

ANÁLISE DO COEFICIENTE DE ARRASTO DOS COMBOIOS NO TRANSPORTE FLUVIAL: ESTUDO DE CASO NO RIO TIETÊ

AMORIM, A. E. A.

*Fatec Jahu - Coordenadoria de Construção Naval e Sistemas Navais
aea.amorim@fatec.sp.gov.br*

Analysis of the Drag Coefficient of Convoys in River Transport: case study on the Tietê River

Eixo Tecnológico: Produção Industrial.

Resumo

Considerando a crescente preocupação com as emissões de gases de efeito estufa e seu impacto ambiental pelos modais de transporte de cargas, o transporte pela hidrovia Tietê é a mais adequada, pelo seu baixo índice de emissão de gases. A Organização Marítima Internacional tem adotado uma série de medidas para reduzir essas emissões no transporte marítimo. O artigo aborda a importância do monitoramento da eficiência energética das embarcações para melhorar a eficiência operacional das embarcações. Estudos matemáticos e simulações são utilizados para avaliar a eficiência energética das embarcações em diferentes condições de operação, considerando fatores como a velocidade e o ambiente de navegação. Aqui se aborda uma breve discussão sobre os valores dos coeficientes de arrasto em uma modelagem simples, na qual se considera apenas a potência declarada dos motores dos empurradores, os tempos de subida e descida dos comboios e as cargas transportadas. Os resultados têm mostrado que os valores do coeficiente de arrasto apresentam um desvio em torno da forma da expressão esperada, mostrando que há outros efeitos presentes, tais como a navegação em águas restritas, o que sugere que mais estudos devam ser realizados analisando este tipo de comportamento nos comboios.

Palavras-chave: *Gases de efeito estufa, navegação interior, poluição, transporte, meio-Ambiente.*

Abstract

Considering the growing concern about greenhouse gas emissions and their environmental impact due to cargo transport modes, transport via the Tietê waterway is the most appropriate, due to its low gas emission rate. The International Maritime Organization has adopted a series of measures to reduce these emissions in maritime transport. The article addresses the importance of monitoring the energy efficiency of vessels to improve the operational efficiency of vessels. Mathematical studies and simulations are used to evaluate the energy efficiency of vessels in different operating conditions, considering factors such as speed and the navigation environment. Here we present a brief discussion on the values of drag coefficients in a simple model, in which only the declared power of the pusher engines, the ascent and descent times of the convoys and the loads transported are considered. The results have shown that the drag coefficient values present a deviation around the expected expression form, showing that there are other effects present, such as navigation in restricted waters, which suggests that more studies should be carried out analyzing this type of drag.

Keywords: *Greenhouse gases, inland navigation, pollution, transport, environment.*

1. Introdução

O rio Tietê é uma rota importante de navegação, pois são transportados diversos produtos agrícolas, tais como soja, milho e produtos fertilizantes [1-3] Neste sentido, é importante que as embarcações que transportam carga sejam eficientes em termos de energia para minimizar seu impacto ambiental. Diversos estudos foram realizados verificando a qualidade da água do rio Tietê [4-8].

A Organização Marítima Internacional (IMO) é uma agência especializada das Nações Unidas responsável pela segurança da navegação e pela proteção do meio ambiente marinho.

Anais da VII Mostra de Docentes em RJI

A instituição tem adotado uma série de medidas para reduzir as emissões de gases de efeito estufa (GEE) de embarcações que já navegam [9]. O gás de efeito estufa (GEE) é um dos principais contribuintes para o aquecimento global.

O principal gás de efeito estufa emitido pelo transporte naval é o dióxido de carbono (CO₂), seguido pelo metano (CH₄) e pelo óxido nitroso (N₂O), decorrentes da queima de combustíveis fósseis, como o óleo diesel e o óleo combustível. Em recente levantamento, prevê-se que as emissões podem aumentar em torno de 90% a 130% das emissões já mensuradas em de 2008 até 2050, desde que ações sejam realizadas para mudar o panorama atual. Tais dados são corroborados por outras análises [10].

Além do monitoramento das emissões, a IMO tem exigido que todas as novas embarcações sejam construídas com um nível de eficiência energética mais alto [11, 12]. As embarcações existentes devem ser modernizadas para melhorar sua eficiência energética. Uma outra linha de ação que envolve os fornecedores da cadeia construtiva envolve o desenvolvimento de novas tecnologias que reduzam as emissões de GEE de embarcações.

Para monitorar a eficiência energética das embarcações, a IMO criou alguns índices que mensuram esta eficiência e o seu uso ajuda a melhorar a eficiência operacional das embarcações, permitindo melhorar o planejamento de rotas, reduzir a velocidade de navegação, desenvolver novas práticas nas manobras etc. Para embarcações que estão em operação, a IMO definiu o índice de eficiência energética operacional (EEOI).

Diversos estudos têm sido realizados focando na emissão do consumo de combustível, fazendo a modelagem matemática da embarcação. Um dos trabalhos utiliza o método de simulação de Monte Carlo para simular a eficiência energética do navio com base em vários fatores, incluindo carregamento de carga, velocidade do navio e o impacto aleatório de múltiplos parâmetros ambientais naturais.

Os resultados simulados são então comparados com os dados de consumo de combustível medidos para verificar a precisão do modelo, mostrando que o modelo desenvolvido fornece precisão suficiente para simular a eficiência energética do navio [13].

Para as embarcações que estão em operação, a eficiência energética está atrelada à redução do consumo de combustível e isto envolve a aplicação de medidas operacionais em vez da troca da tecnologia devido ao tempo de retorno do investimento feito. No caso da navegação interior, a eficiência energética da embarcação depende se a embarcação se movimenta a jusante ou a montante, da curvatura do rio e eclusagens [14].

Os autores discutem os métodos de avaliação da eficiência energética operacional dos navios, incluindo a estimativa das emissões de GEE e de poluentes nos gases de escape, estabelecendo fatores de emissão baseados em combustível para cada um dos componentes relevantes dos gases de escape e um inventário de consumo de combustível. A modelagem é aplicada a um tipo de embarcação sendo que os dados teóricos são comparados com os resultados experimentais.

Os resultados mostram que há uma dependência da EEOI em termos da rotação do motor, aumentando linearmente na faixa de 400 rpm a 700 rpm. A redução da velocidade do motor, por sua vez pode aumentar o tempo de viagem, aumentando o custo da viagem. Além disto, a embarcação pode sofrer um arrasto maior, uma vez que o fluxo de água pode se tornar laminar.

Por fim, os autores concluem inicialmente que o ambiente de navegação afeta de forma significativa o EEOI na navegação interior. Os valores são maiores que os encontrados para a navegação marítima, sendo bastante sensível ao ambiente de navegação.

Anais da VII Mostra de Docentes em RJI

O transporte de carga pela hidrovia do rio Tietê apresenta algumas vantagens em relação a outros modais, como o rodoviário e o ferroviário, tais como:

- Menor custo operacional, pois um comboio fluvial pode transportar até 9 mil toneladas, o equivalente a 250 caminhões ou 70 vagões ferroviários.
- Maior segurança, pois reduz o risco de acidentes, congestionamentos e roubos de carga nas estradas.
- Menor impacto ambiental, pois emite menos poluentes e consome menos combustível por tonelada transportada.
- Maior integração regional, pois favorece o desenvolvimento econômico e social dos municípios ribeirinhos e estimula o turismo e a cultura local [15].

O transporte de carga pela hidrovia do rio Tietê é realizado por meio de terminais portuários, que são estruturas destinadas ao embarque e desembarque de mercadorias e passageiros. Existem 12 terminais portuários na hidrovia Tietê-Paraná, sendo 7 no rio Tietê: Pederneiras, Jaú, Barra Bonita, Igarapu do Tietê, Pederneiras II, Anhembi e Conchas[16].

A composição dos comboios que operam na hidrovia Tietê-Paraná é de 1 empurrador e quatro chatas ou barcaças. Cada barcaça tem 59,44 m de comprimento e 10,67 m de boca. Quando vazias, o calado destas barcaças é de 2,29 m.

Como o comboio navega em uma composição 2 x 2, portanto pode-se desconsiderar as dimensões do empurrador e considerar para análises matemáticas que o comboio tem 118,88 m de comprimento e 21,34 m de boca [17].

Em estudos sobre o comportamento hidrodinâmico de embarcações se utiliza o coeficiente de arrasto, cujo valor pode ser estimado da força de arrasto

$$F = 0,5C_D\rho Av^2, \quad (1)$$

na qual ρ é a densidade da água ($\rho = 1000 \frac{kg}{m^3}$), A é a área molhada da embarcação e v é a sua velocidade. Usualmente, a área molhada deste comboio é estimada como sendo

$$A = 2bd + 2Ld + bL, \quad (2)$$

em que L é o comprimento do comboio, B é a boca e d é o calado. Uma forma de estimar o valor do coeficiente de arrasto é por meio da sua velocidade terminal,

$$C = \frac{P}{0,5C_D\rho Av^3}, \quad (3)$$

na qual P é a potência de propulsão dos motores. Uma vez que a potência dos motores é um valor fixo, assim como a velocidade, pode-se inicialmente pensar que o valor do coeficiente de arrasto é proporcional a v^{-3} atrelada ao tipo de empurrador.

Contudo, a análise matemática é mais complexa. Quando um navio avança em uma via navegável confinada, como um rio, um canal ou um estuário, ele enfrenta um aumento na resistência ao avanço e experimenta diversos fenômenos na hidrovia, pois ocorre um rebaixamento do nível da água, aliado à geração de uma corrente de retorno ao redor do casco do navio.

As ondas geradas em seu rastro interagem com a corrente do curso d'água e refletem nas margens do rio, causando erosão e problemas de transporte de sedimentos. As propriedades específicas das esteiras de águas confinadas não são completamente entendidas. Investigações experimentais ainda são necessárias para compreender a geração e a propagação das ondas e do fluxo com relação aos parâmetros funcionais e geométricos do navio e da hidrovia.

A proposta deste texto é averiguar se tal afirmação é verdadeira. Uma empresa que opera na hidrovia forneceu os dados das viagens de seus sete comboios, que constam o tempo de viagem

Anais da VII Mostra de Docentes em RJI

de subida e descida do rio, a carga transportada, dentre outras informações. O objetivo geral é verificar o valor do coeficiente de arrasto para cada um dos comboios.

O índice de eficiência energética operacional (EEOI) de uma embarcação é uma medida da eficiência com que ela utiliza a energia. Um EEOI mais baixo indica uma embarcação mais eficiente.

2. Materiais e métodos

2.1. Materiais

A empresa forneceu os dados das viagens dos comboios na forma de planilha. Para a análise do problema foram utilizados o Excel e o Smath Studio para efetuar a análise dos dados e os gráficos. Para a estimativa da distância entre os terminais de Pederneiras e São Simão, foi usado o *Google Earth*® e os dados do DH.

2.2. Metodologia

Inicialmente foi obtido no site do DH a distância navegada entre Pederneiras e São Simão. Por meio do aplicativo *Google Earth*®, foi desenhado um possível trajeto percorrido pelos comboios.

Na sequência, com base nos dados fornecidos pela empresa do tempo de viagem do comboio para subir e descer o rio, foi calculada a velocidade média, para cada comboio.

Com base nestes valores, foi calculado o valor do coeficiente de arrasto. Tais valores são lançados em um gráfico coeficiente de arrasto x velocidade. Uma linha de tendência é inserida para cada comboio.

Por questões contratuais com a empresa, os dados dos comboios serão denotados por letras.

3. Resultados e Discussão

Com base nos dados fornecidos da carga transportada pelos comboios e pelas dimensões da barcaça, tem-se que o calado mínimo foi 2,07 m e o máximo foi 2,60 m.

As figuras 1 e 2 mostram os resultados extraídos do coeficiente de arrasto para cada comboio. Na abscissa está a velocidade e na ordenada o coeficiente de arrasto de cada comboio. Nestes dados não foram excluídos os tempos de eclusagem ou de outras interferências que possam ter afetado a viagem.

Por meio da linha de tendência, observa-se uma discrepância na forma da função do coeficiente de arrasto de cada comboio, que esperado ser 3. Tais resultados podem decorrer de que as embarcações naveguem em alguns trechos de água restrita e que acaba interferindo no desempenho hidrodinâmico da embarcação.

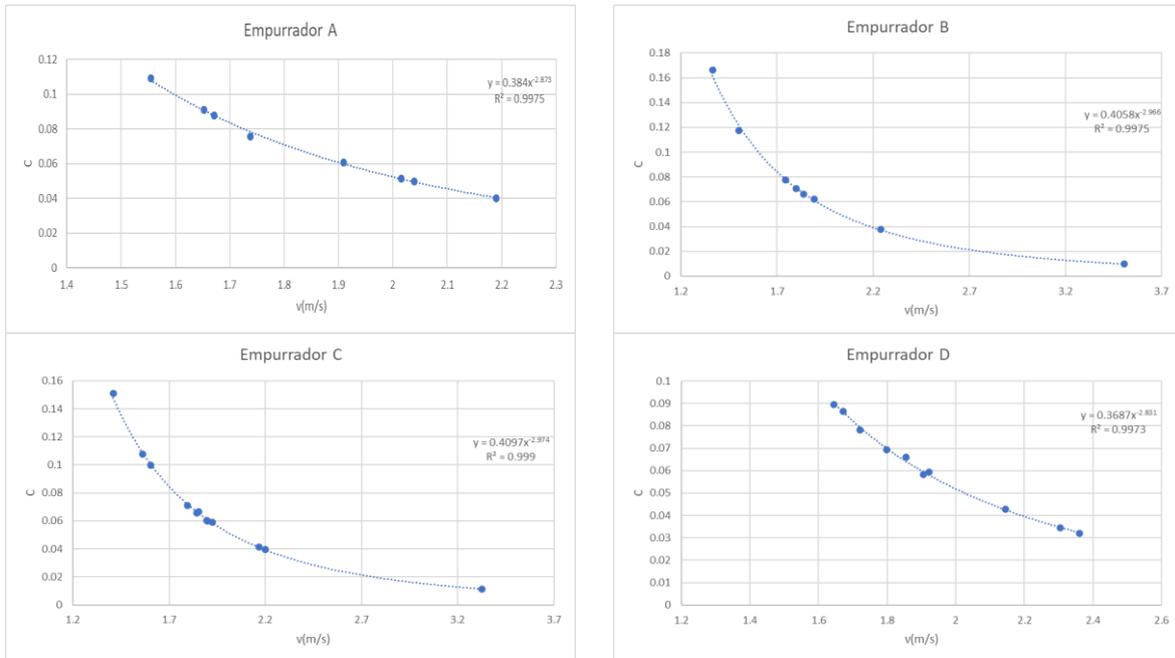
De fato, ao navegar nestes trechos, os parâmetros hidrodinâmicos tais como massa adicional e a própria resistência ao avanço se modificam, um vez que o fluxo de água no entorno da embarcação se torna diferente [18].

Para cada comboio se observa uma função específica. Ensaio realizado no sistema de motorização do empurrador mostraram que há um desalinhamento severo na conexão tubo telescópico à caixa de redução, o que gera perda de potência. Desta forma, cada empurrador tem uma característica única, cujas informações aparecem nestas análises.

Anais da VII Mostra de Docentes em RJJ

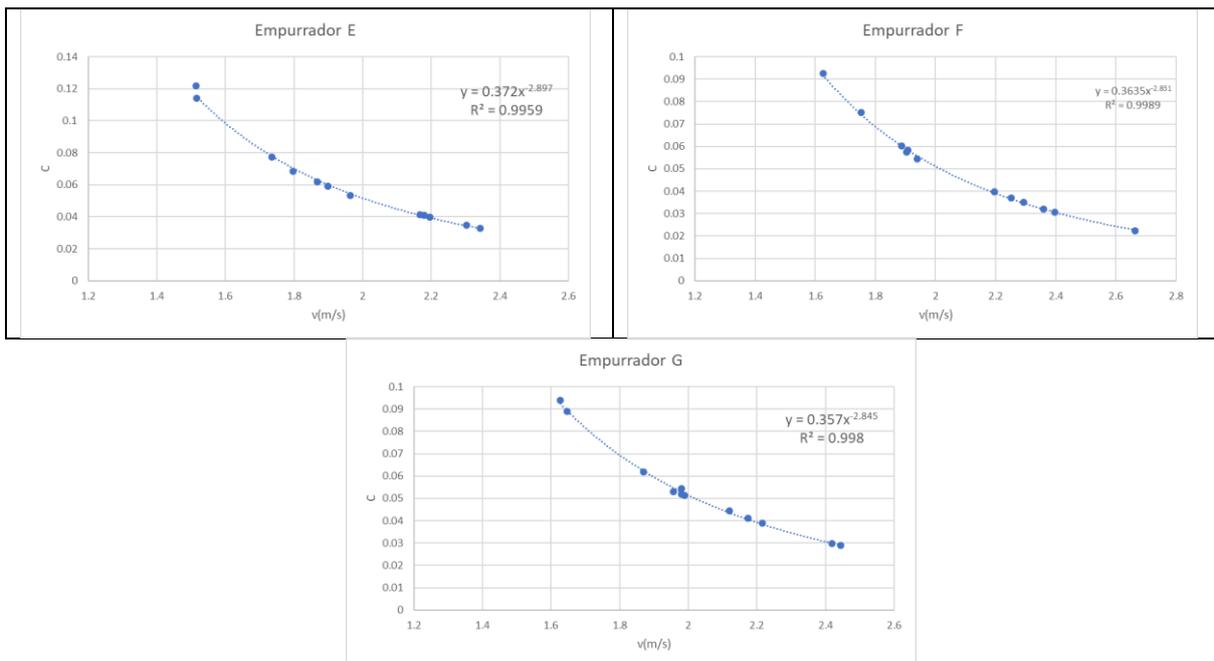
Tais informações são úteis e podem permitir futuros ajustes, melhorando a eficiência energética do comboio.

Fig. 1 – Relação dos coeficientes de arrasto em termos da velocidade para os comboios A a D. A linha pontilhada representa a linha de tendência polinomial.



Fonte: Elaboração própria.

Fig. 2 – Relação dos coeficientes de arrasto em termos da velocidade para os comboios E a G. A linha pontilhada representa a linha de tendência polinomial.



Fonte: Elaboração própria.

Anais da VII Mostra de Docentes em RJI

Os parâmetros atrelados à inércia, à sustentação da embarcação e as forças de fluxo cruzado são afetados pela forma como a água flui ao redor da embarcação. Tais fatos são corroborados por diversos estudos [19–26].

Os valores do número de Froude para os comboios são bem baixos, em torno de 0,06 o que implica que as forças de inércia da água são muito menores em comparação com as forças gravitacionais. Nesse regime, a principal forma de resistência enfrentada pela embarcação é o arrasto viscoso.

Observa-se nestes casos que os comboios B e C apresentam um coeficiente de arrasto maior que os demais e isto se deve ao desalinhamento dos motores com o tubo telescópico.

4. Considerações finais

Com base nos resultados deste estudo, observou-se que houve um desvio da expressão esperada, mostrando que há outros efeitos presentes e que sugerem um estudo mais aprofundado. Diversos autores apontam outros efeitos e que sugerem a análise de que os comboios estejam navegando em águas restritas, o que faz com que o fluxo em torno do comboio tenha um comportamento diferente alterando os parâmetros hidrodinâmicos.

Desta forma, o estudo ressalta a complexidade das interações entre as embarcações e as características específicas da hidrovia, que podem incluir o rebaixamento do nível da água e a geração de correntes de retorno. Esses fenômenos podem afetar de maneira não linear o coeficiente de arrasto, afetando a eficiência energética operacional (EEOI) das embarcações.

Com base nestes resultados, a modelagem matemática está incluindo um termo de desalinhamento para verificar os seus efeitos no comportamento hidrodinâmico.

Referências

1. Rodrigues Freire PR, Baptista de Rezende L (2022) ASPECTOS ECONÔMICOS DA HIDROVIA TIETÊ-PARANÁ. In: SOBENA (ed) 29th International Congress on Waterborne Transportation, Shipbuilding and Offshore Constructions. Galoa, Rio de Janeiro, RJ, pp 1–7
2. Rodrigues Freire PR (2021) ASPECTOS GEOECONÔMICOS DA HIDROVIA TIETE-PARANÁ - SETOR PAULISTA. In: Anais do 12º Seminário Internacional de Transporte e Desenvolvimento Hidroviário Interior. Galoa, pp 1–8
3. CONAB-Brazilian National Food Supply Agency [Companhia Nacional do Abastecimento] (2022) Acompanhamento da Safra Brasileira. Bol da Safra 2021 9:60
4. Galo M, Carvalho F, Martins D, et al (2005) Assessment of Aquatic Plants in the Reservoirs of AES-Tietê and Development of an Integrated Control Model for the Most Important Species. J Environ Sci Heal Part B Pestic Food Contam Agric Wastes 40:85–100. <https://doi.org/10.1081/PFC-200034242>
5. Rezende L de, Kaiser IM, Peixoto ASP (2018) VULNERABILIDADE AMBIENTAL DAS MARGENS DO RIO TIETÊ. Rev Gestão Sustentabilidade Ambient 7:136–166
6. Carvalho FT, Velini ED, Martins D (2005) Plantas aquáticas e nível de infestação das espécies presentes no reservatório de Bariri, no Rio Tietê. Planta Daninha 23:371–374. <https://doi.org/10.1590/s0100-83582005000200027>
7. Carvalho FT, Velini ED, Cavenaghi AL, et al (2005) Influência da turbidez da água do rio Tietê na ocorrência de plantas aquáticas. Planta daninha 23:359–362. <https://doi.org/10.1590/S0100-83582005000200025>

Anais da VII Mostra de Docentes em RJI

8. Toloi RC, Freitas Junior M, Reis JGM dos, et al (2016) Droughts in the Tietê-Paraná Waterway: Impacts on the Direct, Indirect and Hidden Costs in the Transportation of Soybean. *Indep J Manag Prod* 7:431–444. <https://doi.org/10.14807/ijmp.v7i2.418>
9. IMO (2020) Fourth Greenhouse Gas Study 2020. <https://www.imo.org/en/OurWork/Environment/Pages/Fourth-IMO-Greenhouse-Gas-Study-2020.aspx>. Accessed 5 Sep 2023
10. Barrie L, Braathen G (2021) WMO GREENHOUSE GAS BULLETIN The State of Greenhouse Gases in the Atmosphere Based on Global Observations through 2020. Geneva, Suíça
11. (2015) International Convention for the Prevention of Pollution from Ships (MARPOL 73/78) PRACTICAL GUIDE
12. IMO (2009) GUIDELINES FOR VOLUNTARY USE OF THE SHIP ENERGY EFFICIENCY OPERATIONAL INDICATOR (EEOI). GBR
13. Fan A, Yan X, Bucknall R, et al (2020) A novel ship energy efficiency model considering random environmental parameters. *J Mar Eng Technol* 19:215–228. <https://doi.org/10.1080/20464177.2018.1546644>
14. Sun X, Yan X, Wu B, Song X (2013) Analysis of the operational energy efficiency for inland river ships. *Transp Res Part D Transp Environ* 22:34–39. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2013.03.002>
15. DNIT (2021) Hidrovia do Paraná-Tietê — Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. In: Hidrovia do Paraná-Tietê. <https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/aquaviario/intervencao-em-hidroviarias/hidroviarias-1/hidrovia-do-tiete-parana>. Accessed 11 Sep 2023
16. DH Departamento Hidroviário de São Paulo. In: Terminais. <http://www.dh.sp.gov.br/terminais/>. Accessed 11 Sep 2023
17. DH Departamento Hidroviário de São Paulo. In: Plano Dir. da Hidrovia Tietê-Paraná. <http://www.dh.sp.gov.br/downloads/>. Accessed 11 Sep 2023
18. Koh KK, Yasukawa H (2012) Comparison study of a pusher–barge system in shallow water, medium shallow water and deep water conditions. *Ocean Eng* 46:9–17. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2012.03.002>
19. King KK, Yasukawa H, Hirata N (2008) Shallow Water Effect on Turning Motion of a Pusher-Barge System. In: 4th Asia-Pacific Workshop on Marine Hydrodynamics. pp 1–4
20. Koh KK, Yasukawa H, Hirata N (2008) Hydrodynamic derivatives investigation of unconventionally arranged pusher-barge systems. *J Mar Sci Technol* 13:256–268. <https://doi.org/10.1007/s00773-008-0004-7>
21. Adi Maimun, Meftah AS, Muhammad AH (2005) MANOEUVRING OF PUSHER-BARGE IN DEEP AND SHALLOW WATER. In: 10th, Seminar of JSPS Marine Transportation Engineering. Hiroshima, Japan, p 28
22. Danilo L (2014) Modelling of Close Proximity Manoeuvres in Shallow Water Channels. Instituto Técnico de Lisboa
23. Eloot K, Vantorre M, Division MT (2013) Ship behaviour in Shallow and Confined Water : an Overview of Hydrodynamic Effects through EFD
24. Milanov E, Chotukova V, Efremov D (2014) Simulation Model of Danube Pusher Manoeuvrability in

Anais da VII Mostra de Docentes em RJI

- Deep and Shallow Waterways. In: European Inland Waterway Navigation Conference. Budapest, Hungary
25. Zentari L, el Moctar O, Lassen J, et al (2022) Experimental and numerical investigation of shallow water effects on resistance and propulsion of coupled pusher-barge convoys. Appl Ocean Res 121:103048. <https://doi.org/10.1016/j.apor.2022.103048>
26. Brard R (1951) Maneuvering of Ships In Deep Water , in Shallow Water , and in Canals. Summer Meet Soc Nav Archit Mar Eng 229–257