Fatecnológica
Fatec Jahu

IV CONGRESSO DE TECNOLOGIA FATEC JAHU 10 a 13/11

ISSN 2763-5600

Edição Especial do IV Congresso de Tecnologia da Fatec Jahu

ANÁLISE EXPERIMENTAL DA RESISTÊNCIA HIDRODINÂMICA DE UMA BARCAÇA EM MODELO REDUZIDO DURANTE A DESACELERAÇÃO LIVRE

EXPERIMENTAL ANALYSIS OF THE HYDRODYNAMIC RESISTANCE OF A SCALE-MODEL BARGE DURING FREE DECELERATION

Jurgen Didjurgeit
Fatec Jahu – CST em Construção Naval, jurgen.didjurgeit@aluno.cps.sp.gov.br

Nelson Renato Bueno dos Santos
Fatec Jahu – CST em Sistemas Navais, nelson.santos3@aluno.cps.sp.gov.br

Piettro Marques da Silva
Fatec Jahu – CST em Sistemas Navais, piettro.silva@aluno.cps.sp.gov.br

Antonio Eduardo Assis Amorim

Fatec Jahu , antonio.amorim@cps.sp.gov.br

DOI: https://doi.org/10.54628/issn2763-5600.v20.1.2026.400

Resumo

A resistência hidrodinâmica influencia a desaceleração de embarcações fluviais e a segurança da navegação. Este estudo determinou coeficientes de resistência de uma barcaça em escala 1:50 e comparou modelos lineares, quadráticos e mistos durante a desaceleração livre. Em tanque de provas, o modelo foi rebocado e liberado, com movimento registrado por câmera de alta velocidade e trajetórias extraídas pelo Tracker. Os parâmetros foram estimados por mínimos quadrados não lineares, considerando massa adicional longitudinal teórica, e avaliados por RMSE, R^2, AIC, BIC e Durbin–Watson. Nos nove ensaios com a barcaça vazia, todos os modelos apresentaram R^2 superiores a 0,999. Entre oito conjuntos distintos, o modelo linear obteve menores erros em seis e o quadrático em dois; o misto melhorou alguns ajustes. Entretanto, a variabilidade dos coeficientes e a autocorrelação dos resíduos indicam limitações das formulações e necessidade de aprofundar a caracterização dos mecanismos resistivos para representar adequadamente a dinâmica da embarcação.

Palavras-chave: Dinâmica Naval. Identificação Paramétrica. Tanque de Provas. Modelagem Matemática. Análise de Resíduos.

Abstract

Hydrodynamic resistance influences the deceleration of inland vessels and navigation safety. This study determined the resistance coefficients of a 1:50 scale-model barge and compared linear, quadratic, and combined resistance models during free deceleration. In towing tank experiments, the model was towed and released, with its motion recorded using a high-speed camera and trajectories extracted using Tracker software. The parameters were estimated through nonlinear least-squares fitting, considering a theoretical estimate of longitudinal added mass, and evaluated using RMSE, R^2, AIC, BIC, and the Durbin–Watson statistic. In nine tests with the unloaded barge, all models achieved R^2 values exceeding 0.999. Among eight distinct datasets, the linear model yielded lower errors in six, while the quadratic

ISSN 2763-5600
Edição Especial do IV Congresso de Tecnologia da Fatec Jahu

model performed better in two; the combined model improved selected fits. However, coefficient variability and residual autocorrelation revealed limitations in the formulations, indicating the need for further investigation of hydrodynamic resistance mechanisms to adequately represent the vessel's dynamics.

Keywords: Naval Dynamics. Parameter Identification. Towing Tank. Mathematical Modeling. Residual Analysis.

1. INTRODUÇÃO

A navegação interior é estratégica para o transporte brasileiro, especialmente em comboios de empurradores e chatas que operam em trechos restritos, como eclusas e terminais. Nesse contexto, a parada por inércia, decorrente da resistência hidrodinâmica, permite avaliar a resistência ao avanço por modelos lineares, quadráticos e mistos.

Estudos anteriores abordaram manobras de parada e o comportamento de comboios em águas profundas e rasas (King et al., 2008; Koh; Yasukawa; Hirata, 2008; Maimun et al., 2013; Sano et al., 2018; Wirz, 2012; Žerzal, 1998). Entretanto, são escassos os estudos experimentais em tanque de provas que comparam esses modelos para chatas fluviais de fundo plano, especialmente no Brasil.

Assim, este trabalho busca determinar os coeficientes de resistência hidrodinâmica de uma chata durante a parada por inércia e identificar o modelo que melhor representa sua dinâmica longitudinal. Para isso, serão realizados ensaios com um modelo em escala 1:50 no tanque de provas do Estaleiro Escola da Fatec Jahu, comparando as formulações linear, quadrática e mista por meio dos indicadores RMSE, R^2, AIC, BIC e Durbin–Watson.

Para a estimativa da massa adicional da embarcação, aproxima-se a forma da embarcação como a de um elipsoide prolato. Para um elipsoide prolato que se desloca ao longo do eixo maior, a massa adicional longitudinal é

$$m_x = C_A \rho \nabla, \tag{1}$$

na qual, ∇ é o volume deslocado da embarcação,

$$C_A = \frac{\alpha_0}{2 - \alpha_0}. \tag{2}$$

com

$$\alpha_0 = \frac{1 - e^2}{e^3}\left[\ln\left(\frac{1+e}{1-e}\right) - 2e\right]. \tag{3}$$

A excentricidade é definida

ISSN 2763-5600
Edição Especial do IV Congresso de Tecnologia da Fatec Jahu

$$e = \sqrt{1 - \frac{r^2}{a^2}}, \quad (4)$$

com

$$a = \frac{L_{WL}}{2}, \quad (5)$$

e

$$r = \sqrt{\frac{3\nabla}{4\pi a}}. \quad (6)$$

A razão de bloqueio devido às limitações do tanque de provas ao ensaio no modelo reduzido é estimada por

$$\beta = \frac{BT}{W□}, \quad (7)$$

na qual *B* é a largura e T é o calado do modelo reduzido, W é a largura e h a profundidade do tanque de provas.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Os ensaios foram realizados no tanque de provas do Estaleiro Escola da Fatec Jahu, utilizando um modelo reduzido de chata fluvial na escala 1:50. A embarcação foi inicialmente rebocada pelo carro do tanque e posteriormente liberada, passando a desacelerar exclusivamente sob a ação da resistência hidrodinâmica, em condições de água inicialmente em repouso. O movimento foi registrado por uma câmera de alta velocidade ELP, modelo USBGS800P03-MF12, com resolução de 1 megapixel, utilizando um programa desenvolvido em Python para aquisição das imagens e controle da taxa de quadros por segundo (fps). Foram realizados nove ensaios com a chata vazia, sob diferentes velocidades iniciais, além de ensaios na condição carregada, mediante a adição de 8,72 kg.

Os dados de posição e tempo foram extraídos das imagens pelo software Tracker, adotando uma marca na proa como referência. As trajetórias experimentais foram utilizadas para determinar, por mínimos quadrados não lineares, os coeficientes dos modelos de resistência hidrodinâmica linear, quadrática e mista, cuja qualidade foi avaliada por indicadores estatísticos. A densidade da água foi determinada com balança e proveta. O comprimento na

ISSN 2763-5600
Edição Especial do IV Congresso de Tecnologia da Fatec Jahu

linha d'água (L_{WL}) e o calado (T) foram medidos para calcular o coeficiente de bloco (C_B). A massa adicional longitudinal foi estimada teoricamente, aproximando a geometria submersa da embarcação por um elipsoide prolato, e incorporada às equações do movimento.

3. Resultados e Discussão

O modelo reduzido da chata fluvial, construído na escala 1:50 com placas de plástico, é apresentado na Figura 1. A embarcação possui comprimento total de 1,17 m, boca de 0,225 m e altura do costado de 0,085 m. A massa utilizada nos cálculos foi de 2,24 kg.

Figura 1. Modelo reduzido da chata



Fonte: elaborado pelos autores (2026)

A coleta de água do tanque de provas forneceu a densidade da água igual a $\rho = 1 g/cm^3$. Ao colocar a chata vazia na água, obteve-se $L_{WL} = 1{,}08\, m$ e calado $T = 1\ cm$. Com estes valores, obteve-se $C_B = 0{,}93$, como mostrado na Tabela 1.

Tabela 1. Parâmetros geométricos, hidrostáticos e de massa adicional da chata vazia

Parâmetro	**Chata vazia**
Comprimento total (LOA)	1,17 m
Comprimento na linha d'água	1,08 m
Boca (B)	0,225 m
Calado (T)	0,010 m
Massa (m)	2,24 kg
Coeficiente de bloco	0,9300
Volume deslocado	0,00224 m³
Semieixo longitudinal (a)	0,5400 m
Raio equivalente (r)	0,03161 m
Excentricidade (e)	0,99829
Coeficiente de massa adicional	0,008798
Massa adicional longitudinal	0,01988 kg

Fonte: elaborado pelos autores (2026)

ISSN 2763-5600
Edição Especial do IV Congresso de Tecnologia da Fatec Jahu

Como a profundidade do tanque de provas é H=1,2 m, a razão H/T é maior que 26,67, o que significa que efeitos significativos associados à proximidade do fundo do tanque podem ser desconsiderados. A Tabela 2 mostra o resultado dos ensaios realizados com a chata vazia, considerando o termo linear.

Os nove ensaios de desaceleração livre da barcaça vazia apresentaram elevada concordância com o modelo de resistência linear ($F_R = -bv$), com (R^2) entre 0,999016 e 0,999942 e RMSE de 4,310 a 29,946 mm. Entretanto, os coeficientes (b) variaram de 0,23125 a 1,33022 kg/s, apresentando forte correlação positiva com o número de Reynolds inicial ($r \approx 0{,}982$), o que sugere a influência de efeitos hidrodinâmicos dependentes da velocidade. Os valores de Durbin–Watson, entre 0,0011 e 0,2464, indicaram forte autocorrelação positiva dos resíduos e possíveis efeitos não representados pelo modelo. Assim, apesar da elevada qualidade global dos ajustes, a dispersão dos coeficientes e os padrões residuais justificam a investigação de modelos quadráticos e mistos, utilizando RMSE, AIC e BIC para comparar seu desempenho.

Tabela 2. Dados do parâmetro b, Re e indicadores

Ensaio	b(kg/s)	Re_0	Re_f	RMSE (mm)	R^2	AIC	BIC	Durbin–Watson
1	1,33022	2,817×10⁶	7,160×10⁵	29,946	0,999016	−3460,26	−3447,65	0,0035
2	0,26612	7,194× 10⁵	2,526×10⁵	11,390	0,999886	−9633,23	−9618,29	0,0091
3	0,23125	2,762×10⁵	7,767×10⁴	12,143	0,999453	−13244,59	−13228,65	0,0011
4	0,39136	6,695×10⁵	3,408×10⁵	5,253	0,999895	−4959,60	−4947,12	0,0537
5	0,64213	1,234× 10⁶	7,210×10⁵	6,754	0,999810	−2292,88	−2282,56	0,0862
6	0,64213	1,234× 10⁶	7,210×10⁵	6,754	0,999810	−2292,88	−2282,56	0,0862
7	0,72431	1,404×10⁶	7,578×10⁵	4,547	0,999931	−2518,06	−2507,69	0,2464
8	0,56394	1,171×10⁶	6,506×10⁵	4,310	0,999942	−3109,52	−3098,55	0,1751
9	0,39497	4,814×10⁵	1,050×10⁵	7,358	0,999835	−10367,98	−10353,10	0,0073

Fonte: elaborado pelos autores (2026)

Considerando o termo quadrático $F_R = -c|v|v$, a Tabela 3 mostra os valores para o parâmetro c e os indicadores.

Os nove ensaios de desaceleração livre da barcaça vazia foram ajustados ao modelo de resistência quadrática ($F_R = -cv|v|$), considerando a massa adicional longitudinal estimada teoricamente. Os coeficientes, determinados por mínimos quadrados não lineares, variaram

ISSN 2763-5600
Edição Especial do IV Congresso de Tecnologia da Fatec Jahu

entre 0,62395 e 1,64410 kg/m, com (R^2) entre 0,999601 e 0,999933 e RMSE de 4,259 a 19,071 mm, indicando elevada concordância global com os dados experimentais. Entretanto, o modelo quadrático apresentou menores RMSE, AIC e BIC apenas nos ensaios 1 e 3, enquanto o linear foi superior nos demais. Os valores de Durbin–Watson próximos de zero evidenciaram forte autocorrelação positiva dos resíduos. Assim, a ausência de melhoria sistemática, a dispersão dos coeficientes e os padrões residuais justificam a investigação do modelo misto ($F_R = -bv - cv|v|$), que combina as contribuições linear e quadrática.

Tabela 3. Dados do parâmetro c e indicadores

Ensaio	c (kg/m)	RMSE (mm)	R^2	AIC	BIC	Durbin–Watson
1	0,91481	19,071	0,999601	−3906,07	−3893,46	0,0083
2	0,62395	17,988	0,999715	−8648,86	−8633,91	0,0036
3	1,57154	4,259	0,999933	−16391,95	−16376,00	0,0079
4	0,85755	5,415	0,999889	−4930,85	−4918,38	0,0507
5	0,71018	7,805	0,999746	−2226,39	−2216,08	0,0649
6	0,71018	7,805	0,999746	−2226,39	−2216,08	0,0649
7	0,73287	5,840	0,999886	−2400,90	−2390,53	0,1503
8	0,67943	4,745	0,999929	−3054,64	−3043,67	0,1458
9	1,64410	8,597	0,999775	−10039,33	−10024,44	0,0054

Fonte: elaborado pelos autores (2026)

A Tabela 4 mostra os valores dos parâmetros e os indicadores. O modelo de resistência mista ($F_R = -bv - cv|v|$), ajustado aos ensaios de desaceleração livre da barcaça vazia com inclusão da massa adicional longitudinal, apresentou contribuições distintas dos termos linear e quadrático. Nos ensaios 1 e 3, predominou a formulação quadrática; nos ensaios 2, 5, 6 e 7, a linear; e nos ensaios 4, 8 e 9, ambos os coeficientes foram positivos. A maior melhoria ocorreu no ensaio 9, com redução do RMSE de 7,358 para 3,883 mm. Entretanto, a persistência de forte autocorrelação dos resíduos e a ocorrência de coeficientes nulos sugerem limitações na representação da dinâmica e na identificabilidade dos parâmetros. Assim, embora o modelo misto melhore alguns ajustes, sua superioridade não foi sistemática, sendo necessárias análises adicionais de sensibilidade, incerteza e estabilidade dos coeficientes.

ISSN 2763-5600
Edição Especial do IV Congresso de Tecnologia da Fatec Jahu

Tabela 4. Dados dos parâmetros b e c e indicadores

Ensaio	b (kg/s)	c (kg/m)	RMSE (mm)	R^2	AIC	BIC	Durbin–Watson
1	0,00000	0,91481	19,071	0,999601	−3904,07	−3887,26	0,0083
2	0,26612	0,00000	11,390	0,999886	−9631,23	−9611,31	0,0091
3	0,00000	1,57154	4,259	0,999933	−16389,95	−16368,69	0,0079
4	0,25542	0,29837	5,189	0,999898	−4969,18	−4952,54	0,0550
5	0,64213	0,00000	6,754	0,999810	−2290,88	−2277,13	0,0862
6	0,64213	0,00000	6,754	0,999810	−2290,88	−2277,13	0,0862
7	0,72431	0,00000	4,547	0,999931	−2516,06	−2502,23	0,2464
8	0,53895	0,03017	4,310	0,999942	−3107,64	−3093,02	0,1752
9	0,21486	0,75561	3,883	0,999954	−11716,27	−11696,42	0,0258

Fonte: elaborado pelos autores (2026)

5. Considerações Finais

Este trabalho investigou a desaceleração livre de uma barcaça em escala reduzida, utilizando ensaios em tanque de provas e análise de imagens pelo software Tracker para determinar os coeficientes de resistência hidrodinâmica e comparar modelos lineares, quadráticos e mistos.

Os resultados apresentaram elevada concordância com os dados experimentais ($(R^2>0,999)$), embora nenhum modelo tenha demonstrado superioridade sistemática. A formulação linear apresentou menores erros em seis dos oito conjuntos experimentais distintos, enquanto a quadrática foi superior em dois. O modelo misto proporcionou melhorias adicionais em alguns ensaios, especialmente no ensaio 9.

Entretanto, a dispersão dos coeficientes e a forte autocorrelação dos resíduos evidenciaram limitações na representação da dinâmica, agravadas pelas incertezas associadas à estimativa teórica da massa adicional.

Conclui-se que os modelos descrevem satisfatoriamente o deslocamento global da embarcação, mas exigem aperfeiçoamentos para representar integralmente sua dinâmica hidrodinâmica. O estudo estabelece uma metodologia experimental e computacional replicável, cuja continuidade envolverá a análise da barcaça carregada, a avaliação das incertezas e da

ISSN 2763-5600

Edição Especial do IV Congresso de Tecnologia da Fatec Jahu

identificabilidade dos parâmetros, contribuindo para o desenvolvimento de modelos aplicáveis à segurança da navegação interior.

REFERÊNCIAS

KING, K. K.; YASUKAWA, H.; HIRATA, N.; KOSE, K. Maneuvering simulations of pusher-barge systems. **Journal of Marine Science and Technology**, v. 13, n. 2, p. 117–126, maio 2008. DOI:10.1007/s00773-007-0267-4. Disponível em: http://link.springer.com/10.1007/s00773-007-0267-4. Acesso em: 1 mar. 2025.

KOH, K. K.; YASUKAWA, H.; HIRATA, N. Hydrodynamic derivatives investigation of unconventionally arranged pusher-barge systems. **Journal of Marine Science and Technology**, v. 13, n. 3, p. 256–268, ago. 2008. DOI:10.1007/s00773-008-0004-7. Disponível em: http://link.springer.com/10.1007/s00773-008-0004-7. Acesso em: 1 mar. 2025.

MAIMUN, A.; PRIYANTO, A.; RAHIMUDDIN; SIAN, A. Y.; AWAL, Z. I.; CELEMENT, C. S.; NURCHOLIS; WAQIYUDDIN, M. A mathematical model on manoeuvrability of a LNG tanker in vicinity of bank in restricted water. **Safety Science**, v. 53, p. 34–44, mar. 2013. DOI:10.1016/j.ssci.2012.09.006. Disponível em: https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0925753512002263. Acesso em: 1 mar. 2025.

SANO, M.; YASUKAWA, H.; OKUDA, A.; HAMAGUCHI, T. Maneuverability of a pusher and barge system under empty and full load conditions. **Journal of Marine Science and Technology**, v. 23, n. 3, p. 464–482, set. 2018. DOI:10.1007/s00773-017-0485-3. Disponível em: http://link.springer.com/10.1007/s00773-017-0485-3. Acesso em: 1 mar. 2025.

WIRZ, D.-I. F. Optimisation of the crash-stop manoeuvre of vessels employing slow-speed two-stroke engines and fixed pitch propellers. **Journal of Marine Engineering & Technology**, v. 11, n. 1, p. 35–43, 1 jan. 2012. DOI:10.1080/20464177.2012.11020259. Disponível em: https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/20464177.2012.11020259.

ŽERJAL, M.; BILEN, B.; MARINKOVIĆ, M. Crash-Stop Manoeuver of Pushed Convoys on Inland Waterways. **International Shipbuilding Progress**, v. 45, n. 441, p. 51–70, jan. 1998. DOI:10.3233/ISP-1998-4544103. Disponível em: https://journals.sagepub.com/doi/10.3233/ISP-1998-4544103. Acesso em: 6 jun. 2025.

"O conteúdo expresso no trabalho é de inteira responsabilidade do(s) autor(es)."