Sugestão de Embarcação de Manobra de Proa	56



Plano Diretor da Hidrovia Tietê-Paraná

Considerações sobre a utilização de comboios de 9.000 toneladas úteis

1. Comboios que Atuam na Hidrovia

A Hidrovia Paraná Tietê veio a adquirir consistência em uma época muito posterior ao seu planejamento fato que não permitiu a navegação ser uma tradição, como ocorre na Europa.

Os rios Paraná e Tietê idealizados, na década de 50, aos usos múltiplos das águas no decorrer do tempo suas águas ganharam o perfil energético.

Na época do planejamento fluvial o interior do Brasil não apresentava evidências que poderia, 40 anos depois, converter-se em centro agrícola avançado e de grande importância econômica para o País. Trabalhei em 1968/71 na Cidade de Presidente Epitácio, nas margens do Rio Paraná.

Nessa época os cerrados de hoje não passavam de sertão remoto e inexplorado. Naquela época as perspectivas para uma hidrovia desprovida de origem de grandes volumes de cargas e que não desaguava em águas brasileiras do Oceano Atlântico mostravam-se restritas. Então, planejava-se um terminal em Laranjal Paulista e outro em Piracicaba.

Os Usos Múltiplos das Águas da Bacia do Paraná foram baseados nos projetos do Rio Tennessee, baseado em aproveitamento múltiplo e eclusas de grandes dimensões. Contudo, posteriormente, as eclusas foram concebidas sob a inspiração das hidrovias das terras baixas da Europa onde predominavam embarcações de propulsão própria e de dimensões menores.

As eclusas foram projetadas assim com câmaras de 145 m de comprimento por 12 metros de largura e calado máximo de 2,50 m (dimensões aproximadas). Os comboios poderiam transportar até 2.500 toneladas.

Anterior à interligação Paraná e Tietê havia uma navegação regional de calcário, etanol e cana-de-açúcar. A cana-de-açúcar comprovou o transporte a pequenas distâncias a ainda hoje é praticada pelas Indústrias COSAN. Fato interessante: entre 1983 e 1987 vieram visitantes da Índia e outros países para averiguarem o sucesso da realização.

Em julho de 1992 ocorreu a interligação do segmento hidroviário Tietê com o Tramo Norte do Rio Paraná. Os comboios assim puderam alcançar o Estado de Goiás, Município de São Simão, afastado 650 km de Pederneiras e 750 km de Anhembi. Em 1996 foi concluída a eclusa de Jupiá integrando o Tramo Sul do Rio Paraná (já navegável entre Guaira e Panorama) ao Rio Tietê.

Os empresários da hidrovía, visitando o Rio Mississipi, optaram por duplicar a capacidade do comboio até então proposto. De imediato surgiram comboios formados por quatro chatas e com calado de até 2,80 metros, 6.000 toneladas úteis aproximadamente.

O emprego de comboios ajudou a mostrar as deficiências de projeto da hidrovía. Mesmo tendo mais de 90% do percurso efetuado em águas irrestritas e sem correntes as eclusas não dispunham de garagens de barcos adequadas e as pontes apresentavam vão navegáveis com afastamento deficiente.

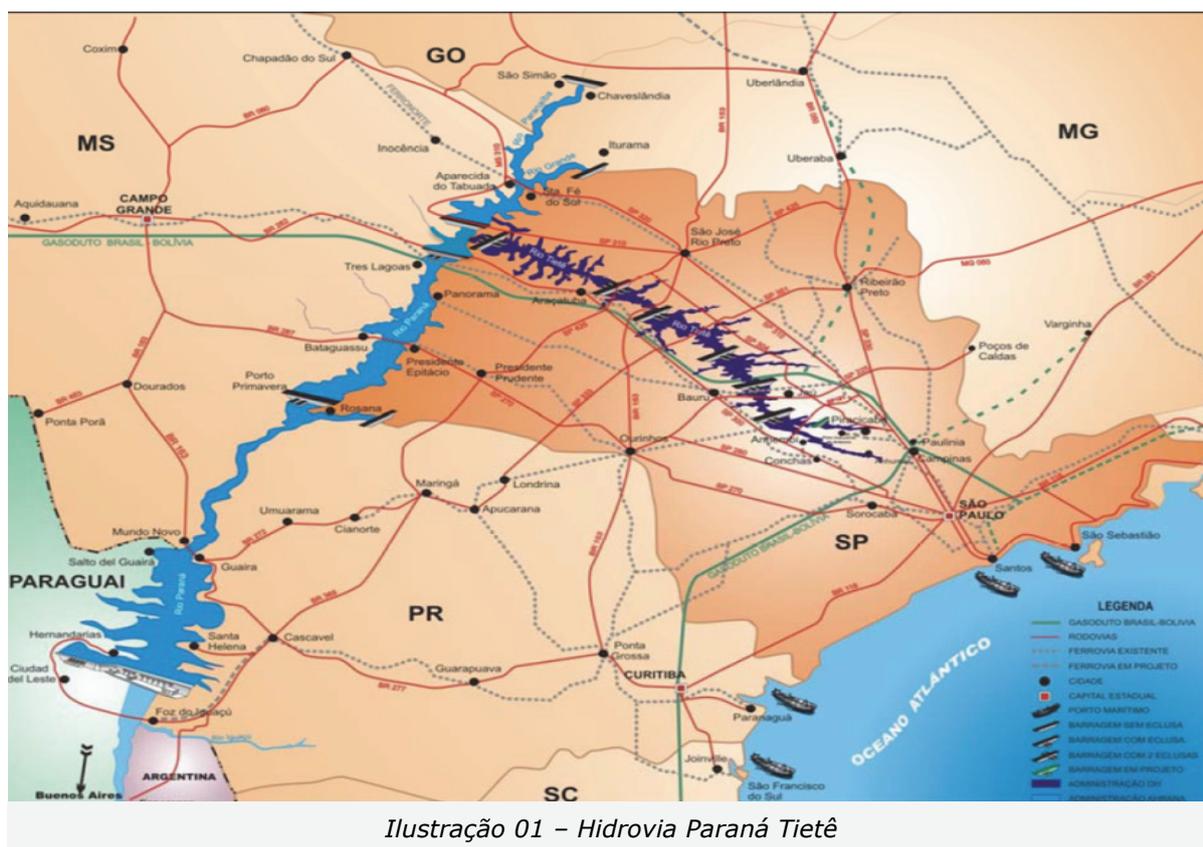


Ilustração 01 – Hidrovía Paraná Tietê

Aconteceu que, nos últimos 30 anos muitas adaptações foram executadas na hidrovía mesmo sem recursos garantidos no longo prazo.

A hidrovía abrigou e abriga particularidades que garantem futuro promissor: frota e terminais totalmente construídos pela iniciativa privada; mesmo com grandes problemas operacionais como desmembramentos do trem de chatas em eclusas e pontes, que



incrementam o tempo de percurso em 25%, aos custos da operação permanecem competitivos.

A Hidrovia Tietê possui o único terminal hidro ferroviário do Brasil, localizado em Pederneiras. Os terminais hidro ferroviários existentes, naquele local, encontra-se em expansão pela MRS Logística.

A introdução de comboios de 9.000 toneladas de carga possibilitará melhores condições nas ultrapassagens das eclusas e o rebaixamento dos preços exigidos para as obras complementares da Hidrovia.

Avalio em R\$ 350 milhões o preço de construção do Canal de Jusante de Nova Avanhandava e outros R\$ 150 milhões para as demais intervenções necessárias, em um período de três anos.

Tenho a vivência e conhecimento para afirmar que pelo menos a construção do canal à jusante de Nova Avanhandava deva ser construída com verba da hidroeletricidade. O projeto da Hidrovia foi baseado nos usos múltiplos das águas e tal conceito deve ser obedecido. Um ano de operação energética entre as cotas 325,40 e 323,00 msnm gera receita superior ao valor de construção do canal.

Por outro lado, os comboios de 9.000 toneladas interligados à ferrovia em Pederneiras poderão competir em igualdade de condições com o novo traçado da Empresa Rumo entre São Simão e Santos.

2. Comboios de 9.000 toneladas

A Ilustração 02 mostra o comboio mais utilizado na Hidrovia Tietê. Com 6.000 toneladas de capacidade navegam coma seguinte configuração:

- Quatro chatas de 59,44 m de comprimento, 10,67 m de boca (largura no convés) e pontal de 3,50 metros. O peso médio de cada chata é de 220 toneladas aproximadas (pode chegar a 250 t com tampas de aço) e calado máximo de 3,00 metros.
- O empurrador tem 18,50 metros de comprimento, 8,50 metros de boca e calado de 2,20 m. O empurrador é impulsionado por propulsores de 1,80 metros de diâmetro. Atualmente, em virtude de restrições no trecho à jusante de Nova Avanhandava, alguns receberam propulsores de 1,50 metros.
- Os lemes, um por propulsor, têm área aproximada de 2,50 metros quadrados. Por ante avante dos propulsores operam dois lemes de flanco, ou cerca de 2,50 m² por propulsor.

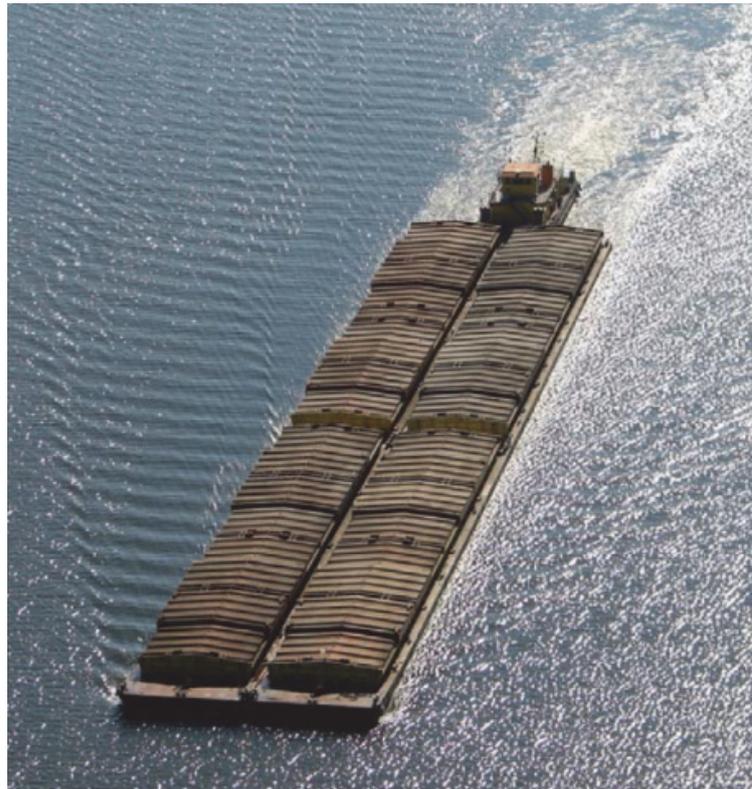


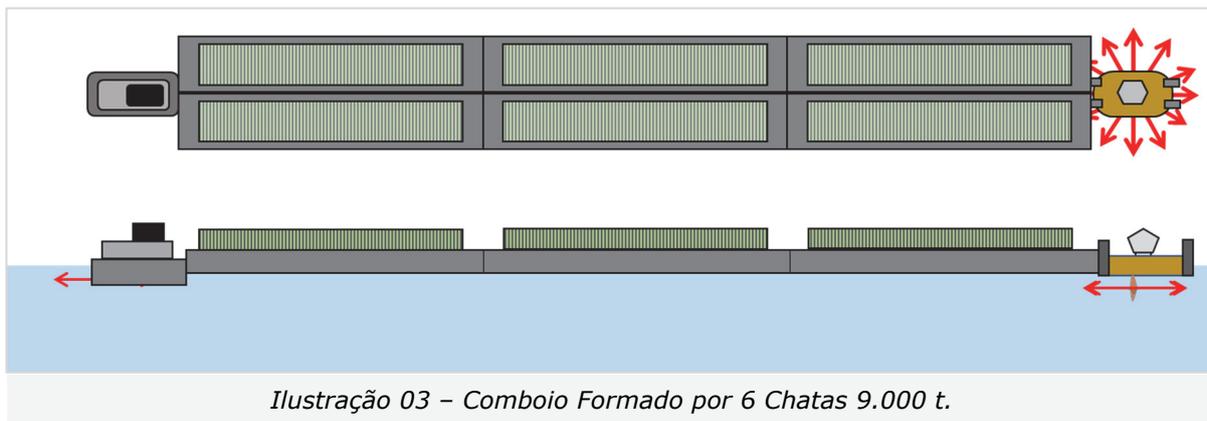
Ilustração 02 – Comboio 6.000 t.

O comboio proposto será formado por seis chatas, o mesmo empurrador e uma embarcação de manobra de proa. A composição terá comprimento aproximado de 210 metros, boca de 21,30 metros e calado máximo de 3,00 metros. Terá um deslocamento de aproximadamente 10.800 toneladas e velocidade compatível com o comboio atual, cerca de 10 km/h.

A embarcação de manobra deverá estar acoplada (amarrada) na proa do trem de chatas. Deverá dispor de propulsão azimutal ou Voith de tal forma que gere impulso transversal no giro de 360 graus. Essa embarcação deverá ser autônoma desde que terá função de rebocador auxiliar nas eclusas.

Na verdade, com a potência instalada de 800HP e navegando carregado com seis chatas o comboio não alcançará a velocidade de 10 km/h. Nessas condições propõe-se que na condição carregado seja utilizado para complemento da propulsão o empuxo gerado pelo propulsor da embarcação de manobra. O empuxo deverá também ser dimensionado para permitir a velocidade de pelo menos 10 km/h ou maiores nas condições de singradura. No retorno vazio o propulsor de avante poderá ser recolhido fazendo com que a velocidade de 10 km/h seja alcançada com os 800HP instalados no empurrador. Já nas eclusas, com velocidade entre cinco e seis km/h tanto o empurrador quanto a embarcação de manobra darão conta do recado.

A ilustração 03 traz o layout do comboio em proposta, condição vazio. A vantagem reside na propulsão disposta na proa que confere um contrabalanço entre forças e momentos agindo sobre a formação.



Como será observada, essa propulsão – governo auxiliar não traz nenhuma inovação sobre o estado da arte da navegação fluvial.

A ilustração 04 documenta um projeto Robert Allan. Trata-se de uma embarcação cuja missão é efetuar a docagem de submarinos. No caso em pauta não poderá haver a proteção do propulsor para permitir seu basculamento para a condição emersa e ainda deverá ter proa semelhante a popa.





3. Principais Dúvidas sobre o Comboio 9.000 toneladas

Ocorrem várias dificuldades na operação dos atuais comboios de 6.000 toneladas. À primeira vista é lógico pensar que essas dificuldades se agravarão com a admissão de comboios maiores.

Pois o objetivo desse item é generalizar essas dificuldades e impedâncias e tentar demonstrar que, pequenas alterações na logística do transporte e nas obras complementares farão os comboios de 9.000 toneladas serem totalmente viáveis e seguros.

Atuais comboios de 6.000 toneladas

A maioria das dúvidas comentadas nesse item refere-se àquelas emitidas em reuniões de grupos de trabalho que estudam e discutem o transporte hidroviário.

No Rio Tietê tornou padrão os vãos úteis situados entre 30 e 52,8 metros, como será mais bem analisado. Acontece que, logo em 1992, com a abertura do Tramo Norte à navegação, os armadores optaram por comboios de quatro chatas, comprimento de 138,0 metros e larguras (bocas) de 21,70 metros.

Dessa forma, tiveram início os vários abalroamentos de comboios em pilares de pontes. Foram assim projetadas testadas pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo proteções flutuantes para os pilares das pontes. Posteriormente algumas pontes tiveram duplicado o vão de navegação utilizando-se treliças metálicas.

Para evitar danos mais assíduos o Departamento Hidroviário resolveu limitar as dimensões dos comboios permitidos para a ultrapassagem das pontes. Ao mesmo tempo, procedeu-se ao alargamento de várias pontes. Restam apenas algumas intervenções a serem realizadas. Todas permitirão a operação de comboios formados por quatro barcaças ou 6.000 toneladas.

Várias teorias surgiram visando estabelecer definitivamente as razões dos abalroamentos uma vez que tais fatos não ocorriam com frequência em rios europeus e americanos. Óbvio que, mesmo no Rio Tietê, a maioria das ultrapassagens ocorriam normalmente. Notou-se, entretanto, que o comboio navegando na condição vazia apresentava níveis bem mais acentuados de ocorrências, em relação à condição carregada.



Ao lado desse argumento que chamaremos “condição vazio” foram sugeridas outras possíveis causas como: baixo nível de potência dos empurradores e problemas envolvendo governo do comboio.

De meu conhecimento, dois estudos foram realizados no sentido de entender o fenômeno:

- O primeiro correspondeu ao redimensionamento de potências tal que assegurasse a navegação segura dos comboios nas proximidades das pontes. A empresa contratada especificou uma potência mínima para o comboio de quatro chatas, entre 1.150HP e 1.250HP. Contudo, os comboios da Hidrovia desconsideraram a recomendação. Alguns anos depois, a Empresa Transpetro construiu quatro comboios completos para a movimentação de etanol. São embarcações modernas e empregam dois motores de 600HP, com azimutais. Infelizmente os comboios encontram-se paralisados em Araçatuba.
- O segundo estudo simulou a manobra dos comboios Tietê ao longo dos meandros do rio. Foram utilizadas as chamadas “derivadas hidrodinâmicas” que, apesar de muito úteis, só tem condições de serem aplicadas em situações bem definidas e com o máximo de cuidado. Os resultados da simulação indicaram deficiências de manobra dos comboios nas curvas o que não era observado na prática. Observou-se que ao modelo anexava-se uma falha capital: desconsiderava a possibilidade de rebaixamento da velocidade nos acessos aos meandros.

Concluo que, o baixo nível de potência dos empurradores dificilmente se sustenta como causa dos acidentes.

O argumento básico da utilização das baixas potências alicerça-se nos comboios do Reno cuja relação potência por tonelada de carga é bem mais elevada. Verdade. Contudo as embarcações europeias enfrentam correntezas naturais apreciáveis, como no caso brasileiro do Rio Madeira. Os comboios americanos empregam potências de 6.000HP para toneladas para empurrar 36.000 toneladas ou seis toneladas por HP. Os empurradores do Tietê empurram 7,5 toneladas por HP. Exemplo interessante são alguns comboios do Rio Tapajós: 24.000 toneladas e 1.200HP de potência ou 20 t/HP. A particularidade refere-se às condições operacionais. O comboio “desce” o rio na condição carregado e “sobe” o rio com 15% da tonelagem inicial.

Algumas explicações conceituais:

- I. Normalmente, níveis de potências instaladas estão relacionados às velocidades consideradas adequadas pelos armadores. Em reservatórios como os do Tietê, normalmente com condição irrestrita de navegação, os efeitos de ventos e de correntes não afetam muito os tempos de percurso das embarcações. No caso, as velocidades dos comboios atuais, nos reservatórios, atingem 10 km/h na potência de 800HP.



- II. Na ultrapassagem das pontes é obrigatória a redução da marcha para 5,0 ou 6,0 km/h. Visa reduzir a energia cinética do comboio que acessa à ponte, pois em caso de choque toda essa energia será transferida em deformações no casco e nos pilares.
- III. Essa redução de velocidade implica em grande redução de potência e torque transferido aos propulsores, uma vez que a potência é proporcional ao cubo da velocidade. No grosso modo, a redução da velocidade pela metade implica na utilização de 12,5% da potência e torque útil dos motores.
- IV. Comboios em velocidades reduzidas perdem eficiência de leme. Em operação normal de operação os propulsores do empurrador mostram-se altamente carregados o que eleva substancialmente as velocidades de fluxo que atingem os lemes. Nas baixas velocidades esse fenômeno é muito reduzido afetando diretamente as forças produzidas pelos lemes.

Mais recentemente foi ventilada a hipótese de adoção de lemes duplos por propulsor. Os lemes duplos, na velocidade de projeto da embarcação, praticamente dobram as forças geradas pelos lemes e facilitam significativamente a manobra em meandros dos rios e nas manobras consideradas padrão.

Veremos mais adiante desse trabalho que o emprego de lemes duplos nas condições de ultrapassagens das pontes não traz vantagens, se operados isoladamente.

Há uma série de manobras padrão que qualificam novas embarcações. São as manobras de giro, ziguezague e parada brusca. O Instituto de Pesquisas Tecnológicas realizou todos esses testes de campo e em escala real para comboios de quatro chatas e 800HP de potência. Foram considerados aptos a operarem na Hidrovia. Ao mesmo tempo a Marinha do Brasil deu alvará para a navegação de comboios formados por seis chatas entre Araçatuba e São Simão, ou seja, 9.000 t ou mais, dependendo do calado.

O processo de desmembramento dos comboios é totalmente inadequado e ineficaz. Por outro lado, ainda hoje, apresenta-se como o mais seguro quanto à integridade das pontes.

Pontes

O dimensionamento dos vãos das pontes dos rios Tietê e Paraná ocorreu por volta dos anos 60 fazendo-se uso de normas europeias. Suponho que naquela época não se dispunha de embarcações de grandes dimensões que navegassem nos canais artificiais da Europa.



Em assim sendo, as dimensões dos canais do Rio Tietê foram avaliadas por formulações propostas pelo Congresso Permanente de Navegação Interior (PIANC) sediado na Bélgica.

Operando embarcações de baixas tonelagens os canais construídos no Nordeste europeu – região das terras baixas –, as normas estabeleciam que a largura mínima dos canais medida na soleira, devesse corresponder a 2,5 vezes a boca da maior embarcação, se não permitido cruzamentos, e 4,4 vezes a boca se os cruzamentos fossem permitidos. Havia correções a serem observadas se houvessem correntes e outros efeitos externos. Entretanto, as pontes que cruzavam esses canais tinham pilares fixados nas bermas uma vez que tais canais eram relativamente estreitos.

Nos Estados Unidos, mesmo utilizando comboios substancialmente maiores, até 40.000 toneladas, as formulações eram semelhantes. Contudo, como os comprimentos dos comboios eram substancialmente maiores que as embarcações europeias o United States Army Corps of Engineers acrescentou nova parcela devida à deriva normal de comboios, avaliada em três graus. Por exemplo, para um comboio de 210 metros de comprimento o acréscimo atingia algo como 20 metros.

Atualmente, novos critérios foram propostos todos eles atrelados à probabilidade de abalroamentos e comprimento dos comboios. Em suma, um espaçamento entre pilares, com baixa probabilidade de abalroamento, seria de pelo menos 70% do comprimento do comboio. Nota-se que grande número de pontes recebeu adequações e muitas delas receberam proteções que operam como muros guia para as embarcações. Uma viagem pelo Google ao longo do Mississippi nota-se as modificações executadas.

Mas deve-se considerar também que as formas de propulsão de navios e comboios foram alteradas nos últimos 20 ou 30 anos – propulsões azimutais. Suponho que nos próximos dez anos os lemes estarão substituídos pela propulsão azimutal. O equipamento incorpora a função dos propulsores e lemes simultaneamente uma vez que o propulsor está apto a girar 360 graus em torno de um eixo vertical, o mesmo em que a madre do leme estaria inserida.

Voltemos às condições encontradas no Rio Tietê em que a maioria dos comboios adota a propulsão convencional.

A ilustração 05 é a foto de uma embarcação tradicional europeia navegando ao longo de um canal estreito e sob a ação de ventos laterais. A foto evidencia o ângulo de aproamento da embarcação em relação ao eixo canal. Tal condição na ultrapassagem de um vão de ponte é totalmente inadequada e insegura.

A melhor forma de corrigir os problemas seria a reforma de todas as pontes o que se faz inoportuno em virtude da inexistência de fundos para tanto.

Nesse trabalho venho propor um novo enfoque sobre o problema devidamente adaptada e adequada para comboios de 9.000 toneladas e utilizando o empurrador atual de 800HP.



Ilustração 05 – Embarcação descarregada sob a ação do vento

Até esse ponto do trabalho vejo como claro que a navegação ao longo dos vários reservatórios, com formação de quatro chatas e empurrador, transcorre normalmente e sem dificuldades. Os reservatórios podem ser assimilados a águas sem restrições aliados à amenidade do clima. Tanto que ignoro qualquer problema ocorrido com comboios nessas circunstâncias. Reforça o argumento da Marinha do Brasil haver liberado comboios de seis chatas para a navegação entre Araçatuba e São Simão, trecho sem eclusas e onde se insere o Canal de Pereira Barreto.

Assim conclui-se que os maiores problemas se encontram nas pontes e nos acessos às eclusas.

Observa-se que, nas pontes o risco de colisão é evidente. A percentagem dos eventos adversos é muito baixa, mas ao acontecer acarreta problemas e transtornos de grande monta. Somente a perspectiva da visão do piloto em relação à largura da ponte é desagradável.

Segundo pesquisas americanas 70% das colisões em pontes são devidas à falha humana e a efeitos externos incluindo lufadas de ventos ou correntes não alinhadas com a direção do movimento.

Está comprovado que a probabilidade de perda de governabilidade do comboio é devido ao carregamento, ou seja, ao calado. Embarcações carregadas têm menores áreas expostas aos ventos aliados aos maiores calados que ampliam as “respostas do casco” em relação à ação dos lemes. Ao contrário, comboios na condição leve não dispõem de calados que ofereçam melhores respostas do casco e têm o agravante de maiores áreas expostas ao vento. No caso de lufadas surge uma força excedente e não esperada que não permita a resposta eficiente tanto dos lemes quanto do casco.

Suponhamos um comboio aproximando-se da ponte à distância de uma a duas vezes seu comprimento. Com a redução de velocidade (1,40 m/s) um comprimento de comboio



(138,0 m) é percorrido em 98 segundos ou um minuto e meio. O piloto segue a sinalização existente e o correto é o comboio manter sua linha de centro alinhada com a sinalização fixada na ponte.

Ainda no plano das suposições ocorre uma lufada de vento, situação de alarme, que transmite uma força aplicada no centro de pressão da área emersa. Ou outra figura: surge um bote de pescador a $\frac{1}{4}$ de comprimento do vão da ponte e é notado em um ou dois comprimentos de comboio.

Na primeira figuração, simultaneamente à força do vento, aparece um momento que tende a fazer a embarcação girar em relação a um suposto eixo vertical cruzando o centro de gravidade horizontal.

O piloto age imediatamente e maneja os lemes de tal forma a fornecerem forças e momentos contrários aos do vento. Nesse caso o ponto de equilíbrio acontece como indicado na ilustração 05 com o comboio assimilando um deslocamento lateral e um ângulo em relação à rota original.

Na segunda figuração o piloto reage no sentido de afastar o casco do navio do bote do pescador. Para tanto aciona os lemes para que o comboio aprobe no sentido do maior vão livre da ponte. Há estudos de salvaguarda da vida humana no mar que apontam esses desvios em 15% ou 20% do comprimento da embarcação.

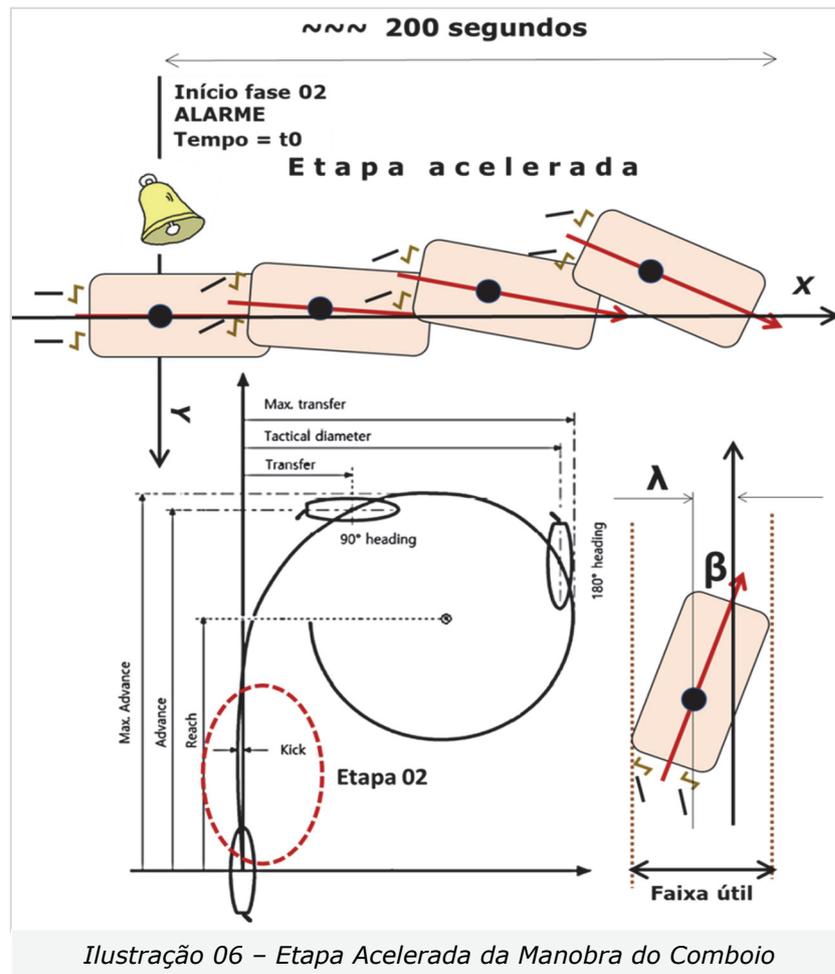
Se o comboio está vazio, situação a ser analisada em item posterior, a "resposta do casco" será reduzida fazendo o casco adquirir maiores ângulos de deriva.

Como o leme atua na velocidade de 2,50 graus por segundo, serão 15 segundos para atingir 35 graus de ângulo de leme. Terá percorrido 20 ou 25 metros.

O fato mais importante de todo esse arrazoado resume-se no baixo tempo transcorrido entre o alarme e a conclusão da manobra – faixa dos 150 segundos.

4. Conceitos sobre Manobra e Governo de Comboios Fluviais.

Creio que a melhor maneira de análise de qualquer sistema físico é analisa-lo em seus conceitos e testá-lo. Assim sendo, passemos a analisar o aspecto mais geral da manobra de uma embarcação na configuração de um comboio fluvial. Como estamos mais familiarizados com a manobra de giro comecemos por ela. Corresponde a parte inferior da ilustração 06.



Teoricamente essa manobra pode ser subdividida em quatro etapas de progresso distintas. A maioria dos textos a apresenta em três etapas sucessivas. Anexamos uma fase inicial na qual o comboio segue normalmente a rota. Refere-se à singradura normal do comboio seguindo uma rota planejada. Ou seja, velocidade constante e aceleração zero como comboio navegando em velocidade constante.

A segunda fase está relacionada ao rebaixamento da velocidade para ultrapassagem da ponte seguida da constatação de algum perigo que demande uma ação rápida. É o momento de alarme.

Para o piloto restam duas possibilidades de reação: a parada brusca com inversão dos propulsores ou rápida ação sobre os lemes. Na maioria dos casos essa etapa corresponde a poucos segundos e o comboio poderá encontrar-se muito próximo do empecilho que terá de ultrapassar.

O piloto aciona os lemes que geram forças e momentos crescentes até a deflexão total que corresponde normalmente entre 30 e 35 graus. A fase de deflexão dos lemes ocorre em torno de 15 segundos.



É a terceira fase do movimento que é caracterizada por um movimento acelerado imposto pela ação dos lemes e pelas respostas imediatas das partes imersas do comboio. É uma resposta ou reação do comboio traduzida em deslocamento lateral e alteração do ângulo de deriva. Quanto maior a força proporcionada pelos lemes maior será a velocidade de deslocamento lateral acarretando maiores ângulos de deriva.

A quarta fase relaciona-se ao restabelecimento do equilíbrio entre forças e momentos com as acelerações tendendo a valores baixos e mesmo zero. As etapas que interessam ao nosso estudo são a aproximação (etapa 01) o alarme seguido da ação sobre os lemes e a etapa plenamente acelerada (etapas 2 e 3). Ou seja, desejamos dimensionar o que acontece em um espaço pequeno de tempo onde está inserida a dinâmica do comboio em movimento. Julgamos interessante mencionar que as etapas mais importantes para a ultrapassagem de uma ponte inserem-se no trecho inicial da manobra de giro.

Analisando em detalhes: o vão útil da ponte está estabelecido visando uma ultrapassagem sem distúrbios externos. Esse vão útil contempla folgas que possam contemplar parte das acelerações provocadas pelos lemes.

A ilustração 06 mostra as etapas 02 e 03 da manobra necessária em caso de risco de colisão com a ponte. Interessante que a ponte não pode ser comparada a um obstáculo isolado à navegação. São dois obstáculos entre os quais o comboio deverá trafegar. Não é apenas o caso de desviar-se de um ponto crítico, pois o desvio desse ponto levará o comboio a chocar-se contra o outro pilar da ponte.

Detalhemos mais um pouco o que acontece durante as três etapas, com os lemes acionados:

- I. Desvio lateral do comboio em função da ação dos lemes. Aparece uma aceleração lateral que se consubstancia pelo aumento de velocidade e desvio do centro de gravidade da embarcação em relação ao curso original.
- II. As velocidades de singradura e laterais são ortogonais entre si e desencadeiam a formação de um ângulo denominado deriva.
- III. O momento derivado da ação dos lemes, aplicado ao centro de gravidade, provocam a rotação do comboio em relação a um eixo imaginário disposto ortogonalmente à seção horizontal do comboio e transpassando o centro de gravidade horizontal.

Com o governo do comboio encontra-se instalado na popa os dois desvios angulares têm o mesmo sentido.

Essas acelerações provocam um aumento da faixa útil de navegação para o comboio durante a ultrapassagem da ponte que, em alguns casos, pode superar o vão fisicamente disponível. Note-se que a faixa útil necessária aumenta em relação direta ao comprimento do comboio.

A resposta mais óbvia para a solução do problema é simplesmente alargar os vãos das pontes considerando-se as dimensões e condições de manobra do comboio proposto. A maioria das pontes encontra-se com vãos úteis adaptados aos comboios de quatro chatas.

Ou seja, promover novas intervenções nas pontes é ilógica ou mesmo inadequada. Os custos das reformas provariam a inviabilidade dos novos comboios propostos. A solução do caso em estudo implica em garantir pequenos desvios laterais λ , baixos ângulos de deriva β e baixos ângulos de aproamento \varnothing .

5. Forças, Momentos e outras variáveis atuando sobre o Comboio.

A Ilustração 07 indica todas as forças e momentos aplicados e respectivas respostas por parte do comboio, na condição da embarcação navegando no plano (superfície plana da água).

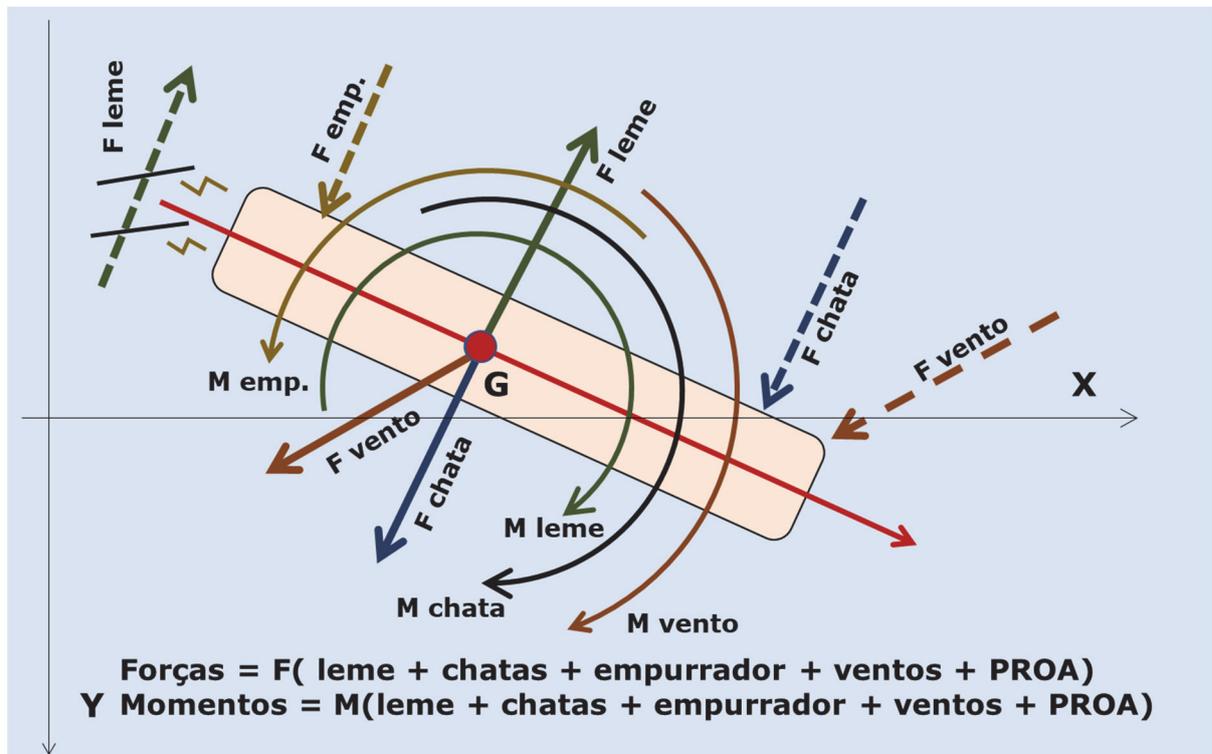


Ilustração 07 – Forças e Momentos agentes no Comboio.



O equacionamento do problema segue as Leis de Newton em que as forças e momentos externos devem se igualar às forças e momentos inerciais. No caso as forças e momentos inerciais são os devido ao movimento do centro de gravidade do comboio nos eixos X e Y acrescentado dos momentos inerciais em torno do eixo Z (perpendicular à figura).

Ou seja, a somatória das forças e momentos deverá ser contrabalaneada pela massa do comboio, centro de gravidade (e inércia) e aceleração (aceleração angular) devidamente distribuídas nos eixos X, Y e Z.

Movimentos de corpos rígidos acelerados em fluidos (água) implicam na aceleração de um volume de água do meio que, matematicamente, é somada à massa real do navio. Denomina-se massa virtual. O mesmo acontece com os momentos (momento virtual).

Essas avaliações serão desenvolvidas na parte II desse trabalho. Contudo, o problema enfrentado e a solução podem ser muito bem entendidos apenas com conceitos e avaliações oriundas de testes de manobra de giro de comboios. Na bibliografia consultada não encontramos nada referente a esse trabalho.

Consideremos as forças e momentos agentes sobre o comboio ilustração 07.

No eixo X a embarcação continuará o movimento de forma desacelerada até atingir a aceleração zero. A inércia da embarcação faz que a redução involuntária de velocidade seja pequena. O comboio na manobra de giro, ao atingir a velocidade constante, essa será de aproximadamente 60% da velocidade inicial.

Nos eixos Y (forças) e Z (momentos) nota-se que a somatória das grandezas provocará um deslocamento lateral do casco acompanhado por um momento que tenderá a forçar a estabilização do barco sob um ângulo de equilíbrio.

Pode-se dizer que na etapa 02 e 03 os movimentos são altamente acelerados podendo-se aplicar sem maiores detalhes a lei de Newton.

- **Eixo Y:**

Aceleração transversal = Forças Externas/ (Massa real e virtual do comboio)

- **Eixo Z:**

Aceleração Angular = Momentos externos/ (Inercia real e virtual do comboio)

Consideramos uma nova força e conseqüente momento agindo sobre o comboio especificamente na condição vazia. Na condição carregada, calado de 3,00 m para o trem de chatas e 2,20 m para o empurrador os fenômenos podem ser assimilados aos de um corpo único e rígido.

Entretanto, na condição vazia, com o trem de chatas no calado de 0,45 metros e o empurrador no mesmo calado de 2,20 m, uma força surge na proa do empurrador que deve ser reposicionada no centro de gravidade do comboio somado a um novo momento. Essa força aparece devido à diferença de calados entre empurrador e trem de chatas.



Age como se essa porção imersa de 18,5 m de comprimento e 1,75 metros de altura estivesse cortando a massa líquida como uma asa distorcida, gerando forças hidrodinâmicas ao seu redor.

Interessante que essa particularidade interage no sentido contrário às forças externas, melhor estabilizando o comboio. Em suma, age como a pena numa flecha no sentido de estabilizar o rumo.

A Parte II desse trabalho fará o equacionamento matemático desse efeito.

Como o calado do empurrador é constante as ações dos lemes serão semelhantes qualquer que sejam as condições de carregamento do comboio.

Averiguemos os resultados existentes de simulações e testes em escala real.

Perseguindo a navegação fluvial em rio da Malásia pesquisadores do Tanque de Provas de Hiroshima realizaram uma série de estudos com modelos, a maioria com dimensões próximas às da Hidrovia do Tietê. Utilizaram chatas do tipo Mississippi, com dimensões iguais às do Tietê. O empurrador é diferente com comprimento de 29,0 metros, boca de 9,5 m e calado de 2,20 metros. Essa diferença entre empurradores não deverá alterar os resultados finais uma vez que as inércias entre comboios carregados serão próximas.

Também o Instituto de Pesquisas Tecnológicas simulou comboio do Rio Tapajós com 24.000 toneladas e calado de 4,00 metros, oferecendo resultados muito aplicáveis para esse estudo.

Façamos análise dos resultados normais para navios e comboios.

A ilustração 08 foi obtida do "Principles of Naval Architecture" volume 03. Mostra o comportamento das variáveis na etapa acelerada do navio. No caso, e somente em ordem de grandezas, constatamos que:

- I. O tempo avaliado para a etapa acelerada é da ordem de 15 vezes o período de acionamento do leme, ou, no caso presente, menos que quatro minutos;
- II. A velocidade angular cresce rapidamente o que representa uma variação muito elevada do ângulo de aproamento;
- III. O ângulo de deriva é o arco seno da razão velocidade transversal e velocidade de singradura. Nota-se também que cresce rapidamente após acionamento do leme.
- IV. Nota-se que na primeira metade da etapa acelerada a aceleração angular tem sentido diferente daquela da segunda metade.
- V. A aceleração transversal cai rapidamente após cerca de duas vezes o tempo de leme tendendo a zero.

VI. Todas as variáveis mostram-se com valores constantes a partir de 15 vezes o tempo de acionamento dos lemes.

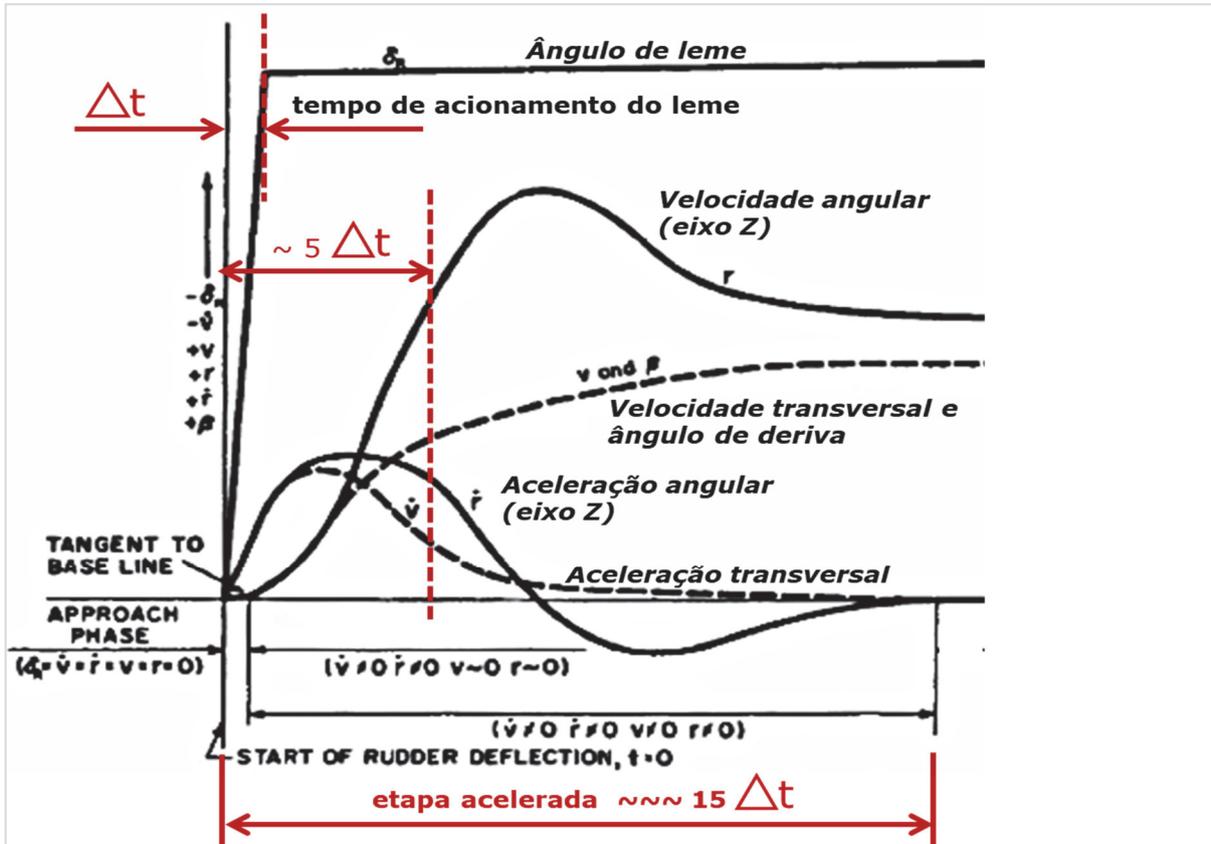


Ilustração 08 – Comportamento das variáveis na etapa acelerada da manobra

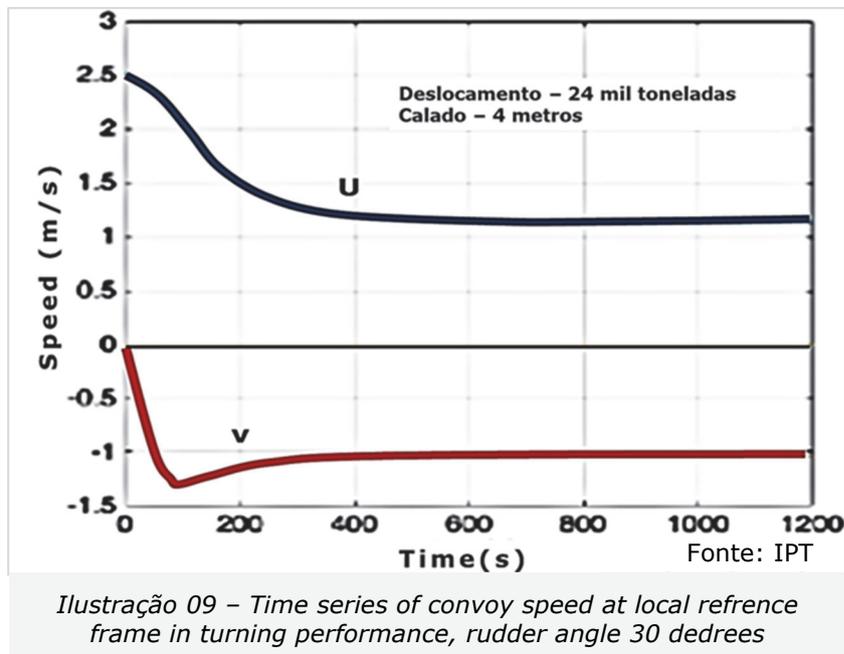
A ilustração 09 indica a variação das velocidades de singradura e transversal durante um teste de giro de comboio de 24.000 toneladas e 4,0 de calado no Rio Tapajós. Os testes e modelagem foram realizados pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas e foram publicadas em Congresso Sobena, por Carlos Padovezi e outros.

Nota-se que a velocidade transversal cresce até os 80 ou 90 primeiros segundos e tende tornar-se constante.

A velocidade de singradura (U) inicia a manobra com 2,5 m/s (9,0 km/h) e tende a decrescer até 1,2 m/s na etapa de acelerações zeradas ou velocidades constantes. Na etapa de acionamento do leme e imediatamente após encontra-se na faixa de 80% da velocidade inicial.

A velocidade lateral alcança aproximadamente 1,3 m/s no 80^a segundo. De outras publicações afere-se que o mesmo acontece para a velocidade angular. Da ilustração, claro que de forma muito aproximada, pode-se considerar a aceleração em 0,02 m/s²

ou em 80 segundos o comboio terá percorrido a distância lateral de 64 metros (considerou-se movimento com aceleração constante).



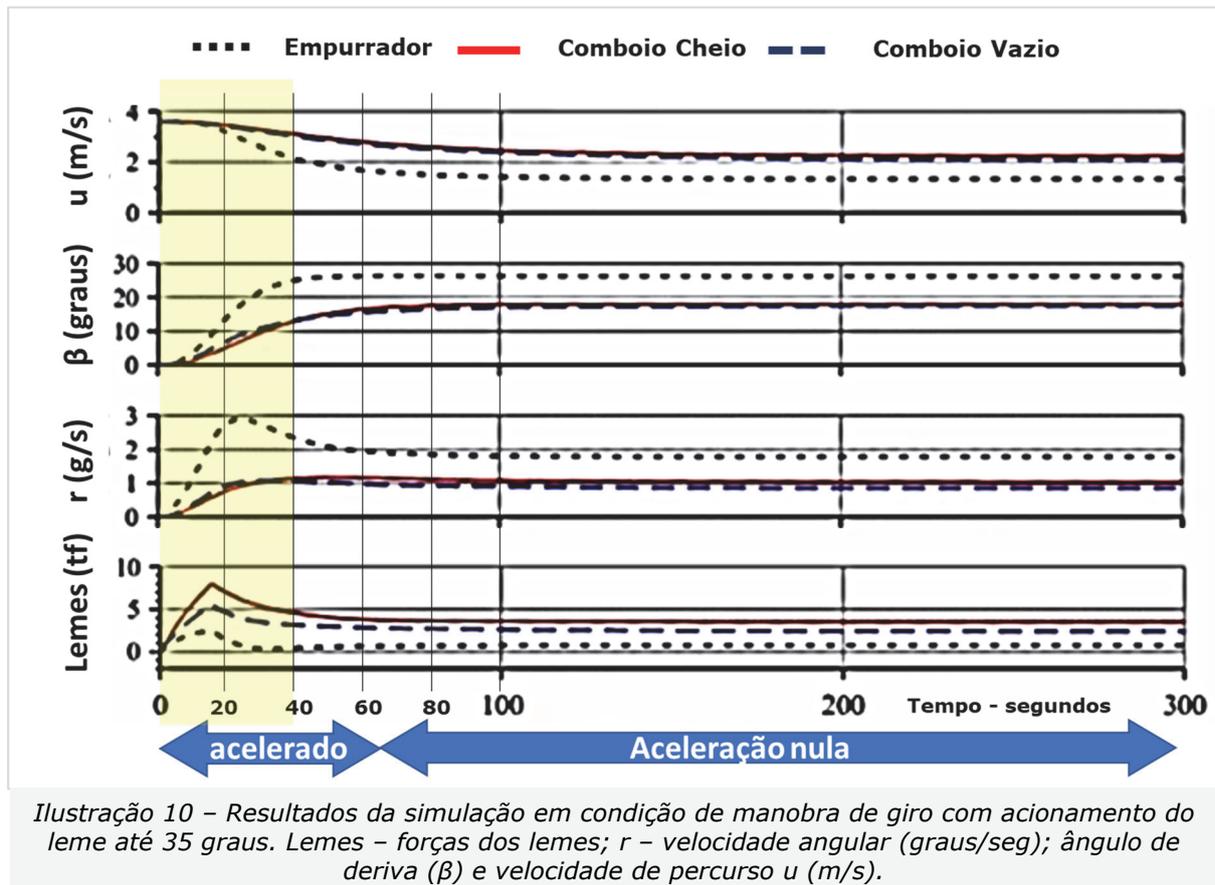
No Tanque de Provas de Delft foi testado um navio mercante de média tonelage e convencional com a finalidade esclarecer a variação das respostas do casco do navio frente à ação do leme. É um dos poucos trabalhos que trabalhou empiricamente a variações dessas “respostas hidrodinâmicas” adotando-se variações de calado, trim e velocidade do navio.

Como podíamos prever as forças hidrodinâmicas respostas do casco sofrem decréscimos acentuados em função de menores calados. No caso da embarcação em trim, calado próximo ao máximo na popa e mínimo na proa nota-se o restabelecimento das forças indicando que o trim ou maiores calados pela popa apontam no sentido de maior estabilidade direcional do navio. Para as velocidades testadas, traduzidas em números de Froude, não se observou sensíveis variações nas forças respostas do casco.

A informação da variação das forças em relação ao calado é muito importante, pois o caso em estudo refere-se ao trem de chatas vazio tendo pela popa empurrador com calado cinco vezes maior ao das chatas. Podemos nos mirar, para solução do problema, no caso das forças em condição de trim do navio mercante.

A ilustração 10 e 11 foram emprestadas do trabalho: “Maneuverability of a pusher and barge system under empty and full load conditions” de M. Sano, Akio Okuda e T. Hamagushi, 2018.

Os resultados foram extraídos de testes em campo de provas utilizando-se o aparelho Plannar Motion Mechanism (PPM) destinado à medição de forças agindo sobre um modelo sob uma variedade de ângulos de aproamentos, derivas, velocidades transversais e angulares.



O título do trabalho indica os testes na condição vazia. Na realidade a condição vazia corresponde à condição lastro. A ideia é viabilizar a navegação em um determinado rio da Malásia, em estado natural e bastante sinuoso. Pela ilustração 11 observa-se que o calado lastro da chata é de 1,35 metros mais que o dobro da condição vazia. O calado do empurrador é de 2,70 m e o comprimento (39,50 m) representa 39% do comprimento do modelo testado.

Mesmo no calado de lastro as forças obtidas nos testes mostram-se substancialmente inferiores às obtidas em condição carregada ou valado de 3,38 m. Por outro lado, os testes realizados com apenas uma chata não nos permite obter valores confiáveis que traduzam o comportamento de um comboio de 200 metros de comprimento com o empurrador representado menos de 10% da extensão da composição fluvial.

**Ensaio nas Condições Carregado e Lastro
Dimensões da Chata e Empurrador**

Item	Pusher	Barge		Pusher Barge (PB)	
		Empty	Full	Empty	Full
Lentgh overall (m)	39.5	61.65	61.65	101.98	101.98
Breadth (m)	9	10.8	10.8	10.8	10.8
Draft (m)	2.7	1.35	3.38	2.7	3.38
Wetted surface area (m ²)	518.7	777.12	1081.25	1295.82	1599.95
Volume (m ³)	683.44	801.79	2148.27	1485.23	2831.71
C _b	0.740	0.892	0.956	0.507	0.773
LCB from AE (m)	21.37	30.83	31.24	48.25	59.14



Ilustração 11 – Testes de Comboio Lastro e Carregado

Pela ilustração 10, conclui-se que:

- I. O movimento acelerado encontra-se inserido nos primeiros 50 ou 60 segundos da manobra completa de giro no qual o tempo de acionamento do leme é de 15 segundos;
- II. A manobra é realizada na velocidade de sete nós e as forças fornecidas pelos dois lemes somam 8.500 kgf na condição cheio e 5.000 kgf na condição lastro;
- III. Não se observa alterações significativas nas variáveis: velocidade angular, ângulo de deriva e desaceleração inicial. Interessante que as forças retiradas de ensaios são profundamente diferentes, diferença essa que não foi percebida nas simulações;
- IV. Para a configuração carregada e lastro o ângulo de deriva máximo aproxima-se de 20 graus e a velocidade angular não supera o um grau/segundo (0,01745 rd/seg.).

$$\dot{\alpha} = \frac{\text{Força do Leme}}{\text{Massa comboio (real e virtual)}}$$

$$\dot{\alpha} = \frac{\text{Momento Leme}}{\text{Inércia comboio (real e virtual)}}$$



Vários outros trabalhos foram consultados com resultados obtidos pelo Planar Motion Mechanism. Correspondem a várias formações de comboios incluindo os tradicionais da Hidrovia Tietê e mesmo o comboio proposto.

Como será visto na Parte 02 desse trabalho, em termos gerais, concluímos que as forças adimensionais auferidas dos testes, em condição carregada, não tem valores muito diferentes. Claro que há alterações nos valores, contudo não de forma a poder selecionar formações mais interessantes em relação a outras.

Logicamente o valor dimensional das forças e momentos variam de conformidade com o comprimento, calado e velocidade.

A Parte 02 desse trabalho aprofundará essas conclusões.

6. Avaliação dos Quantitativos dos Parâmetros de Manobra para o Comboio de 9.000 toneladas.

Esse item é dedicado à primeira avaliação das variáveis de resposta do comboio de 9.000 toneladas ao acionar os lemes até 35 graus.

Avaliamos o comboio totalmente carregado transportando 9.000 toneladas de carga e no calado de 3,00 metros e na configuração descarregada, com o trem de chatas no calado 0,45 metros.

Suponhamos ainda que durante a segunda e terceira etapa da manobra o movimento é francamente acelerado. Nesse primeiro momento da manobra as forças de reação ou resposta do casco não se encontram totalmente formadas e, por isso, serão consideradas desprezíveis nesse estágio do estudo. A Parte 02 do trabalho analisará a importância dos demais fatores agentes na manobra.

Para os primeiros minutos da manobra as Leis de Newton podem ser aplicadas na sua forma mais simples, como indicado ao lado.

A força nos lemes pode ser traduzida numericamente em função do peso específico da água (p_e), coeficiente de sustentação C_l , área (A), velocidade de fluxo sobre os lemes, ângulo de leme δ e fator correção do fluxo k .

$$F_{leme} = \frac{1}{2} (p_e) C_l A k V^2 \sin(\delta)$$
$$M_l = F_{leme} (LCG - LCP)$$



O momento, por definição é o produto entre força no leme (transversal ao fluxo) e distância entre o centro de gravidade e de pressão do comboio.

A velocidade de fluxo, no caso de comboios, normalmente é maior que a própria velocidade do navio. Maiores carregamentos do propulsor provocam “escorregamentos” do propulsor em relação ao fluxo. O comboio em análise, na velocidade de projeto poderá ter um coeficiente de correção em torno de 2,0 e na velocidade de 5,0 km/h em torno de 1,5.

Para lemes normais o valor de C_l é 1,3 para o ângulo de leme de 35 graus.

Suponhamos também que a velocidade de acionamento de leme é de 2,5 graus por segundo. Assim sendo, a força e momento no leme será função do tempo entre $t = 0$ e $t = 14$ s. Após o 14º segundo admitiremos que forças e momentos promovidos pelos lemes permaneçam constantes.

Os valores calculados para o comboio em estudo são:

Características do Comboio Carregado e Leve. 10.510 toneladas/1.510 toneladas		
Item	Carregado	Leve
Massa Total	1,60 E+06 utm.	0,32 E+06 utm.
Inércia Total	3,0 E+09 utm.m ²	0,52 E+06 utm.m ²
Centro Gravidade	106,4 m (rel. PPAR)	94,6m (rel. PPAR)

Os resultados que seguem admitem o comboio em uma circunstância onde predominam as acelerações, ou seja, até aproximadamente 90 segundos. Antes dos 90 segundos por certo terão início as forças restritivas ao movimento acelerado representado pela resposta hidrodinâmica do casco.

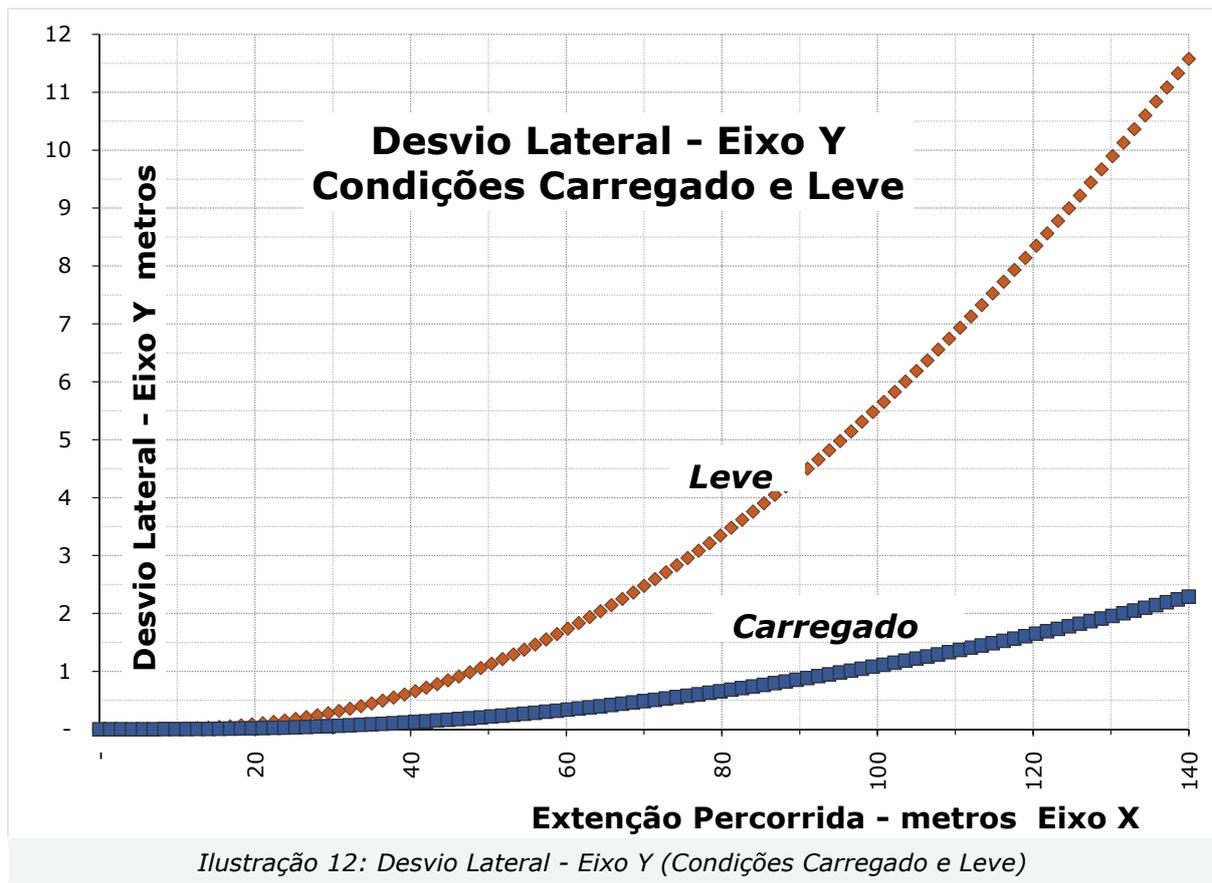
Em outras palavras. Os gráficos apresentados a seguir, ilustrações 12, 13 e 14 devem ser entendidas como apropriadas para o movimento inicial do comboio, respondendo à ação do leme durante um período de 15 segundos.

Creemos que as ilustrações traduzem muito próximo da realidade, o comportamento do comboio nas condições leve e carregado.

A ilustração 12 corresponde ao desvio lateral do comboio em relação ao rumo e a proa original, ou seja, anterior ao sinal de alarme. Na ilustração no tempo zero soma o alarme e imediatamente tem início a operação dos lemes com forças e momentos crescentes até o segundo 15. Após esse limite admitimos forças e momentos constantes partido dos lemes. A hipótese não é inteiramente correta. Porém também podemos considerar que estamos em regime de sobra de potência e a velocidade de seguimento e forças nos lemes poderão ser mentidas “constantes”.

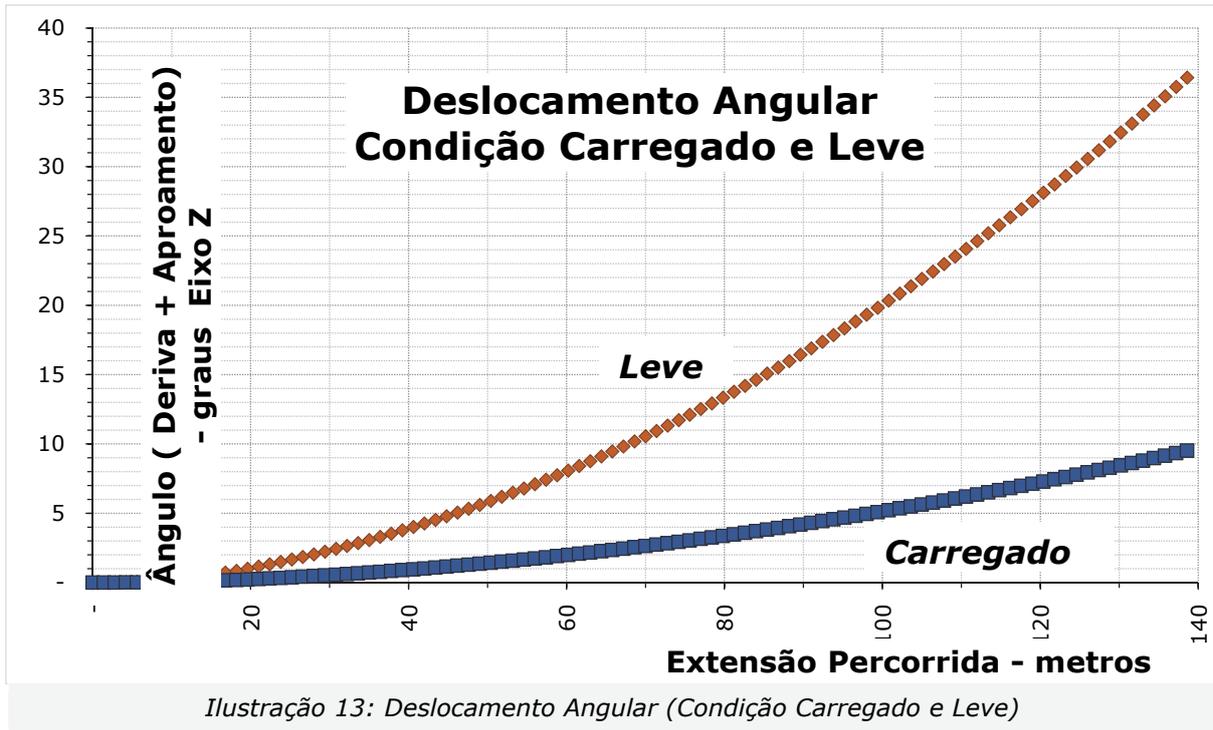


A ilustração segue até o segundo 140. Temos dúvidas sobre o seguimento após o segundo 90. Contudo permanece evidente que o deslocamento lateral do comboio não se mostra desprezível (~4 a 5 m). O deslocamento lateral é inversamente proporcional à massa da embarcação tanto que na condição carregada atinge aproximadamente um metro.

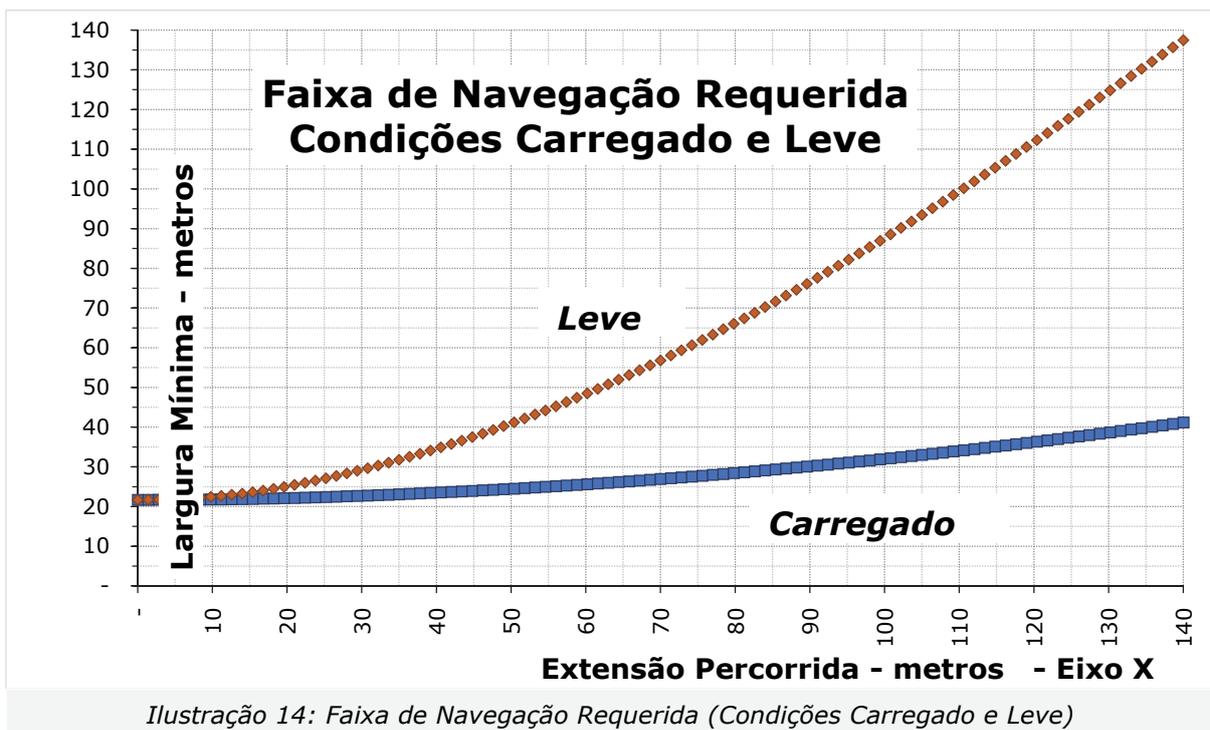


A ilustração 13 soma os ângulos de deriva e de aproamento. O primeiro deriva da velocidade de deslocamento lateral ou transversal em relação à velocidade de seguimento no eixo X e, o segundo sobrevém do giro do comboio em torno do eixo vertical Z passante pelo centro de gravidade.

Os resultados apresentam-se preocupantes, pois, no segundo, 90 já atinge mais de 15 graus na condição leve e 5 graus na carregada.



A ilustração 14 indica a faixa de largura necessária para a navegação segura do comboio, considerando-se o desvio lateral e as alterações angulares. Na condição leve atinge cerca de 70 metros na condição leve e de 30 metros na condição carregado.



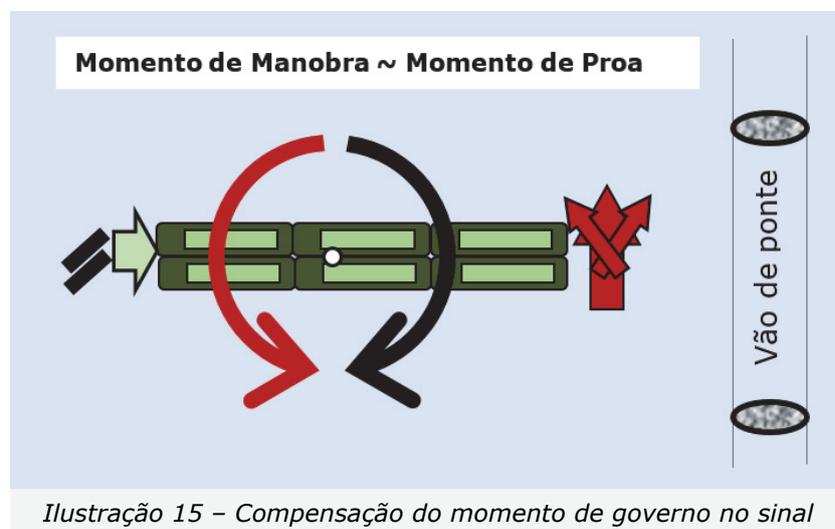
Creemos importante ratificar como foram obtidos os números acima e como devemos interpretá-los:

- I. Correspondem ao regime acelerado de manobra do comboio onde as forças e momentos reativos ainda não tiveram tempo de serem integralizados.
- II. Corresponde à aplicação simples da Lei de Newton.
- III. Supomos com margem elevada de acerto, em função de outras experiências, que as curvas permanecem inteiramente válidas até o segundo 90, a partir do qual passam a integrar decréscimos sucessivos.
- IV. As curvas correspondem a resultados teóricos e empíricos que indicam o comportamento de um comboio que, em determinado momento, é chamado a desviar-se de algum empecilho logo à frente.
- V. A situação avaliada é totalmente anormal em relação às condições normais de operação. Contudo há uma pequena probabilidade que aconteça e que corresponderão às condições de projeto das obras de arte, no caso as pontes.

Mesmo entendendo-se os resultados como portadores de desvios em relação à realidade os resultados mostram-se conclusivos, ou seja: não há condições de navegação de comboios configurados com seis chatas a menos que seja encontrado a avaliado outro método seguro nas ultrapassagens das pontes.

Voltemos à ilustração 07 que idealiza o comboio em manobra. Está claro que ocorrem uma série de forças e momentos que forçam o comboio a compulsoriamente compensar esses esforços sobre desvios laterais e ângulos de aproamento e rumo.

A solução para o problema de manobra está sobre o desempenho de um equipamento que forneça um momento contrário e semelhante ao momento de manobra. Ilustração 15. Esse equipamento será denominado Embarcação de Manobra de Proa.



A embarcação de Manobra de Proa opera há muito tempo e sua eficiência encontra-se comprovada.

7. A Embarcação de Manobra de Proa

Na maioria das oportunidades a necessidade de uso desse tipo de embarcação tem origem nos governos em rios sinuosos e na compensação da ação dos ventos em áreas não abrigadas e com o comboio navegando na condição lastro.

Nos rios brasileiros Madeira, Amazonas e Paraguai embarcações similares foram utilizadas, com objetivo que comboios de maior comprimento pudessem vencer as curvas mais acentuadas do rio.



Ilustração 16 – Alto Paraguai: embarcação manobra de proa

São dois tipos de embarcações: ambas operam com um duto giratório que orienta o jato do propulsor. A mais simples orienta o jato para um ângulo desejado e a segunda orienta o fluxo para dois tuneis laterais ao casco, semelhando-se bastante aos “bow thrusters”.

Em rios europeus os grandes comboios podem dispor de impelidores transversais de proa, usados para manobras de acostagem em áreas restritas, pois não operam a contento nas velocidades de singradura que podem atingir 14 ou 15 km/h.

Há até algum tempo, utilizava-se de lemes de proa, geralmente em dupla, para auxiliar no governo da embarcação nos meandros do rio. Em velocidades e áreas mais

elevadas os lemes de proa auxiliam nas sinuosidades do leito navegável. Mais recentemente foram estudados “lemes de proa” constituídos por cilindros que, em rotação, produzem forças laterais que melhoram as manobras (efeito Magnus).

Outra possibilidade já externada é a utilização de lemes duplos instalados a ré de cada propulsor. Realmente os lemes proporcionam forças e momentos mais que duplicados quando comparados o arranjo tradicional de lemes simples. No caso de manobras em áreas praticamente irrestritas essa configuração mostra-se vantajosa.



Ilustração 17 – Comboio Americano de 9.000 toneladas de carga com bowboat para manobra.

O que já existe operando

Equipamentos Azimutais: esse equipamento, por meio de engrenagens possibilita que o propulsor tenha rotação em torno de um eixo vertical e em 360 graus. Dispensa, por conseguinte, os lemes. Ou seja, o empuxo do propulsor substitui a força do leme.

O azimutal da Harbormaster é equipado com transmissão mecânica entre motor e propulsor fazendo com que menores potências produzam empuxos mais elevados aos que operam hidraulicamente – Ilustração 18.

A marca Harbor Master não é desconhecida para o Rio Tietê. Balsas que operavam entre Boraceia e Itapuí dispunham, já nos anos 80, desse tipo de propulsão. Tive a oportunidade de navegar a atestar a eficiência e simplicidade do equipamento. Cada balsa dispunha de dois equipamentos fora de borda, operando nas laterais da embarcação. Era da série 2000 ou 100 HP cada.



Atualmente propulsores azimutais são utilizados nos tributários do Rio Amazonas, transporte de soja.

Há marcas holandesas, americanas e alemãs. Em Santa Catarina a Mecânica Strahus também fabrica o equipamento. Os mais modernos oferecem transmissão hidráulica para o propulsor o que exige maiores níveis de potência para o mesmo empuxo.

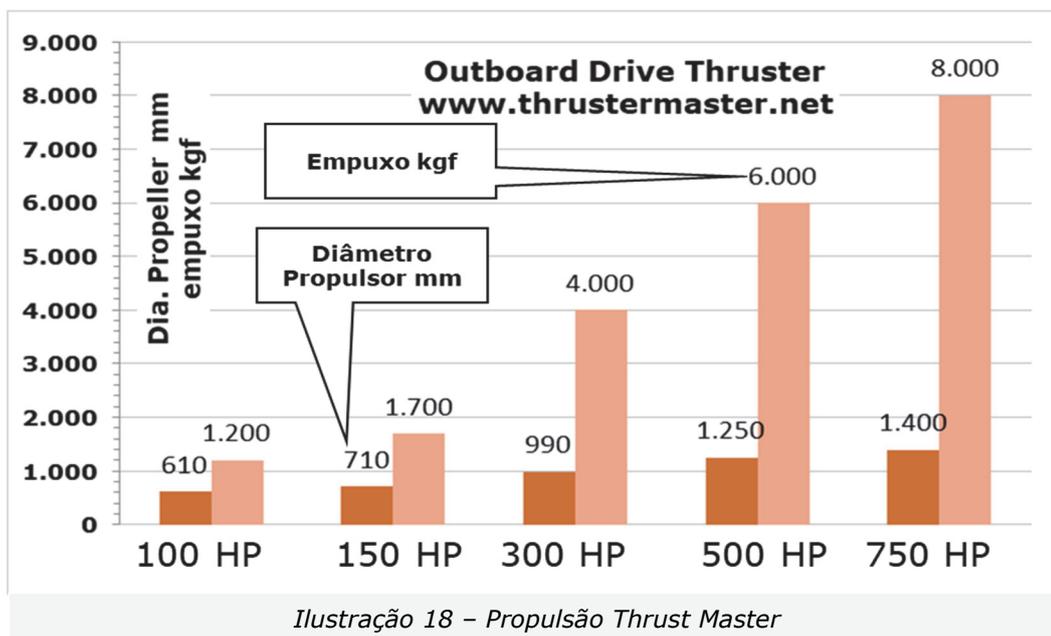
Na revista da Empresa Thruster Master de janeiro de 2014 foi publicada interessante reportagem sobre o uso de embarcações de manobra de proa na região do Texas e Golfo do México.

O texto original é extenso o que nos levou a redigir um resumo do mesmo apontando as particularidades mais interessantes (Bow Boat for Barge Tows; January 23 rd, 2014).

- I. Refere-se à Transportadora Breathwit Marine Contractors que desloca três chatas vazias ou cheias em condições climáticas adversas.
- II. A navegação é realizada no trecho denominado West End do Canal Intracoastal onde é difícil manobrar comboios, mesmo em condições climáticas adequadas. As dificuldades maiores referem-se às pequenas larguras nas curvas, cruzamentos e acesso às eclusas.
- III. Sob as condições de ventos de 45 milhas por hora é virtualmente impossível manter o governo de duas balsas apenas.
- IV. Pois a companhia em questão opera, mesmo em condições adversas, utilizando uma embarcação de manobra de proa na forma radio controlada.
- V. O próprio armador construiu uma embarcação de 16,8m m x 8,50 m x 2,10 m equipado com um azimutal da Thrustermaster. O barco é equipado com "empurras" na proa e na popa. O azimutal está instalado numa fenda construída na popa da embarcação.
- VI. Os objetivos em lançar esse equipamento eram: aumentar a capacidade de carga por viagem e incrementar o número de viagens mensais.
- VII. A embarcação é rádio controlada. Contudo, dispõe de mesa própria de controle;
- VIII. É equipada com um motor de 350HP acoplado via azimutal hidráulico a um propulsor de 1,48 m de diâmetro.
- IX. O motor da embarcação de manobra de proa auxilia na propulsão do comboio e no governo ao longo dos meandros e em condições de vento lateral.
- X. Completando, o armador citou que anteriormente conseguiam perfazer seis viagens mensais com duas barças. A embarcação de proa permite a realização das mesmas seis viagens, mas com três chatas. A embarcação também trabalha na faina das eclusagem.

Claro que o trabalho em pauta não tem a intenção de sugerir a mesma embarcação para a Hidrovia Tietê. O objetivo é utilizar o conceito e fazer as alterações necessárias para o caso Tietê.

Baseado nos catálogos da Thrustmaster desenvolveu-se a ilustração 18, indicando a disponibilidade de potências em função dos empuxos desenvolvidos e do diâmetro do propulsor.



Equipamentos tipo azimutal já são fabricados no Brasil pela Strauhs Equipamentos e Fundição Ltda, empresa localizada em Joinville – Ilustração 19.



Ilustração 19 – Equipamento Hidráulico Strauhs.

Consultado, a empresa de Santa Catarina enviou:

O sistema é montado sobre plataforma única, constituída por:

I. Propulsor azimuthal

Características básicas preliminares aproximadas dos equipamentos:

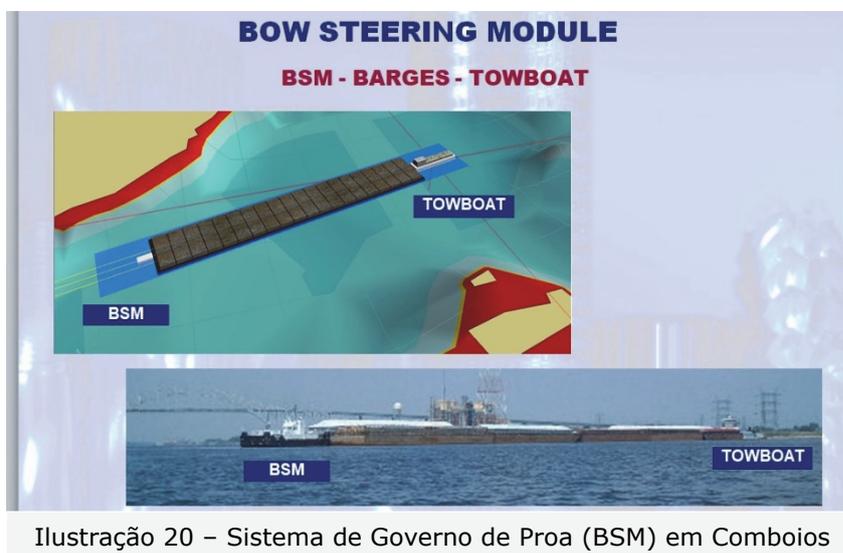
- Haste vertical de 1500 mm a 4200 mm (até o centro da porca do hélice).
- Giro 360°.
- Acionamento Hidráulico por motor diesel.
- Hélices 4 pás de Ø 680 mm à 1400 mm.
- Basculamento vertical 90°.
- Curso linear vertical até 800 mm.

II. Motor Diesel

- Potências 250HP à 650HP @ 1800 rpm.
- Marca/modelo Cummins/Scania/Volvo.
- Refrigeração e Trocador de calor ou radiador.
- Partida Elétrica (conjunto de baterias).
- Comando Painel local e console de comando.
- Tanque de óleo 300 l a 500 l.
- Descarga silenciosa de gases

Para a potência de 250HP a cotação de janeiro de 2021 aproxima-se de R\$ 800.000,00 (250 HP), incluindo o sistema propulsor, motor, comando e comissionamento. Não incluso o transporte, ICMS e IPI. PIS/COFINS incluso.

No mesmo sentido a navegação fluvial americana emprega uma embarcação para manobra de proa utilizando o sistema de propulsão Voith Schneider, Ilustração 20.



O representante da Voith no Brasil é o Sr. Marcus Mazza (21 3239 4850 – 21 976177776) com quem manteve uma reunião.

Foi-me apresentada uma série de slides mostrando as vantagens da Voith para o caso em estudo. A ênfase da apresentação baseou-se na possibilidade de aumento do número de chatas do comboio em função do conseqüente incremento da manobrabilidade propiciada pela propulsão Voith.

Ponto interessante mencionado foi o melhor rendimento do propulsor “Voith” em relação ao azimutal (71% e 51% respectivamente) e a necessidade em ser operado em águas sem detritos flutuantes – Ilustração 21.

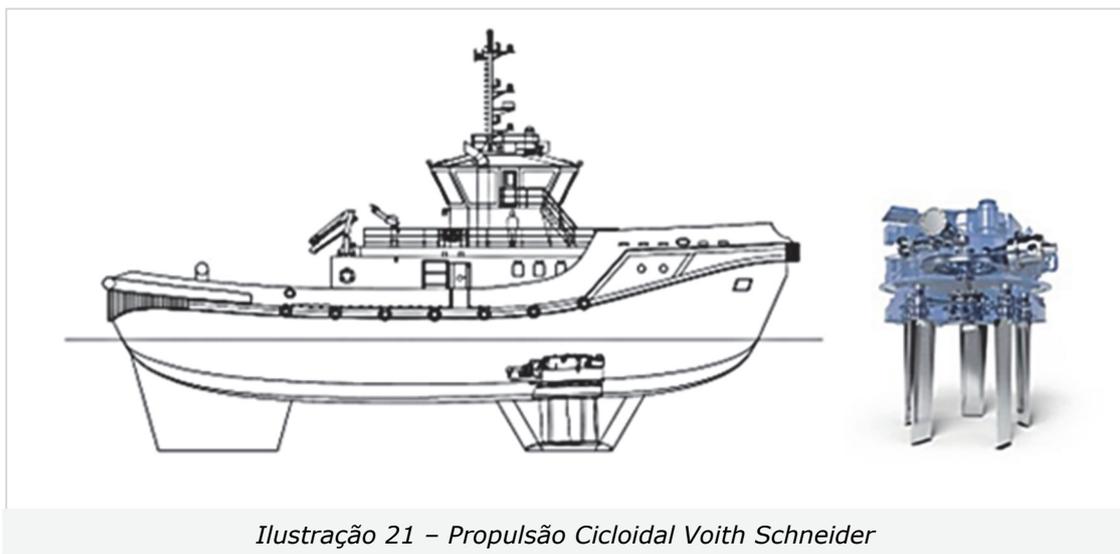


Ilustração 21 – Propulsão Cicloidal Voith Schneider

8. Dimensionamento Preliminar da Embarcação de Manobra de Proa.

O projeto da embarcação de manobra de proa deve preencher a seguintes missões:

- I. Capacidade de introduzir e retirar das câmaras das eclusas duas chatas em linha totalizando 120 m de comprimento e 10,6 m de boca no calado de 3,00 m e na velocidade aproximada de 6,0 km/h;
- II. A Embarcação de Manobra de Proa ter potência de complementação em relação aos 800 HP do empurrador, tal que permita ao comboio de seis chatas navegar, em condições normais, na velocidade de pelo menos 10 km/h. Nos reservatórios o atual comboio de quatro chatas com os 800HP disponíveis, alcança a velocidade de 10 km/h. A velocidade de percurso de 7,5 km/h considera o tempo total de



percurso, ou seja, considera todas as impedâncias existentes ao longo do percurso entre origem e destino. Simplificando: o trabalho atual optou por utilizar o mesmo empurrador. Assim sendo, a velocidade de 10 km/h deverá ser alcançada utilizando-se a potência da embarcação de manobra de proa. Por que 10 km/h e não mais ou menos? Os 10 km/h representa o que podemos nomear de velocidade "econômica" para os comboios, segundo visão dos armadores.

- III. Capacidade de manter a velocidade em 10 km/h na condição comboio vazio, empurrado seis chatas no calado de aproximadamente 0,50 metros e empurrador no calado 2,20 m.
- IV. Capacidade de pela proa, contrabalancear a força exercida pelos lemes do empurrador na velocidade de 5,0 ou 6,0 km/h que corresponde aquela normalizada pelos organismos gestores.
- V. Capacidade de ser controlada a partir do passadiço do empurrador e localmente.
- VI. Ter sistemas de amarração e empurre na proa e na popa.

Para esse estudo faremos uso da propulsão azimutal. Contudo, facilmente esse estilo de propulsão poderá ser substituído por outro de conveniência do armador, de tal forma que venha a satisfazer as condições mínimas para transposição das eclusas e ultrapassagem dos vãos das pontes.

Avaliações anteriores conduziram que o empuxo de proa, fornecido pela embarcação de manobra de proa, deva atingir os 1.500 kgf e no giro de 360 graus. Esse empuxo satisfaz as exigências requeridas para as ultrapassagens das pontes.

Com essa informação há condições de avaliar a propulsão dos comboios em projeto.

a. Resistência Hidrodinâmica dos Comboios.

A ilustração 22 foi obtida a partir de testes em Tanque de Provas realizadas nos Estados Unidos para os comboios do Rio Mississippi. Tais testes foram realizados para várias configurações de comboios e calados.

O menor calado testado foi de 0,90 m o que nos obrigou a calcular teoricamente as resistências e potências efetivas para o calado leve, ou seja, 0,42 m.

Predefinimos um rendimento do sistema de 45% valor comumente observado em comboios fluviais, Ilustração 23.



A curva "3L2B carregado" corresponde ao comboio formado por três barcaças em linha e duas, lado a lado, operando no calado de 3,00 metros. Será a condição usual do comboio de 9.000 t na condição singradura.

A curva "3L 2B leve" corresponde ao mesmo comboio na condição descarregado. Nesse caso o calado das chatas será de 0,42 m e do empurrador de 2,20 metros.

Foram também analisadas as condições de propulsão na configuração de duas chatas em linha que corresponde à situação de acesso de decesso às eclusas.

Potências Efetivas das Formações dos Comboios Tietê Fonte: Testes USACE 1960																
Formação		2 L x 1 B				2L x 2B					3L x 2B					
Deslocamento	ton	440,0	1.008,0	1.742,0	3.562,0	880,0	2.013,0	3.483,0	6.150,0	7.123,0	1.320,0	3.020,0	5.225,0	9.224,0	10.684,0	
Área Molhada	m ²	1.290,0	1.338,0	1.528,0	1.941,0	2.500,0	2.567,0	2.824,0	3.207,0	3.319,1	3.600,0	3.860,0	4.236,0	4.811,0	4.974,6	
Boca	m	10,8	10,8	10,8	10,8	21,5	21,5	21,5	21,5	21,5	21,5	21,5	21,5	21,5	21,5	
Comprimento	m	112,0	114,3	116,5	118,8	112,0	114,3	116,5	118,6	118,8	174,0	178,0	176,0	178,0	178,3	
Velocidades		calados - metros				calados - metros					calados - metros					
milhas/h	km/h	knots	0,42	0,91	1,52	3,00	0,42	0,91	1,52	2,59	3,00	0,42	0,91	1,52	2,59	3,00
4,00	6,44	3,48	14	19	26	34	27	37	47	65	67	39	55	69	79	87
5,00	8,05	4,34	27	37	51	66	52	71	93	126	131	77	107	134	155	169
6,00	9,66	5,21	47	64	89	114	91	124	160	218	226	133	185	232	268	292
7,00	11,27	6,08	75	101	141	181	144	196	254	346	358	211	294	368	426	464
8,00	12,87	6,95	112	151	210	270	215	293	380	517	535	316	439	549	636	693
9,00	14,48	7,82	160	215	300	384	306	417	541	736	762	449	625	782	905	987
K		2,46	3,30	4,60	5,90	4,70	6,40	8,30	11,30	11,69	6,90	9,60	12,00	13,90	15,15	
EHP		3,60 * H^{0,4492} * V³				6,93 * H^{0,4782} * V³					9,8504 * H^{0,3917} * V³					

Ilustração 22 – Resistência Hidrodinâmica dos Comboios

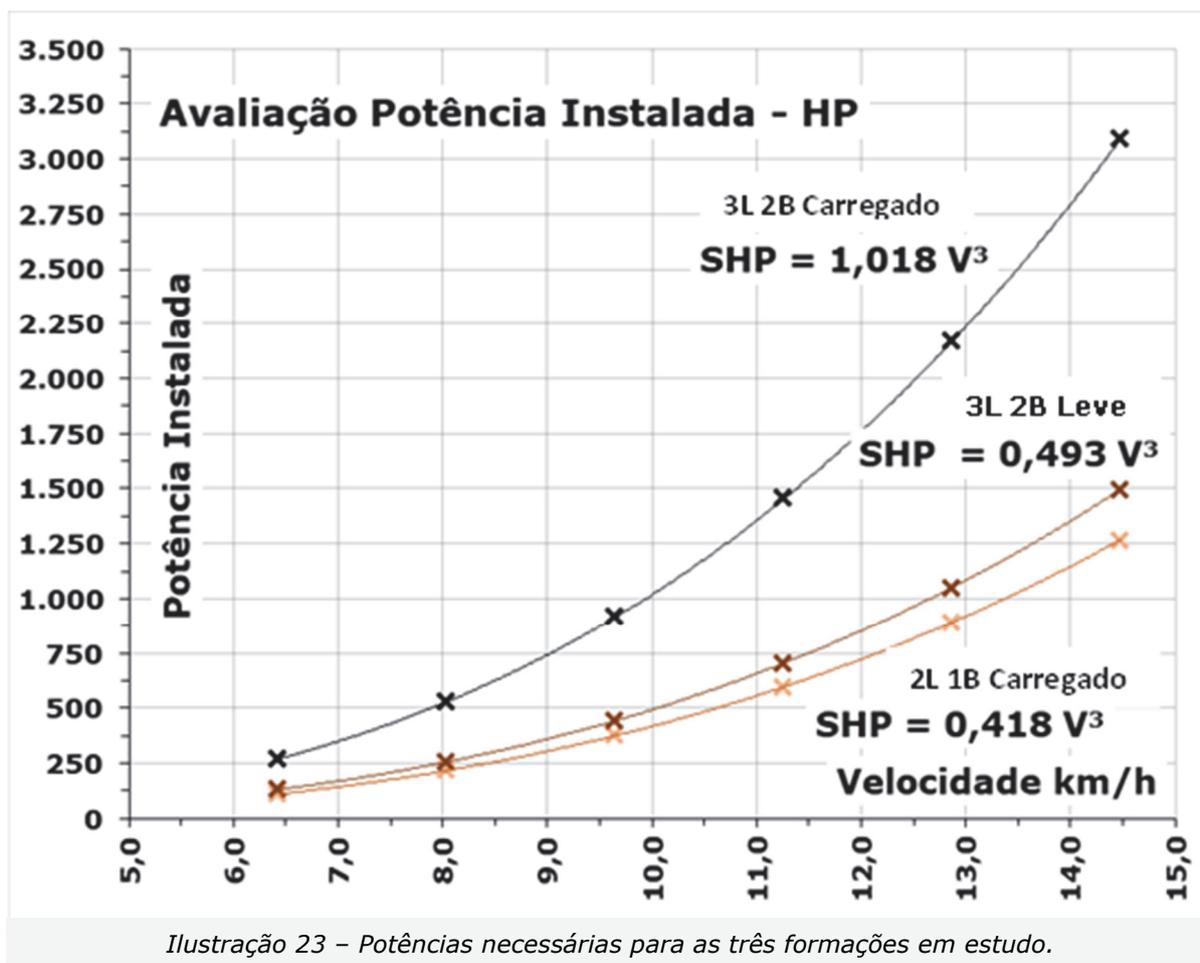
b. Propulsão

A curva "2L 1B carregado" indica as potências necessárias para a navegação do comboio, no calado de 3,00 metros. É também a condição mais importante para operação em eclusas, lembrando que as câmaras admitem duas chatas em linha por vez.

Verificamos que na configuração carregada 3L2B o empuxo total necessário para velocidades entre 10 e 11 km/h atinge 11.000 kgf. Na condição leve, para a mesma velocidade, serão 5.500 kgf. Para o comboio 2L1B operando nas eclusas e na velocidade máxima de 6 km/h serão necessários 1.500 kgf.

Nessas circunstâncias o projeto do propulsor do empurrador deverá ser realizado considerando-se também empuxo fornecido pelo azimuthal instalado na Embarcação de manobra de Proa.

Nas viagens em vazio prevê-se que o azimuthal seja recolhido e a propulsão do comboio recaia sobre os propulsores do empurrador somente.



Empuxo Necessário por Propulsor				
Velocidade		Empuxo por Propulsor (caso: 2 prop.)		
km/h	m/s	kgf		
		21 C	32C	32V
6,44	1,79	772	1.881	940
8,05	2,24	1.207	2.939	1.469
9,66	2,68	1.737	4.232	2.116
11,27	3,13	2.365	5.760	2.880
12,87	3,58	3.084	7.512	3.756
14,48	4,02	3.904	9.509	4.755

Ilustração 24 – Empuxos necessários por propulsor para três configurações e velocidades entre seis e 14 km/h

Esclarecendo o procedimento: (1) a navegação carregada será realizada somando-se os empuxos produzidos pelo empurrador e pela Embarcação de Manobra de Proa; (2)



na condição vazio o comboio será propulsado apenas pelos motores do empurrador: nesse caso o azimuthal será recolhido.

Definimos que o empuxo de avante, 1.500 kgf, satisfaz as exigências relativas à manobra.

Assim sendo, avaliemos qual a exigência de empuxo extra para manter o comboio de 9.000 t numa velocidade entre 10 e 11 km/h, na condição carregada.

Suponhamos rotação do motor em 1.800 RPM e redutor de 6:1. Para os propulsores optou-se pelo diâmetro de 1,65 metros compatível com os calados atuais (ou menores – até 1,70 m).

Supusemos que o comboio, na condição carregada ou 9.000 t de carga opere na plena potência dos motores e ainda, aproveitando o empuxo do propulsor de avante.

Calculamos a velocidade do comboio em duas condições: adotando-se propulsor de proa de 1.500 kgf e 3.000 kgf. As velocidades alcançadas ao longo dos reservatórios em regime normal de operação foram de 10,30 km/h e 11,13 km/h. Concluímos que essa pequena vantagem em velocidade deverá ser estudada caso a caso. Importante ratificar que 1.500 kgf de empuxo da proa contemplam as condições de segurança da navegação.

Na condição de retorno vazio, sem utilizar o propulsor de proa (recolhido verticalmente em 180 graus), a velocidade foi de 10,50 km/h.

Na condição operando duas chatas, nas eclusas, o propulsor de proa poderá garantir até 8,50 km/h. Ou seja, nas eclusas a embarcação de proa terá plena capacidade de operar com segurança duas chatas em linha.

Com a adoção do propulsor de proa, suponhamos 1.500 kgf, os lemes poderão ter atuação melhorada com a adoção de lemes duplos, visando principalmente suportar maiores velocidades de ventos na ultrapassagem das pontes.

9. Conceito das Obras Adaptadas ao Comboio de 9.000 toneladas.

Por certo a utilização de comboios maiores, 9.000 toneladas úteis, adaptando-se uma embarcação de manobra atrelada na proa do trem de seis chatas trará importante revitalização econômica à Hidrovia Tietê. Terá condições em competir economicamente com a ferrovia existente.

Esse trabalho considera-se que os empurradores atuais serão utilizados com os novos comboios. Para tanto, os propulsores deverão ser redimensionados para a nova condição



de operação introduzindo mais 1.500 kgf de empuxo ao comboio. Se o armador optar por 3.000 kgf de empuxo instalados na embarcação de manobra recomenda-se alteração do sistema de governo do empurrador.

Nesse ponto da discussão é evidente que o leitor terá a seguinte dúvida:

Se a navegação com quatro barcas se faz demorada e difícil, principalmente nas eclusas e pontes, torna-se evidente que as manobras com seis barcas serão ainda mais complicadas". "A situação se agravará se aceita a operação de comboios maiores fazendo-se uso dos mesmos empurradores.

Na verdade, repito, os comboios atuais apresentam baixa velocidade média de percurso em virtude dos vários desmembramentos em pontes e nas eclusas, realizadas apenas com duas barcas por vez. Mede-se a velocidade em aproximadamente 7,5 km/h. Na navegação em reservatório, condição carregada, a velocidade alcança 10 km/h.

Como avaliado anteriormente, não evidenciamos consistência técnica ao referir-se às baixas potências dos empurradores. No geral poderá ser até verdade, mas, no caso particular, a navegação é realizada em reservatórios e em águas profundas e o armador aceita como financeiramente viável a velocidade de 10 km/h. Interessante lembrar que para elevados acréscimos de potência os aumentos em velocidade são pequenos uma vez que a potência varia com o cubo da velocidade e o consumo de combustível (principal item do custo operacional) é proporcional ao quadrado da velocidade.

Na verdade, as maiores queixas dos usuários repousam sobre os desmembramentos em algumas pontes que não ainda não foram reformadas e nos tempos dispendidos nas manobras nas eclusas.

Quanto aos tempos dispendidos em eclusas, o principal fator que onera os tempos são os tempos de navegação entre garagens de barcos e eclusas, muito afastadas entre si. Também é importante considerar os tempos dispendidos nas eclusas, transpondo empurradores em vazio, uma vez que é vedada a utilização compartilhada de empurradores nessas operações.

As operações de transposição de eclusas, com trem de seis chatas, serão facilitadas pela segunda embarcação à disposição (embarcação de manobra) e a possibilidade do compartilhamento.

Faz-se claro que todas as reformas executadas e em execução nas pontes foram realizadas para os comboios de seis mil toneladas, o mesmo acontecendo com as manobras nas eclusas.

Se confirmada a adoção de comboios de seis chatas completando 9.000 toneladas de carga coma compulsoriedade de uso de embarcação de manobra de proa todas as intervenções complementares em eclusas e pontes deverão ser repensadas.

Oferecemos as seguintes sugestões:

I. Pontes

Não alterar os vãos existentes, a menos em casos particulares. A introdução da manobra de proa poderá ajustar melhor o comboio ao vão útil da ponte. Atualmente os lemes têm baixo efeito de manobra no caso de uma emergência em virtude da baixa velocidade de ultrapassagem.

A manobra auxiliar localizada na proa tornará mais segura a atual manobra, mesmo com comboios maiores. Será 1.500 kgf de força útil disposta na proa do comboio, quase o dobro das forças disponibilizadas pelos lemes na velocidade de ultrapassagem.

O argumento da energia cinética do comboio descontrolado sobre pilares poderá ser minimizado pelo propulsor de proa. Será mais difícil o comboio perder o governo.



Ilustração 25 – Ponte no Alto Rio Mississippi

As pontes do Tietê estão baseadas em duas condições de lâmina de água: águas rasas próximas aos trechos de jusante dos barramentos e águas profundas nos demais trechos dos reservatórios. Para as pontes sediadas em águas profundas não há o que alterar, ilustração 26.



Ilustração 26 – Ponte no Rio Tietê

Principalmente nos EUA são utilizadas proteções engastadas na soleira do canal que conduzem a proa da embarcação nas ultrapassagens – ilustração 27.



Ilustração 27 – Pontes do Rio Mississippi e Tributários

Há uma pergunta não respondida: Por quê a ultrapassagem das pontes do Rio Mississippi e dos rios europeus são menos problemáticas que a das pontes do Tietê? Pelo que entendo não há uma resposta direta. Realmente a configuração de propulsão e



Governo do Estado de São Paulo
Secretaria Estadual de Logística e Transportes
Departamento Hidroviário

manobra dos empurradores utilizam tubos Corte que proporciona baixa variação de empuxos em velocidades menores acompanhadas pelo maior carregamento dos propulsores. Essa vantagem americana será compensada pela propulsão de proa.

Creemos que não deva ser causa de maiores preocupações a ultrapassagem de pontes do Rio Tietê pelos comboios maiores.

O maior vão reconstruído atinge pouco mais de 105 metros e o menor é de 45,53 metros e localiza-se na ponte que interliga os municípios de Barra Bonita e Igarapu do Tietê (SP 255). Essa última situa-se local mais raso.

A ilustração 28 menciona as várias pontes do Rio Tietê e reformas concretizadas. Das 15 pontes em operação, 10 delas permitem a navegação com quatro chatas (sem desmembramento) e as demais têm projeto concluído, mas sem verbas para execução.

COD	PONTE	LIGAÇÃO	VÃO ÚTIL (m)	PROTEÇÃO	TRANSPOSIÇÃO
1	SP 147	PIRACICABA / ANHEMBI	(1) 25,00 → 172,70	sem proteção	1 chata
2	SP 191 - TIETÊ	S.MANUEL / S.M.SERRA	47,95	implantada	4 chatas
3	SP 191 - PIRACICABA	S.MANUEL / S.M.SERRA	52,76	sem proteção	4 chatas
4	SP 255	B.BONITA / IGARAÇU	45,53	implantada	2 chatas
5	IGARAÇU DO TIETÊ	B.BONITA / IGARAÇU	45,84	implantada	4 chatas
6	AYROSA GALVÃO	JAÚ / PEDERNERAS	105,00	implantada	4 chatas
7	SP 225	JAÚ / BAURU	70,00	implantada	4 chatas
8	SP 333	RIBERÃO PRETO / MARÍLIA	(1) 34,14 → 75,94	(2) implantada	2 chatas
9	BR 153	S.J.RIO PRETO / LINS	40,00	implantada	4 chatas
10	SP 425	S.J.RIO PRETO / PENÁPOLIS	(1) 31,37 → 97,24	(2) implantada	2 chatas
11	SP 461	BURITAMA / BRIGUI	50,00	implantada	2 chatas
12	SP 463	ARAÇATUBA / AURIFLAMA	62,34	implantada	4 chatas
13	JACARÉ	GUZOLÂNDIA - VALPARAÍSO	81,50	sem proteção	4 chatas
14	SP-563	ANDRADINA / P.BARRETO	45,59	sem proteção	1 chata
15	SP 595 - TIETÊ	ITAPURA / ANDRADINA	40,00	implantada	4 chatas
16	SP 595 - S.J.DOS DOURADOS	ILHA SOLTEIRA / S.FÉ DO SUL	68,24	implantada	4 chatas

Obs.: (1) Os vãos úteis indicados com a notação XX,XX → YY,YY indicam os vãos atuais e os futuros, respectivamente.

(2) Após ampliação do vão de navegação, serão implantadas novas proteções de pilares, visando transposição de 4 chatas

Ilustração 28 – Situação das pontes em agosto 2018

A sugestão de operar comboios de seis chatas ao longo da hidrovia não decreta a necessidade de reformas nas pontes. A proposição da embarcação de manobra de proa garante a manobrabilidade requerida sob as pontes acrescentada de decréscimo da energia cinética dos comboios o que garante a segurança dos pilares. Ou seja, realizados as reformas faltantes, os comboios de seis chatas poderão trafegar normalmente sob as pontes, a não ser em regime climático muito adverso.

A ilustração 29 é uma sugestão para proteção de pilares de pontes para águas rasas.

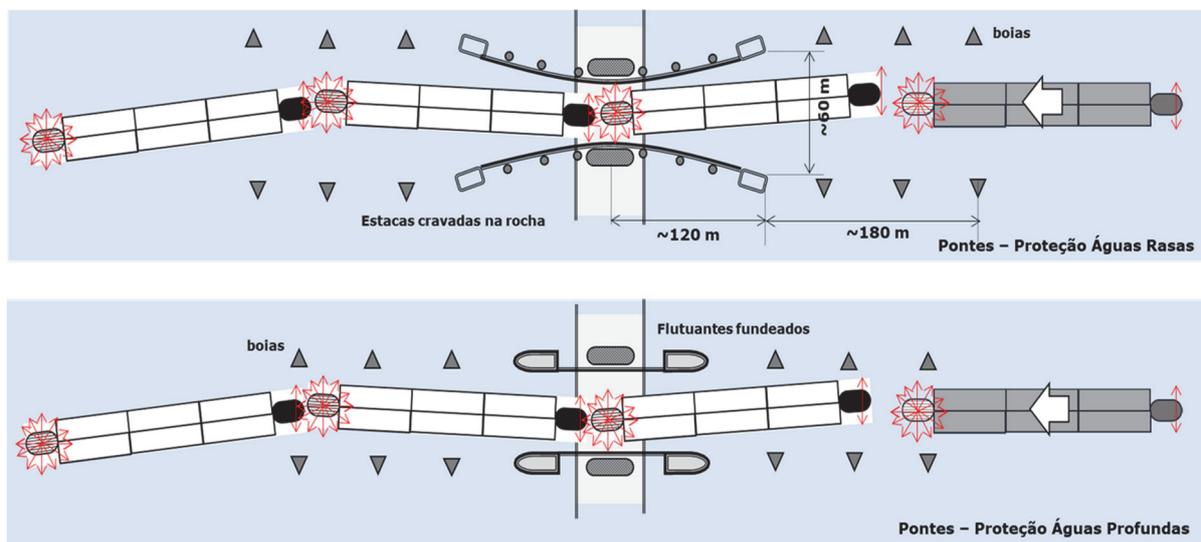


Ilustração 29 – Tipo de reformas em pontes para comboios com embarcação de manobra de proa

II. Acesso às Eclusas

Uma série de projetos foi desenvolvida para as garagens das eclusas do Rio Tietê.

Uma análise mais profunda fez-nos entender que os novos layouts se baseiam na navegação interior europeia com rios em corrente livre e se barrados, com desníveis muito menores aos do Tietê. Muitas eclusas europeias são construídas separadamente dos barramentos, exigindo escavações laterais para viabilizar canais de acesso.

No caso Tietê, as cabeças de montante das eclusas debruçam-se sobre os reservatórios, locais em que as profundidades não raras superam os 30 metros.

Tornam-se assim mais custosas as garagens de barcos fixas construídas a montante das eclusas, uma vez que exigem fundações profundas.

Essas fundações podem ser substituídas por elementos flutuantes. Foi o caso dos muros guias de Ibitinga e Promissão que são formados por caixões flutuantes de concreto. Foram construídos na década de 80.

Para incrementar a capacidade operacional das transposições todas as eclusas exigem garagens de barcos tanto por montante quanto jusante.

Assim sendo, optamos que as garagens de barco de montante fossem constituídas por boias de amarração de dimensões apropriadas a receberem o comboio de 9.000 toneladas. O número de boias deve merecer um estudo particular. Importante que as garagens sejam posicionadas nas proximidades do muro guia de montante da eclusa em

áreas relativamente abrigadas e externas às áreas de segurança da casa de força e vertedouros.

Por jusante, as eclusas do Tietê foram escavadas, pelo menos parcialmente em basalto, obrigando que os canais de jusante fossem construídos a céu aberto. Assim sendo, propomos que as garagens de barcos por jusante das eclusas sejam escavadas em rochas.

As eclusas do Rio Tietê têm dimensões semelhantes. A ilustração 30 reproduz com boa fidelidade o layout proposto. Não tenho dúvidas que os custos de construção terão redução considerável. Em números redondos as obras por eclusa foram dimensionadas em R\$ 65 milhões. Pois bem, não nos sentimos desconfortáveis em redimensioná-los na faixa dos R\$ 20 milhões por eclusa. Lógico que os valores devem ser mais adequadamente calculados.

A Ilustração 30 mostra o layout geral que propomos para as eclusas.

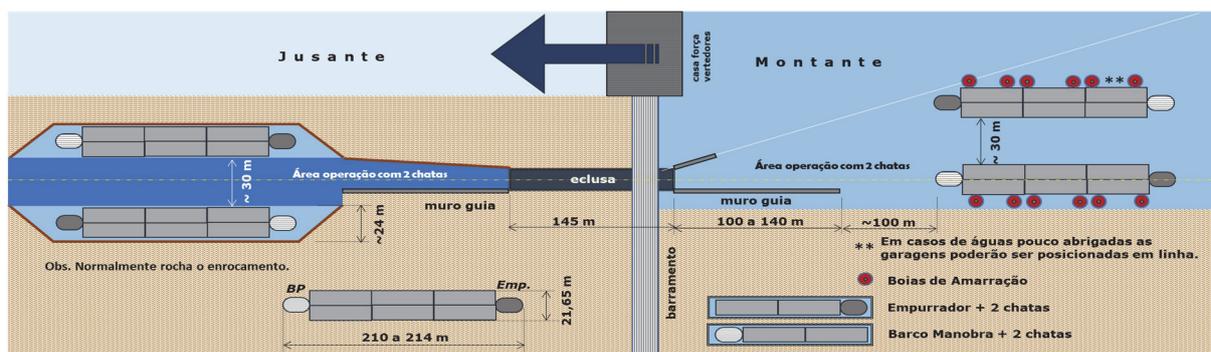


Ilustração 30 - Layout geral das intervenções nas eclusas para comboios de 9.000 toneladas

10. Tempos de Transposição das Eclusas e Velocidades do comboio.

Os tempos de transposição das eclusas definem a capacidade de hidrovia.

Interessante que a navegação realizada ao longo de uma cascata de eclusas, como é o caso em análise, as velocidades dos comboios são formalizadas pelos tempos de transposição.

Na atualidade, os armadores já se queixam de filas nas eclusas o que, à primeira vista, mostra que o controle de tráfego está insuficiente.

Pensemos no seguinte: há uma demanda de carga entre pontos extremos e entre esses mesmos pontos localizam-se uma série de eclusas com espaçamentos diferentes



entre elas. Suponhamos, para simplificar, que não existe carga intermediária como a cana-de-açúcar.

Interessante observar que haverá uma velocidade “ideal” de comboios para o intervalo em distância entre duas eclusas para que o sistema da navegação opere de forma “otimizada”.

A ilustração 31 mostra as distâncias entre eclusas e entre a Eclusa de Bariri e o Terminal de Pederneiras.

Distâncias entre Pontos		km.
Terminal Pederneiras	E. Bariri	35
E. Bariri	E. Ibitinga	72
E. Ibitinga	E. Promissão	105
E. Promissão	E. Nova Avanhandava	49

Ilustração 31 – Distância entre pontos notáveis

O tempo de eclusagem conforme ilustração 32 é de aproximadamente 3,50 horas. Nominalmente o tempo de uma transposição completa com duas chatas é de uma hora. Como são três procedimentos completos avaliamos o tempo total, com alguma folga, em 3,50 horas.

Como as distâncias entre eclusas são diferentes e a velocidade de tráfego está vinculada às 3,50 horas de eclusagem, entendemos que o tempo de percurso e a velocidade do comboio sejam múltiplos de 3,50 horas.

Nessa linha de raciocínio, a extensão da navegação que caracterizará a velocidade máxima de hidrovia, entre eclusas, serão os 105 km que separam as eclusas de Ibitinga e Promissão. Esse trecho deverá comportar um número inteiro de comboios de 9.000 t alcançando as duas eclusas em intervalos de 3,50 horas.

Ou seja, a velocidade média de percurso será de 10 km/h com três comboios navegando simultaneamente nessa extensão de 105 km, intercalados num espaço de tempo de 3,5 horas.

A mesma velocidade será praticada nos estirões sem eclusas como Nova Avanhandava e São Simão.

Os mesmos três comboios navegando entre Bariri e Ibitinga deverá desenvolver uma velocidade média de 6,8 km/h e no segmento Promissão a Avanhandava de menos de 5,0 km/h.

Como o consumo de combustível é proporcional ao quadrado da velocidade conclui-se que o controle de tráfego será imprescindível para manter a hidrovia em operação econômica. De nada adiantará velocidades mais elevadas para os comboios se estarão destinados a formarem filas na eclusa seguinte.

A capacidade por sentido da hidrovia no nível de 75% em relação ao saturamento da demanda será aproximadamente 13 milhões de toneladas anuais. Para tanto assumimos operação de 24 horas ao dia, 320 dias operacionais e rendimento de 85% na disponibilidade das eclusas.

Sob tais circunstâncias os números conduzem a crer que a melhor velocidade dos comboios é de 10 km/h operando na potência máxima.

Para tanto, a hidrovia deverá dispor de um controle de tráfego tal que, próximo à sua saturação, próximo a 75% da demanda, não ocorram operações de enchimento ou esvaziamento em vazio. Para tanto será fundamental o compartilhamento de empurradores e embarcações de manobra.

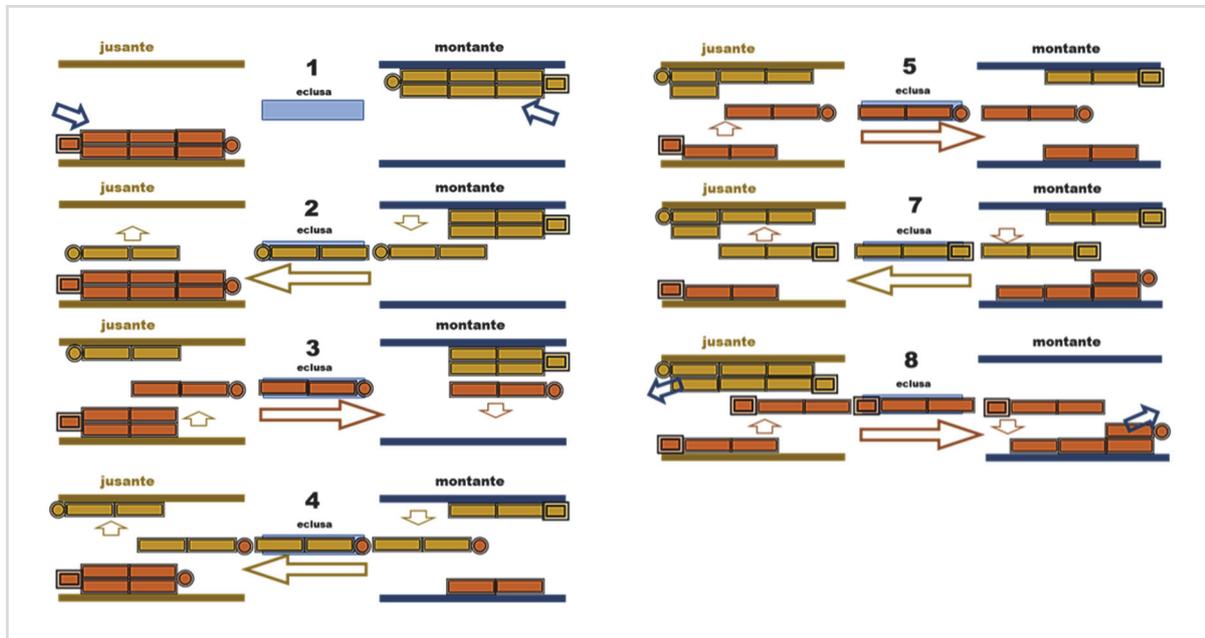


Ilustração 31 – Sequência Idealizada de Eclusagem.

11. Sugestão de Embarcação de Manobra de Proa

Com base nas informações precedentes sugerimos o seguinte layout para a Embarcação de Manobra de Proa – Ilustração 32.

No caso foi utilizado equipamento Thrustmaster como referência.

