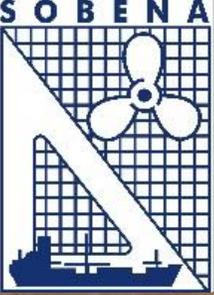


**Proposição de critérios para avaliação técnica de simuladores numéricos de manobras de combois fluviais**

**Maria Aparecida Padilha Gandara Mendes**  
**Carlos Daher Padovezi**

*Palestra apresentada no SEMINÁRIO INTERNACIONAL DE  
TRANSPORTE E DESENVOLVIMENTO HIDROVIÁRIO INTERIOR, 13.,  
2023, Belém. 11 slides*

A série "Comunicação Técnica" compreende trabalhos elaborados por técnicos do IPT, apresentados em eventos, publicados em revistas especializadas ou quando seu conteúdo apresentar relevância pública. REPRODUÇÃO PORIBIDA



# 13º Seminário Internacional de Transporte e Desenvolvimento Hidroviário Interior

Belém/PA, 30 de outubro a 1º de novembro de 2023



## Proposição de critérios para avaliação técnica de simuladores numéricos de manobras de comboios fluviais

*Maria Aparecida Padilha Gandara Mendes, Matemática, Mestre, IPT, [mgandara@ipt.br](mailto:mgandara@ipt.br)*

*Carlos Daher Padovezi, Engenheiro Naval, Doutor, IPT, [padovezi@ipt.br](mailto:padovezi@ipt.br)*

*(IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo)*



# SIMULAÇÕES NUMÉRICAS DE MANOBRAS

Simulações numéricas de manobras de comboios fluviais, tanto *fast time* como *real time*, têm se constituído como as principais ferramentas teóricas para avaliação das características de manobras e para verificação da segurança da navegação de determinado comboio em determinado trecho da via navegável

As simulações *fast time* apresentam a vantagem de permitir realizar estudos mais rápidos e mais completos, enquanto as simulações *real time* permitem ações diretas em atuadores, que simulam controles de um passadiço de empurrador, com vistas dinâmicas da via, de outras embarcações e margens. Pelas suas características de reprodução fiel de um passadiço, as simulações *real time* são imprescindíveis para o treinamento de pilotos.

A base de todas as simulações numéricas de manobras é o sistema de equações diferenciais de movimentos. O modelo bidimensional é adequado para o estudo de manobras de comboios fluviais, uma vez que as forças devidas à restauração hidrostática (heave, roll e pitch) são praticamente inexistentes quando comparadas com as forças em surge, sway e yaw.



# *SIMULAÇÕES NUMÉRICAS DE MANOBRAS*

**O que pode diferenciar os resultados dos vários modelos de simulações de manobras de comboios fluviais são os coeficientes hidrodinâmicos utilizados nas equações. As diferentes maneiras de determinação e escolha de tais coeficientes é que podem levar a resultados de simulações de manobras mais próximos ou mais distantes do que ocorre em escala real.**

**Medições de manobras em comboios fluviais em escala real e medições com modelos em escala reduzida em Tanque de Provas são as principais formas de obtenção, ou de referência para ajustes, dos coeficientes hidrodinâmicos das equações de manobras.**

# VALIDAÇÃO DE SIMULAÇÕES DE MANOBRAS DE COMBOIOS FLUVIAIS

Uma vez realizadas simulações de manobras de comboios fluviais, ocorre a grande questão: *o que pode garantir que os resultados das simulações representam, com uma certa precisão, o que ocorre nas manobras reais?*



**Obter dados de desempenho em manobras dos comboios em escala real que possam ser utilizados para ajustar os modelos de simulação.**

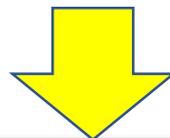
**Não há um grande número de provas realizadas de manobras com comboios fluviais de grande porte que gerem um banco de dados de comportamento em manobras que possa servir de referência para os modelos de simulações**



# CONCEPÇÃO DO MODELO DE AVALIAÇÃO DE SIMULADORES

Comboios fluviais apresentam estabilidade direcional adequada, ou seja, a cada ângulo de lemes, ou de propulsores azimutais, corresponde um único valor de taxa de guinada (velocidade angular). As curvas de velocidade angular  $\Psi$  em função do ângulo de leme  $\delta$  podem ser utilizadas para verificação da coerência dos resultados de simulações numéricas de manobras de comboios.

Os critérios de avaliação propostos são baseados na realização, nos simuladores numéricos, de testes de consistência de resultados de manobras-padrão e da curva de velocidade angular (ou taxa de guinada) versus ângulo de lemes ou ângulo de propulsores azimutais.



***A existência de pontos fora da curva poderá indicar alguma instabilidade no modelo de simulação***

# *PROCEDIMENTOS PROPOSTOS*

**A. Para simular as manobras-padrão deve ser modelada uma região da via navegável, em trecho reto, com largura e extensão suficientes para que não ocorram colisões com margens. A profundidade de toda essa região deverá ser uniforme, em valor entre três e cinco vezes o calado ou das barcaças ou do empurrador, o que for maior.**

Observação 1: As manobras deverão ser simuladas seguindo os procedimentos de testes propostos por ABS (2006) e IMO (2002).

Observação 2: A consistência das simulações das ações de forças externas, como resultantes de ventos e de velocidades de correntes, sobre o comportamento em manobras das embarcações, por terem equacionamento relativamente simples, pode ser verificada à parte.



# PROCEDIMENTOS PROPOSTOS

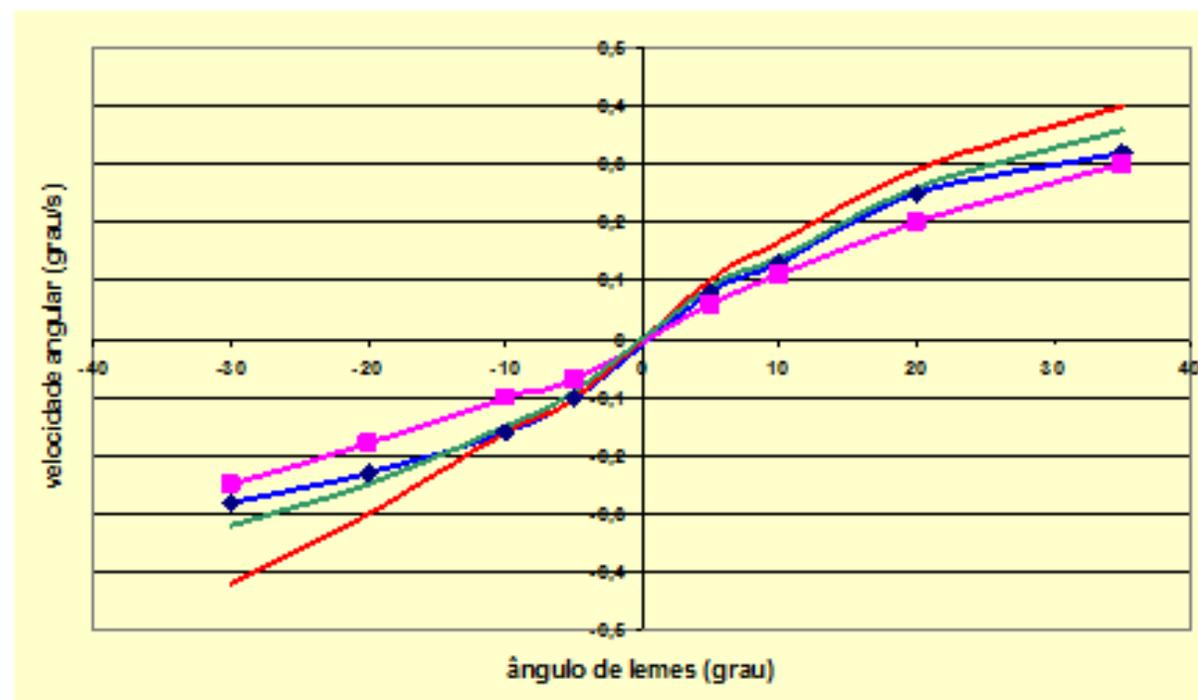
B. Na mesma condição operacional (calados, formação do conjunto de barcaças, empurrador) do comboio que está sendo simulada no modelo numérico (*fast time* ou *real time*), devem ser simuladas as seguintes manobras-padrão, sem influências de correnteza ou de ventos:

- I) **giro em dois ângulos** (de lemes ou de propulsores azimutais), para os dois bordos. Por exemplo, giro em 20 graus e giro em 30 graus;
- II) **zig-zag em dois ângulos, para os dois bordos**. Por exemplo, zig-zag em 10 graus e zig-zag em 20 graus;
- III) **espiral reversa**, variando-se os ângulos de lemes ou dos propulsores azimutais para obter os valores de velocidades angulares correspondentes. No teste de espiral reversa, a trajetória do comboio é controlada para obter-se uma velocidade angular constante. O ângulo médio do leme necessário para produzir essa velocidade angular é, então, medido;
- IV) **parada brusca com velocidade inicial igual à velocidade média de cruzeiro do comboio**. A obtenção da distância de parada brusca em simulação numérica tem grande importância para avaliação tanto das forças inerciais envolvidas no comboio, como da modelagem do sistema de propulsão do empurrador.



# PROCEDIMENTOS PROPOSTOS

- C. Realização da análise dos resultados de todas as manobras-padrão simuladas, verificando a consistência dos resultados e comparando-os com simulações realizadas de outros comboios e, se houver dados disponíveis, com resultados de ensaios em escala real.
- D. Com os dados obtidos nas simulações das manobras-padrão, a menos de paradas bruscas, devem ser obtidos pontos da curva de velocidades angulares em função dos ângulos de lemes (ou dos propulsores azimutais).



Exemplos de curvas de velocidade angular  $\Psi$  em função do ângulo de leme  $\delta$  (ou ângulo de propulsor azimutal) obtidas para comboios com 20 barcaças carregadas (formação 5x4) com diferentes sistemas de propulsão e de manobras (Fonte: IPT).

# CRITÉRIOS PROPOSTOS DE AVALIAÇÃO DOS SIMULADORES

- a) Devem ser comparados os resultados de simulações de paradas bruscas com aqueles obtidos nas formulações mostradas no Appendix 3 de IMO (2002) (“Stopping ability of very large ships”) e em PADOVEZI (2003). Grandes diferenças encontradas indicarão problemas nas simulações, ou das forças de propulsão, ou das inércias envolvidas (imprecisões nas estimativas de resistência do casco, por exemplo).
- b) Os pontos de velocidade angular versus ângulo de lemes (ou de propulsores azimutais), obtidos nas manobras de giro, de zig-zag e espiral reversa, devem resultar em uma curva relativamente suave, sem grandes distorções. Pontos muito fora da curva devem indicar a existência de problemas no modelo matemático das simulações numéricas, como, por exemplo, algum valor de coeficiente hidrodinâmico definido de forma incorreta.
- c) Os resultados das manobras de giro, de zig-zag e de espiral reversa devem ser analisados conforme IMO (2002) e comparados com outros resultados de manobras existentes, preferencialmente resultados de ensaios em escala real. Disparidades muito grandes com os resultados de referências devem indicar algum problema no modelo numérico de simulação.



# CONSIDERAÇÕES GERAIS

Os procedimentos e critérios propostos foram elaborados com o propósito de disponibilizar ferramentas simples para verificar a consistência dos resultados das simulações de manobras, tanto tipo “fast time” como “real time”, de comboios fluviais de grande porte.

O que foi proposto neste trabalho ressalta, de uma forma organizada, a necessidade de sempre verificar a consistência dos resultados de simulações de manobras de comboios. As referências para comparações, embora escassas, existem em algumas bibliografias e, principalmente, em medições de comportamentos em manobras de comboios em escala real.



# Obrigado!

- Carlos Daher Padovezi
- padovezi@ipt.br

 [linkedin.com/school/iptsp/](https://www.linkedin.com/school/iptsp/)

 [instagram.com/ipt\\_oficial/](https://www.instagram.com/ipt_oficial/)

 [youtube.com/@IPTbr/](https://www.youtube.com/@IPTbr/)

[www.ipt.br](http://www.ipt.br)

 **ipt**  
INSTITUTO DE  
PESQUISAS  
TECNOLÓGICAS

 **SÃO  
PAULO**  
GOVERNO  
DO ESTADO