

Avaliação de Inércia e Amortecimento Hidrodinâmicos em Seções Bidimensionais Oscilando em Balanço

Resumo

O trabalho trata da avaliação, por meio de ensaios de decaimento, da inércia e do amortecimento hidrodinâmicos em seções 2D oscilando em balanço puro. São consideradas geometrias com bojo quinado e com bojo arredondado, com e sem bolinas.

No tratamento dos registros experimentais de oscilação amortecida, consideram-se:

a) modelos linear e não lineares para representação do amortecimento e da restauração hidrostático-gravitacional;

b) métodos de valores médios por ciclo e de energia.

São realizadas comparações entre os resultados dos modelos e métodos acima.

O trabalho é concluído com a análise da influência de características geométricas nas propriedades hidrodinâmicas da seção em balanço.

Autores:

Hélio Corrêa da Silva Júnior – Engenheiro Naval, Pesquisador, CNAVAL/IPT
Av. Prof. Almeida Prado, 532 - Prédio 46 – CEP 05508-901 - São Paulo, SP – Brasil
e-mail heliojr@ipt.br - Fone:55(11) 3767-4705 - Fax: 55 (11) 3767-4051

Mardel Bongiovanni de Conti – Engenheiro Naval, Professor Associado, PNV/EPUSP
Av. Prof. Mello Moraes, 2231 - PNV/USP – CEP 05508-900 - São Paulo, SP – Brasil
e-mail mbdconti@usp.br - Fone: 55(11) 3091-5450 - Fax: 55(11) 3091-5717

Moses Szajnbok – Engenheiro Mecânico, Professor Doutor, EPUSP
Av. Prof. Mello Moraes, 2231 - PNV/USP – CEP 05508-900 - São Paulo, SP – Brasil
e-mail lumaamin@usp.br - Fone: 55(11) 3091-5450 - Fax: 55(11) 3091-5717

Simbologia:

B: boca ou dimensão linear transversal do corpo cilíndrico (unidade m)

L: comprimento do corpo cilíndrico (unidade m)

$D(\varphi)$: momento de restauração momento de amortecimento dividido pelo momento de inércia virtual em balanço (unidade $1/s^2$)

$N(\varphi)$: momento de amortecimento dividido pelo momento de inércia virtual em balanço (unidade $1/s^2$)

ε_{ij} : coeficientes adimensionais multiplicando os termos não lineares do momento de amortecimento ou de restauração

ω_n : frequência natural de balanço (unidade rad/s)

φ : posição angular do balanço (unidade rad)

ζ : coeficiente adimensional de amortecimento linear

1 – Introdução

O objetivo do trabalho é a análise da influência de características geométricas nas propriedades hidrodinâmicas da seção em balanço.

Foram realizados experimentos em canal de testes com modelos sob oscilação livre em balanço. O tratamento dos dados experimentais considerou representações linear e não lineares do amortecimento e da restauração hidrostático-gravitacional, e métodos de valores médios por ciclo e de energia.

Realizou-se a simulação dinâmica do decaimento em balanço usando as propriedades hidrodinâmicas da embarcação identificadas a partir dos experimentos.

Os resultados foram comparados com os registros medidos, possibilitando a análise da adequação dos modelos e métodos adotados quanto à sua aderência.

Conclui-se o trabalho com a análise da influência de características geométricas nas propriedades hidrodinâmicas da seção em balanço.

O trabalho se insere em linha de pesquisa sobre identificação de atributos hidrodinâmicos do movimento de balanço de navios, relevante para a verificação da segurança e conforto das embarcações.

O trabalho é composto, além desta seção introdutória, das seguintes seções: 2 – Características das seções e ensaios; 3 - Modelos de representação dos esforços hidrodinâmicos; métodos de análise dos dados experimentais; 4 – Resultados; 5 – Conclusões; 6 – Referências bibliográficas.

Seguem alguns trabalhos correlatos, em ordem cronológica.

Haddara & Bennett (1989) analisam funcionalmente o amortecimento de modelos em ensaios de decaimento em balanço. Consideram embarcações com e sem bolina e com e sem velocidade de avanço. Aplicam o método da energia por ciclo de oscilação, verificando uma forte dependência da posição angular nas estimativas.

Contento et al (1995) analisaram o balanço de navios Ro-Ro sob ondas regulares de través, usando modelo quadrático para o amortecimento e de quinto grau para a restauração. Indicam a importância da consideração de não linearidades na representação do fenômeno.

Chan et al (1995) comparam dois métodos para identificação de propriedades hidrodinâmicas do navio em balanço a partir de curvas de decaimento. Em primeiro lugar simulam o balanço com valores adotados para o amortecimento e a restauração. Em segundo lugar aplicam método assintótico e método de energia para recuperar os coeficientes hidrodinâmicos, comparando os resultados com os valores anteriormente adotados. Admitem representações quadrática e cúbica para o amortecimento, e polinomial para a restauração compatível com a condição de limite de emborcamento.

Taylan (1998) simula o balanço de diferentes tipos de navios, aplicando método assintótico para obter os picos espectrais da resposta. Conclui que a adequação das depende do tipo de embarcação.

Ueno et al (2003) identificam atributos hidrodinâmicos de pesqueiros em balanço por meio de decaimento livre, adotando representações puramente quadrática, quadrática mais linear, e racional quadrática para o amortecimento, e cúbica para a restauração. Aplicam o método da energia aos valores dos picos da curva de decremento do balanço, e o método do algoritmo genético. Comparam resultados numéricos com experimentais.

Surendran et al (2005) realizam simulação numérica com coeficientes hidrodinâmicos adotados para um Ro-Ro hipotético. Admitem representação quadrática para o amortecimento e de quinto grau para a restauração. Analisa na resposta a influência dos coeficientes admitidos.

Asghari et al (2007) analisa o balanço de um navio graneleiro sob um momento excitador tipo degrau, em que a resposta oscilatória tende a um valor limite. Resultados experimentais são comparados com previsões analítico-numéricas pelos métodos da energia e da simulação no domínio do tempo. No da energia não se considera o amortecimento e na simulação considera-se amortecimento linear.

Jang et al (2010) transformam o problema de decaimento em balanço em um problema com integral de Volterra de primeira espécie, visando a identificação da forma funcional do amortecimento. Aplica o procedimento a resultados experimentais do decaimento em balanço para um modelo de navio pesqueiro. Compara a forma funcional do amortecimento obtida pelo procedimento proposto com modelo quadrático de amortecimento.

Zeraatgar et al (2010) avaliam o amortecimento em balanço de um navio graneleiro por meio de ensaios de decaimento livre. Simulações numéricas indicam que a adoção de representação polinomial de quinta potência no ângulo de balanço para a restauração e de terceira potência na velocidade de balanço para o amortecimento levam a uma melhor aderência com os resultados experimentais.

2 – Características das seções e dos ensaios

Foram conduzidos experimentos de decaimento em balanço em um canal de testes de cerca de 25 metros de comprimento, 1 metro de largura e 0,8 metros de profundidade, com águas inicialmente calmas. O comprimento do canal permite a execução do decaimento livre do modelo em tempo suficiente antes do retorno das ondas refletidas pelo modelo.



Figura 1 – Canal de testes do PNV - USP

A geometria do modelo é cilíndrica, com seção transversal retangular. O modelo foi posicionado transversalmente ao tanque, articulado na altura da linha d'água de modo a oscilar em balanço puro. A figura 2 apresenta o contorno das geometrias ensaiadas enquanto a figura 3 apresenta os modelos utilizados.

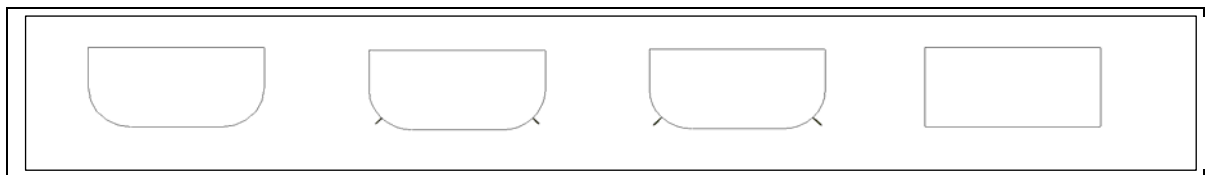


Figura 2 – Corte transversal da parte submersa das seções testadas



Figura 3 – Duas configurações geométricas ensaiadas: bojo arredondado com bolina (esquerda) e bojo quinado (direita)

As variações geométricas consistiram na mudança de calado e na geometria do bojo. Foram realizados testes com bojo quinado e com bojo arredondado, além da adição de duas diferentes alturas de bolina no bojo arredondado.

A relação boca-calado é 2.49.

As bolinas ensaiadas tem alturas correspondentes a 4% e 6% da boca.

Os parâmetros de distribuição de massas dos modelos foram ajustados com lastros pelos métodos da balança, relativamente ao posicionamento vertical do centro de gravidade, e da oscilação em seco, relativamente ao raio de giracão em balanço.

As características dos modelos com bojo arredondado e bojo quinado são apresentadas, respectivamente, na tabela 1 e 2.

Tabela 1 – Características dos modelos com bojo arredondado

Grandeza	Valor	Unidade
Comprimento	0,891	m
Boca	0.199	m
Calado	0,080	m
Deslocamento	11,228	kg
Deslocamento	0,0112	m ³
Posição Centro de Gravidade Vertical	0,051	m
Raio de Giração em Balanço	0,081	m

Tabela 2 – Características do modelo com bojo quinado

Grandeza	Valor	Unidade
Comprimento	0,891	m
Boca	0.199	m
Calado	0,080	m
Deslocamento	11,845	kg
Deslocamento	0,0118	m ³
Posição Centro de Gravidade Vertical	0,032	m
Raio de Giração em Balanço	0,083	m

A instrumentação utilizada no ensaio consistiu de um *rate-gyro* de estado sólido para registrar a velocidade angular do balanço do modelo. A integração numérica da série temporal ao longo do tempo permite obter o seu deslocamento angular.

A posição inicial do decaimento foi registrada através de inclinômetro digital.

As ondas irradiadas pelo casco foram medidas através de um ondômetro posicionado proximamente. O ondômetro ou *wave-probe* é um medidor de altura de onda resistivo que consiste de duas hastes metálicas. A figura 4 mostra fotografia do arranjo experimental. A figura 5 apresenta um detalhe esquemático do arranjo experimental.



Figura 4 – *Setup* experimental no canal de testes

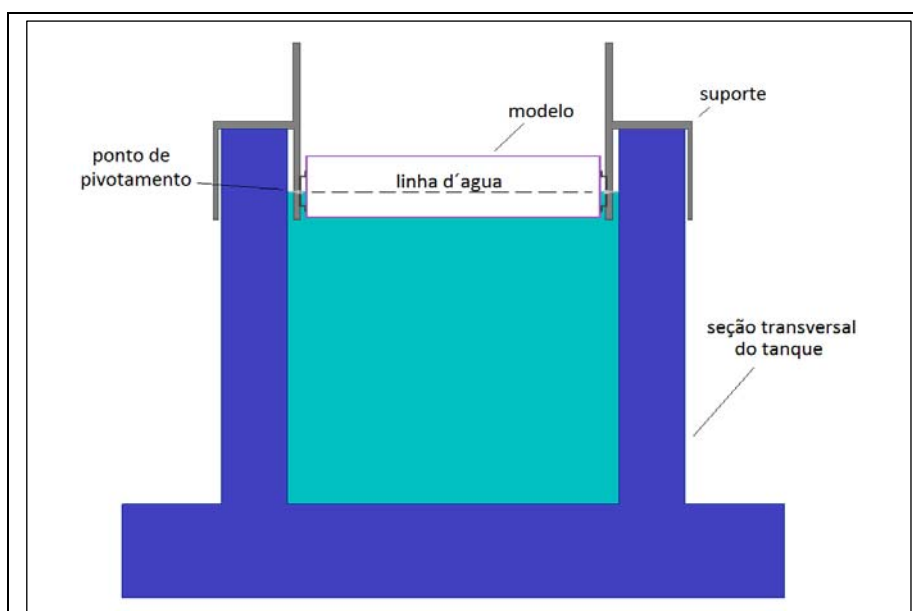


Figura 5 – Corte transversal mostrando o modelo posicionado no canal de testes
Com as condições de inércia estabelecidas através de dois diferentes arranjos de lastro e as geometrias de seção, foi executada a matriz de ensaios explicitada na tabela 3. Variou-se a geometria da seção e os calados, de 40, 80 e 120 mm. Os arranjos de lastro estabelecidos resultaram em duas posições verticais do centro de gravidade e dois raios de giração distintos.

Tabela 3 – Matriz de ensaios

Geometria da Seção	Bolina
Bojo Arredondado	-
Bojo Arredondado com Bolina Menor	8 mm
Bojo Arredondado com Bolina Maior	12 mm
Bojo Quinado	-

O ensaio de decaimento partiu de um ângulo de banda com velocidade angular inicialmente nula. Para iniciar o movimento do modelo da maneira estipulada, foi implementado um mecanismo que consiste de um fio amarrado a um suporte externo que mantém o modelo na posição com banda inicial. Ao ser cortado o fio, o modelo inicia o seu movimento de decaimento partindo do repouso.

3 – Modelos de representação dos esforços hidrodinâmicos; métodos de análise dos dados experimentais

A representação da dinâmica do balanço em um grau de liberdade, não forçado, consiste em uma equação diferencial ordinária com termo inercial (incluindo inércia de massa e inércia hidrodinâmica), com termo viscoso (incluindo parcelas linear e não lineares na velocidade), e com termo de restauração hidrostático-gravitacional linear.

Os coeficientes de amortecimento (linear e não lineares) e de inércia adicionada são recuperados de séries temporais das oscilações, obtidas experimentalmente, mediante sua análise por método de energia.

Utilizaram-se os seguintes métodos para recuperação da funcionalidade do amortecimento a partir das curvas de decaimento em balanço:

- a) método da energia, na configuração proposta por (Haddara; Bennett, 1989);
- b) método de decremento logarítmico.

Considera-se a equação da dinâmica do balanço:

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial t^2} + N(\phi, \dot{\phi}) + D(\phi) = 0$$

O amortecimento é representado por

CASO 1

$$N = N(\phi) = 2\zeta\omega_n$$

(caso de amortecimento linear)

CASO 2

$$N = N(\phi, \dot{\phi}) = 2\zeta\omega_n\dot{\phi}(1 + \epsilon_{31}\frac{1}{\omega_n}|\dot{\phi}|)$$

(amortecimento com termos não lineares para a velocidade)

CASO 3

$$N = N(\phi, \dot{\phi}) = 2\zeta\omega_n\dot{\phi}(1 + \epsilon_{11}|\phi| + \epsilon_{12}\phi^2 + \epsilon_{13}\frac{1}{\omega_n}|\dot{\phi}| + \epsilon_{14}\frac{1}{\omega_n^2}\dot{\phi}^2)$$

(amortecimento com não lineares dependentes da posição angular)

A restauração é representada por:

CASO A

$$D = D(\phi) = \omega_n^2\phi$$

(para os casos 1 e 2 de amortecimento)

CASO B

$$D = D(\phi) = \omega_n^2\phi(1 + \epsilon_{21}\phi^2 + \epsilon_{22}\phi^4)$$

(para o caso 3 de amortecimento)

4 – Resultados

Os coeficientes obtidos através da análise pelo método do decaimento logarítmico, com modelos de amortecimento linear com a velocidade e amortecimento quadrático com a velocidade linearizado, foram utilizados em simulações de decaimento através da integração numérica do modelo dinâmico empregado em cada caso.

Os resultados são então sobrepostos com os registros dos ensaios para avaliação da robustez da modelagem.

As figuras 6, 7,8 e 9, apresentam resultados dos ensaios mais as simulações derivadas das análises com os modelos de ciclo médio para o calado médio.(B/H = 2.5)

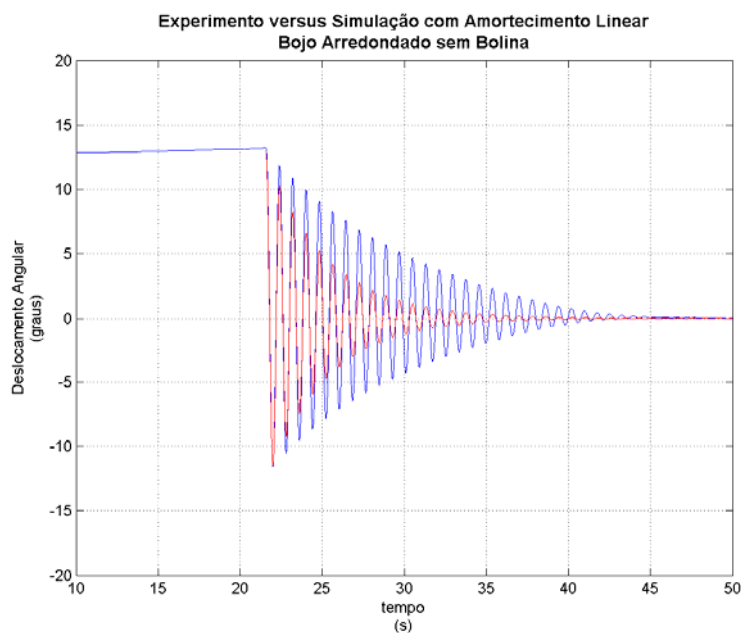


Figura 6 – Comparação entre o registro do ensaio (azul) e a simulação (vermelho) através do método de amortecimento linear para o modelo com bojo arredondado

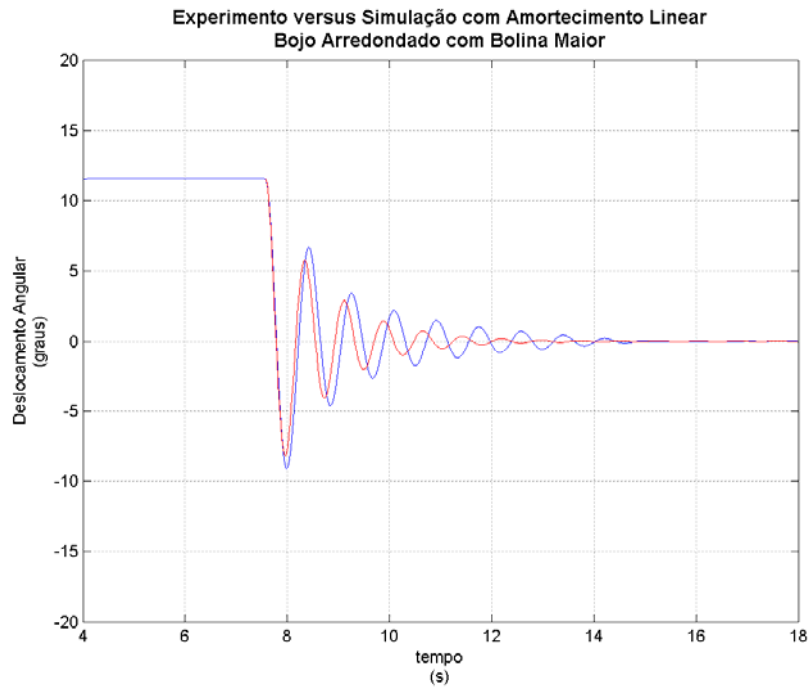


Figura 7 – Comparação pelo modelo linear para o caso do modelo com bojo arredondado e bolina maior

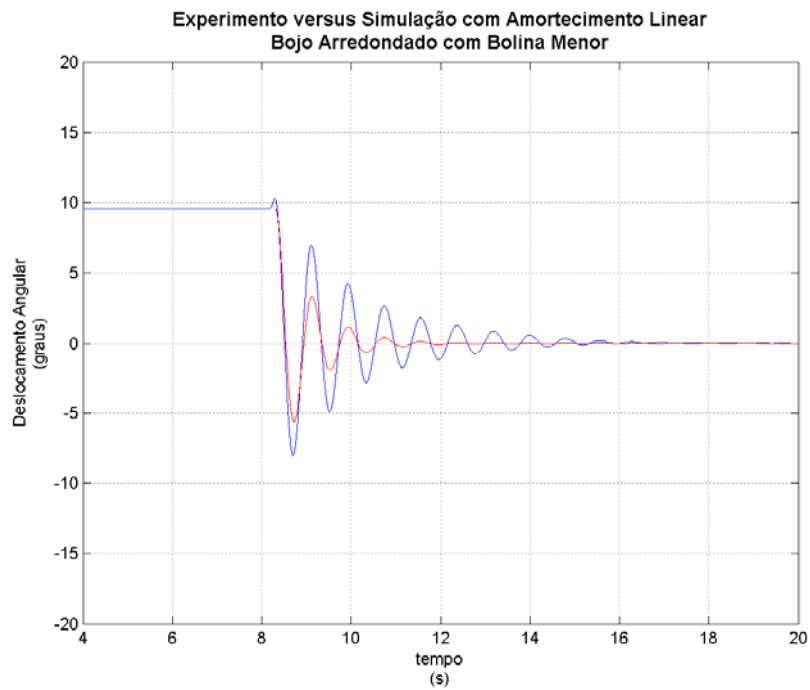


Figura 8 – Comparação pelo modelos linear para o caso do modelo com bolina menor

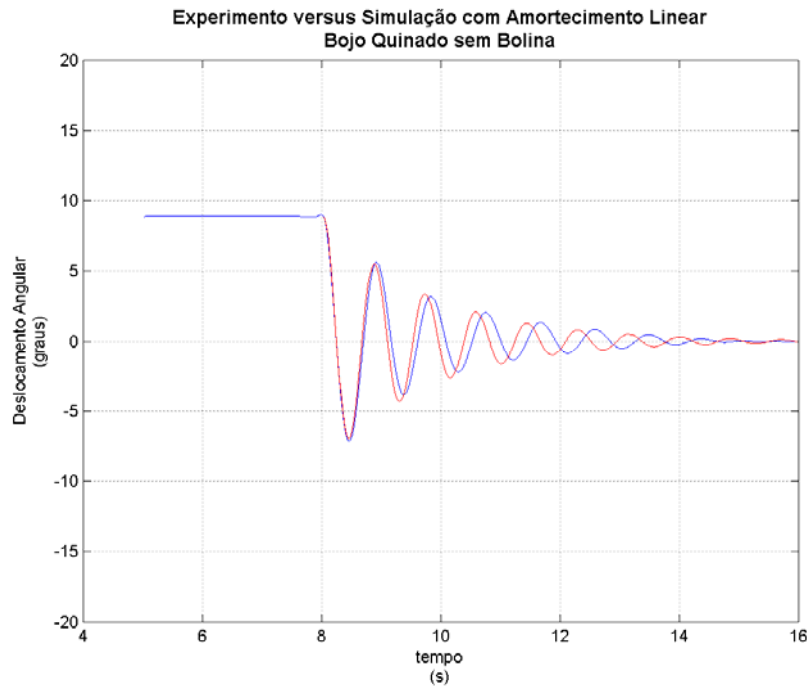


Figura 9 – Comparação do casco quinado pelo modelo linear

Observa-se que os modelos conseguem aproximar o período de oscilação sem conseguir, contudo, capturar a diminuição das amplitudes devido ao amortecimento.

Os resultados dos ensaios mostram que o modelo apresentou diferentes características de dissipação do movimento conforme a geometria, com o casco de bojo arredondado apresentando a menor dissipação, as bolinas com valores de amortecimento intermediários e o casco quinado sendo o mais dissipativo.

Na aplicação do método da energia, foram utilizadas três modelagens diferentes para a dinâmica do movimento:

- modelo de amortecimento linear;
- modelo de amortecimento linear e quadrático;
- modelo de amortecimento e restauração não-lineares.

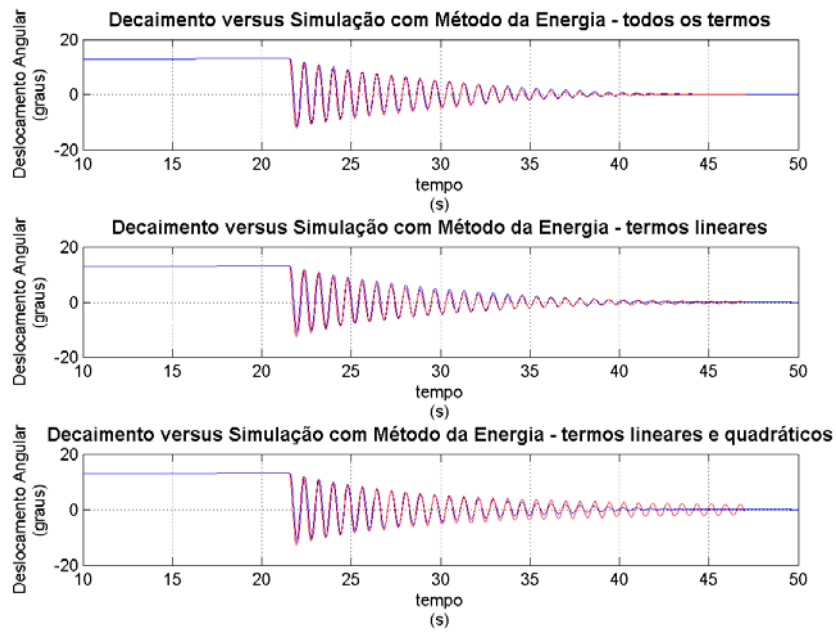


Figura 10 – Séries temporais analisadas pelo método da energia para a geometria bojo arredondado

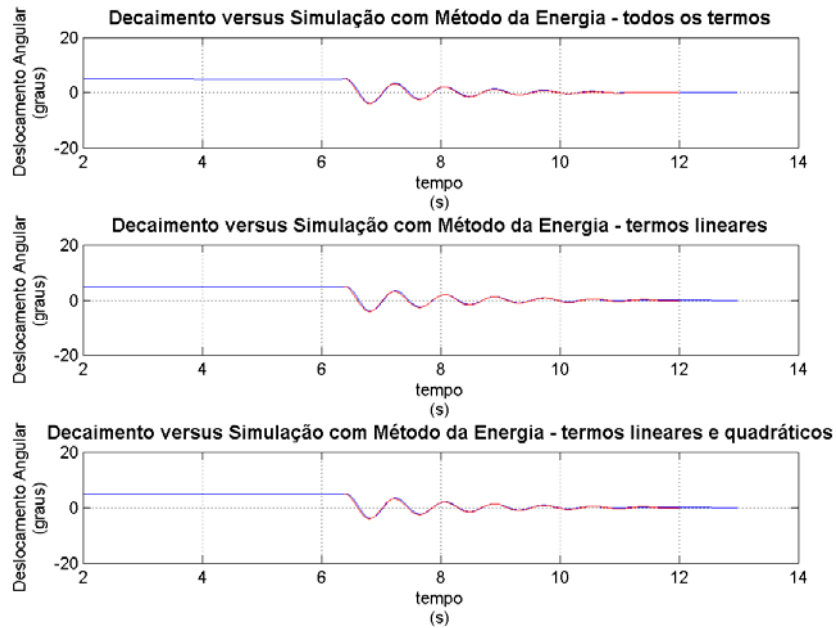


Figura 11 – Diferentes modelos dinâmicos analisados pelo método da energia para o caso de bolina grande (6% de B).

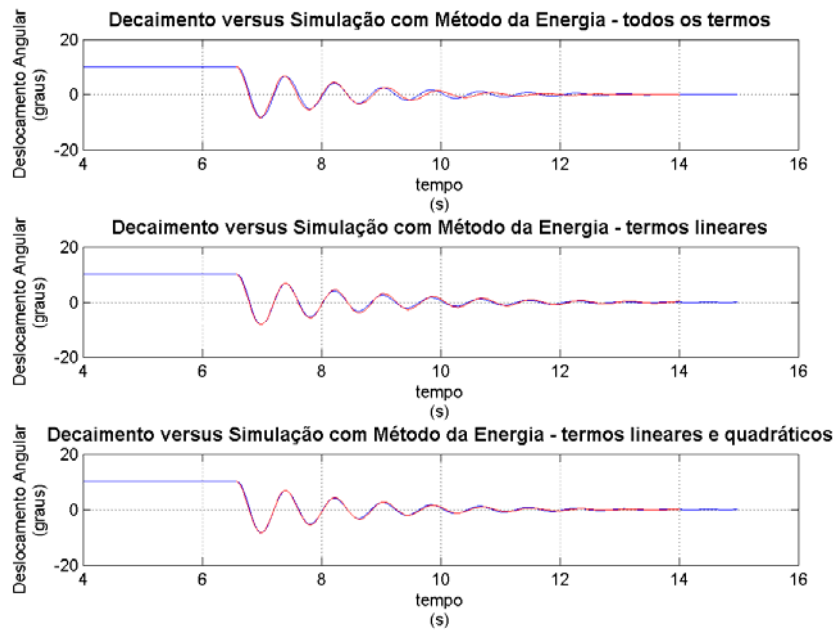


Figura 12 – Análise pelo método da energia sobreposta ao registro do ensaio para a geometria de bolina pequena (4% de B)

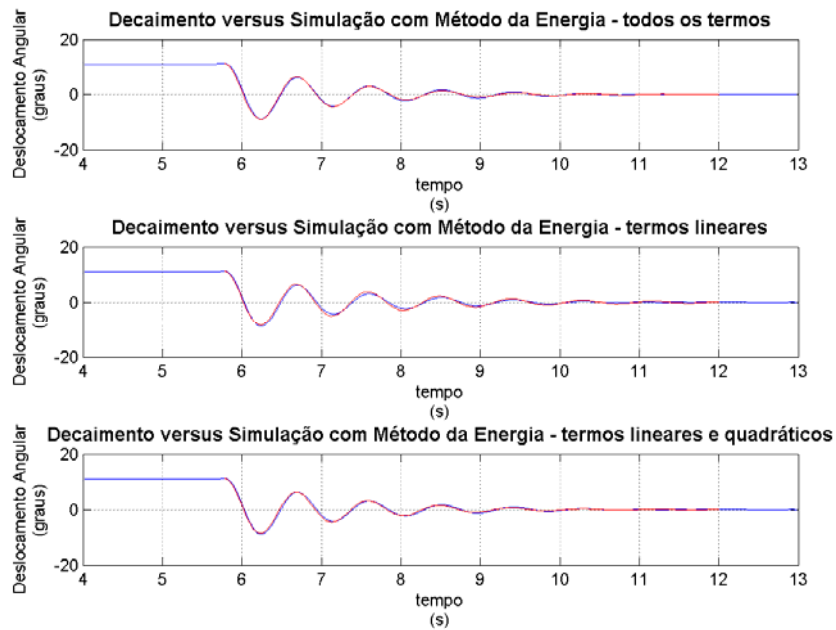


Figura 13 – Comparação do registro do ensaio para a geometria de bojo quinado com a análise do modelo dinâmico aplicando o método da energia.

5 – Conclusões

Verificou-se, nos casos considerados neste artigo, que:

- a) a aplicação do método da energia recupera a funcionalidade do amortecimento e da restauração, sendo que as simulações mostram-se aderentes às curvas experimentais para os modelos de representação adotados;
- b) a aplicação do método de decremento logarítmico não apresenta a mesma qualidade de aderência que o método da energia, seja quanto às amplitudes, seja quanto ao sincronismo em frequência.

Uma hipótese para este comportamento é o fato de o método de decremento logarítmico basear-se apenas no conjunto de picos da curva de decaimento, enquanto o método da energia considera todos os pontos amostrados.

Ensaio de decaimento em balanço com tratamento dos dados experimentais por meio de método de energia constituem-se em um procedimento adequado para a recuperação da representação do balanço.

No âmbito da presente análise o modelo de representação linear do amortecimento se mostra adequado, não havendo necessidade de incorporação de termos não lineares. Tal fato provavelmente se deve à consideração de pequenos ângulos iniciais e à geometria vertical do costado.

Observa-se que há um significativo aumento do amortecimento da condição de bojo arredondado sem bolinas para as demais.

Quanto aos demais casos, verifica-se aumento do amortecimento nesta ordem: casco com bolina menor, casco com bolina maior, casco com bojo quinado. A variação do amortecimento, no entanto, é bem mais discreta do que a anteriormente comentada, entre casco de bojo arredondado sem bolina e as demais condições. Os resultados, no entanto, devem sofrer alterações caso se considere velocidade de avanço.

6 – Referências bibliográficas

Asghari, M; Zeraatgar, H; Bakhtiari-Nejad, F. An Analytical and Experimental Study on Dynamic Stability of a Vessel. Archives of Civil and Mechanical Engineering, v. VII, n. 3 (2007).

Chan, H S Y; Xu, Z; Huang, W L. Estimation of Nonlinear Damping Coefficients from Large-Amplitude Ship Rolling Motions. Applied Ocean Research, v. 17, p. 217-224 (1995).

Contento, G; Francescutto, A; Piciullo, M. On The Effectiveness of Constant Coefficients Roll Motion Equation. Ocean Engineering, v. 23, n.7, p. 597-618 (1996)

Haddara, M R; Bennett, P. A Study of the Angle Dependence of Roll Damping Moment. Ocean Engineering, v. 16, n. 4, p. 411-427 (1989).

Jang, T S; Kwon, S H; Lee, J H. Recovering the Functional Form of the Nonlinear Roll Damping of Ships From a Free-Roll Decay Experiment: An Inverse Formulism. Ocean Engineering, v. 37, n. 14-15, p. 1337-1344 (Outubro/2010).

Surendran, S; Lee, S K; Reddy, J V R; Lee, G. Non-linear roll dynamics of a Ro-Ro ship in waves. Ocean Engineering, v.32, p. 1818–1828 (2005) .

Taylan, M; The Effect of Nonlinear Damping and Restoring in Ship Rolling. Ocean Engineering, v. 27, p. 921–932 (2000).

Ueno, K; Kimura, N; Amagai, K; Estimation of Coefficients of the Equation of Nonlinear Roll Motion for Fishing Boats by Improved Energy Method and Genetic Algorithm. Japan J. Indust. Appl. Math., v.20 , p. 155-192 (2003).

Zeraatgar, H; Asghari, M; Bakhtiari-Nejad, F. A Study of the Roll Motion by Means of a Free Decay Test. Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering, v. 132 (Agosto/2010).

Agradecimentos

Os autores agradecem à Universidade de São Paulo (USP), ao Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT), à Financiadora de Estudos e Projetos (FINEP) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) por apoio técnico e financeiro. Agradecem também o Especialista de Laboratório Carlos A. G. F. de Souza, ao Engenheiro Ewen Guyon pela colaboração nos ensaios.