

COEFICIENTES DE FORMA DE CASCO E OCORRÊNCIAS DE *SLAMMING*

MARCELO DE OLIVEIRA **PREDES***

Capitão de Corveta (EN)

PAULO DE TARSO THEMISTOCLES ESPERANÇA**

Professor

SUMÁRIO

Introdução
Variações de casco
Metodologia
Resultados
Conclusões

INTRODUÇÃO

O desempenho operacional de um navio militar apresenta relação direta com seu comportamento no mar, influenciado por variáveis naturais, como a ação das ondas e dos ventos. Agentes ambientais podem acarretar movimentos indesejáveis da embarcação, desenca-

deando problemas como: embarque de água no convés, emersão do propulsor e *slamming*, evento caracterizado como um impacto violento da estrutura do navio na superfície do mar.

Neste contexto, as predições de *slamming* apresentam grande importância quando analisado o comportamento de navios utilizados pela Marinha do Brasil

*Mestre em Engenharia Naval pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ). Assessor na Superintendência de Gestão do Ciclo de Vida da Diretoria de Gestão de Programas da Marinha.

**Doutor em Engenharia Oceânica pela UFRJ e pela University of Strathclyde. Docente titular da UFRJ e Coordenador Executivo do Laboratório de Tecnologia Oceânica da Coppe/UFRJ.

(MB), especialmente as unidades tipo escolta de médio porte, que usualmente desenvolvem elevadas velocidades e são dotadas de armamentos, sensores e diversos outros equipamentos ou sistemas sensíveis. Adicionalmente, por apresentarem calado relativamente reduzido, quando comparadas a navios de grande porte que navegam em velocidades semelhantes, estas unidades estarão particularmente sujeitas às ocorrências mais frequentes do fenômeno em lide.

Segundo os principais autores, o estudo do *slamming* envolve duas análises principais: a estimativa da pressão de impacto e a frequência esperada de ocorrências. Entre os primeiros trabalhos publicados, a pesquisa de Wagner (1932) foi concebida para a avaliação da pressão de impacto em seções com reduzido ângulo de fundo, constituindo o fundamento teórico de diversas teorias propostas adiante. Com a evolução do tema, a análise da pressão de impacto passou a considerar formatos de seção arbitrários, incluindo a modelagem tridimensional do impacto. Em paralelo, diferentes ensaios experimentais foram conduzidos em laboratórios, possibilitando a validação e a comparação de resultados com as teorias empregadas.

O segundo problema, a probabilidade de impacto, foi inicialmente abordado no estudo de Ochi (1964), que estabeleceu duas premissas básicas para o *slamming*: a emersão do ponto de impacto em análise e o seu retorno à superfície líquida em alta velocidade, sendo estabelecido um parâmetro baseado na relação de Froude.

As restrições operacionais decorrentes do fenômeno em questão fomentam o desenvolvimento de soluções de engenharia que atenuem seus efeitos. Com tal motivação, foi proposta uma análise dos efeitos de variações de forma do casco nas ocorrências de *slamming*.

VARIAÇÕES DE CASCO

Como modelo base para o estudo, foi utilizado o casco da Fragata *Friesland*, um projeto holandês que possui diversos estudos de desempenho já publicados, incluindo testes com o navio real (GERRITSMAN, 1967). O modelo possui dimensões principais próximas às dos meios equivalentes empregados na MB, conforme apresentado no Quadro 1.

Comprimento total (L)	116 m
Boca (B)	11,7 m
Calado (T)	4 m
Deslocamento carregado	3070 ton
Coefficiente de bloco	0,56

Quadro 1 – Características principais da fragata classe *Friesland*

Inicialmente, foram estabelecidos quatro parâmetros diretamente relacionados à geometria do casco: posição longitudinal do centro de carena (LCB), coeficiente de bloco (C_B), posição longitudinal do centro de flutuação (LCF) e coeficiente do plano de flutuação (C_{WL}). Empregando como base o modelo de casco apresentado no item anterior, foram analisadas alterações dos resultados das estimativas de *slamming* decorrentes da variação isolada de cada um destes parâmetros, ou seja, mantendo os demais constantes. Para tal, foram geradas oito variações do casco, cada uma correspondendo a um valor máximo ou mínimo gerado para LCB, C_B , LCF ou C_{WP} , conforme detalhado a seguir:

LCB (+)/(-): Posição longitudinal do centro de carena mais próximo/distante da proa;

C_B (+)/(-): Maior/menor coeficiente de bloco;

LCF (+)/(-): Posição longitudinal do centro de flutuação mais próximo/distante da proa; e

C_{WL} (+)/(-): Maior/menor coeficiente da área de flutuação.

Estas variações foram obtidas por meio de um processo combinado (PREDES, 2020), que empregou funções polinomiais juntamente com uma técnica de mapeamento desenvolvida por Lewis (1929), capaz de gerar curvas que correspondem às balizas de um casco.

METODOLOGIA

A análise do comportamento no mar dos modelos foi obtida por meio do Programa Seaway Octopus. Esta ferramenta é baseada na teoria potencial, empregando a “teoria das faixas” para a solução do problema dinâmico do navio, verdadeiramente tridimensional, por meio de uma simplificação, pela subdivisão da estrutura flutuante em seções bidimensionais.

Premissas Adotadas

Para as análises de comportamento em ondas da embarcação, foram consideradas as seguintes hipóteses: velocidade constante de 18 nós, incidência das ondas pela proa, ausência de banda/trim e movimentos com dois graus de liberdade (*heave* e *pitch*). Todos os modelos analisados (casco original e as oito variações) possuem o comprimento entre perpendiculares (L_{BP}), B, T, perfil do plano diame-

tral, Centro de Gravidade (CG) e raio de giração longitudinal idênticos.

O navio foi considerado como um corpo rígido e esbelto, navegando em escoamento invíscido, incompressível e irrotacional. Adicionalmente, outras simplificações do problema foram possíveis ao se utilizar a teoria linear, com a premissa de pequenos movimentos da embarcação. O ponto de impacto considerado nas análises estava localizado a 10% L_{BP} da perpendicular de vante.

Dinâmica dos movimentos da embarcação

O trabalho adotou o sistema apresentado na Figura 1. Como a análise inclui exclusivamente a excitação por ondas de proa, apenas foram considerados os movimentos no plano vertical, com exceção do movimento de *surge*, cujas forças associadas são proporcionalmente muito inferiores às dos demais.

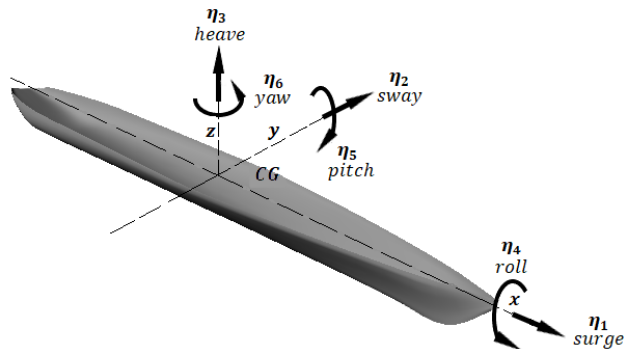


Figura 1 – Sistema de referência (modelo original)

Fonte: autores

Os dois graus de liberdade abordados compõem um sistema baseado nas equações 1 e 2. À esquerda da igualdade, temos os termos de massa e massa adicionada, amortecimento e restauração, e, à direita,

$$(M + A_{33})\ddot{\eta}_3 + B_{33}\dot{\eta}_3 + C_{33}\eta_3 + A_{35}\ddot{\eta}_5 + B_{35}\dot{\eta}_5 + C_{35}\eta_5 = F_3 e^{i\omega t} \quad (1)$$

$$(I_{55} + A_{55})\ddot{\eta}_5 + B_{55}\dot{\eta}_5 + C_{55}\eta_5 + A_{53}\ddot{\eta}_3 + B_{53}\dot{\eta}_3 + C_{53}\eta_3 = F_5 e^{i\omega t} \quad (2)$$

as forças de excitação do sistema. Por meio destas formulações, foram obtidas as funções de transferência dos movimentos da embarcação para ondas regulares.

Uma aproximação mais realística foi obtida pela consideração de ondas irregulares no caso em estudo. Para tal, foi adotado o espectro de Bretschneider (indicado na equação 3), empregado para representações de mar aberto. Na formulação, $H_{1/3}$ representa a altura significativa de onda e T_1 o seu período médio.

$$S_\zeta = \frac{173H_{1/3}^2}{T_1^4} \omega^{-5} \exp\left\{\frac{-692}{T_1^4} \omega^{-4}\right\} \quad (3)$$

O emprego do espectro é baseado em parâmetros constantes, sendo representativo a curto tempo. Para predições a longo prazo, é necessária a combinação com diagramas de dispersão, que fornecem dados estatísticos de mar relativos a diferentes regiões. Nesta análise, foram utilizadas as estatísticas da região do Oceano Atlântico Sul destacada na Figura 2.

Estimativas de slamming

Conforme mencionado, a ocorrência de *slamming* é baseada em dois requisitos, a emersão do ponto de impacto (evento A) e a sua reentrada a uma velocidade crítica (evento B), considerados independentes, sendo a probabilidade obtida com a equação 4 (PRICE e BISHOP, 1974):

$$P[A \cap B] = P[A]P[B] \quad (4)$$

Considerando o evento A como a emersão do ponto de impacto, sua probabilidade é representada na equação 5, sendo r_3 o deslocamento vertical relativo, T_p o calado no ponto de impacto e m_{05} o momento espectral de deslocamento.

$$Pr\{r_3 > T_p\} = \exp\left\{-\frac{T_p^2}{2m_{05}}\right\} \quad (5)$$

A velocidade crítica de reentrada é representada pelo evento B, com a probabilidade indicada pela equação 6, onde V_{CR} é a velocidade crítica para o

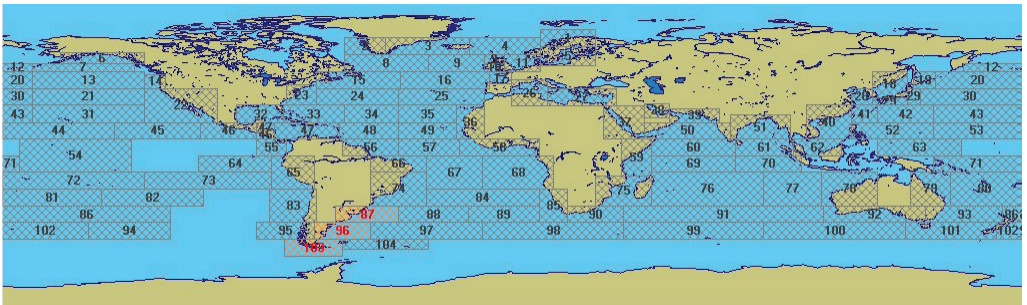


Figura 2 – Região considerada
Fonte: Programa Seaway Octopus

slamming e m_{0V} o momento espectral de velocidade.

$$Pr\{v_3 > V_{CR}\} = \exp\left\{-\frac{V_{CR}^2}{2m_{0V}}\right\} \quad (6)$$

A pressão de *slamming* foi estimada por meio das técnicas analíticas de Von Karman (1929) e Wagner (1932) e também pelo método empírico de Ochi e Motter (1971). Como resultado dessas formulações, foi obtido o coeficiente de pressão (C_p) para cada modelo analisado.

RESULTADOS

As estimativas de probabilidade de ocorrência de *slamming*, por ciclo de onda, para as variações de casco consideradas estão apresentadas na Figura 3. De acordo com os resultados obtidos, verificou-se uma redução da probabilidade com as variações de casco LCB(-), $C_B(-)$, LCF(+) e $C_{WL}(-)$. Adicionalmente, os gráficos indicam maior efeito na ocorrência de *slamming* pela alteração dos parâmetros LCF e C_{WL} .

A Figura 4 ilustra os valores obtidos para as pressões de impacto, com a uti-

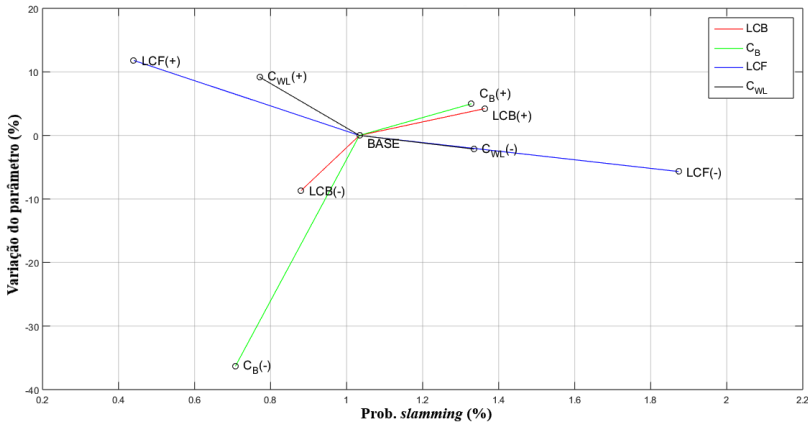


Figura 3 – Probabilidade de *slamming* e percentual de variação. Fonte: autores

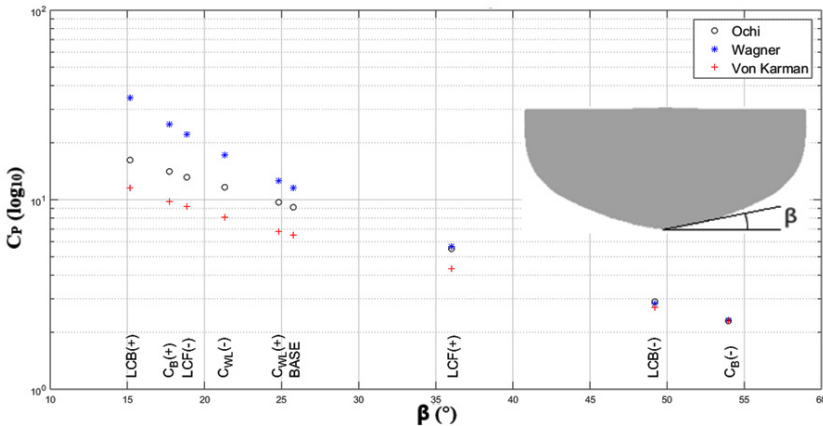


Figura 4 – Relação entre o ângulo de fundo e o coeficiente de pressão. Fonte: autores

lização dos três métodos anteriormente mencionados. Os resultados indicam a redução da pressão de impacto (com base no Coeficiente de Pressão – C_p) com o aumento do ângulo de fundo do casco (representado por β). De acordo com a representação, o aumento de β resulta em seções afiladas do casco, enquanto menores valores do ângulo representam seções de fundo mais plano.

CONCLUSÕES

O trabalho envolveu a análise dos efeitos decorrentes da variação de alguns dos principais parâmetros que definem a geometria do casco de uma embarcação. Por meio dos resultados obtidos, verificou-se que a alteração de tais elementos implicam significativas variações nas condições de probabilidade

de *slamming*, especialmente aqueles relacionados com a área do plano de flutuação (LCF e C_{WL}).

Também foi possível identificar grande alteração da pressão de impacto, em ordem decrescente, conforme o aumento do ângulo de fundo, para todos os métodos empregados. Em outras palavras, a adoção de um perfil de casco com seções mais afiladas na região sujeita ao *slamming* possibilita consideráveis reduções na magnitude da força de impacto no mar.

Por fim, os resultados do estudo indicam a possibilidade de relevantes melhorias no desempenho operacional de um navio militar, particularmente relativas ao evento de *slamming*, em acréscimo ao conteúdo apresentado em diversos outros materiais que versam sobre efeitos da modelagem de geometria do casco no comportamento no mar.

📁 CLASSIFICAÇÃO PARA ÍNDICE REMISSIVO:

<PODER MARÍTIMO>; Construção Naval; Embarcação; Navegação; Navio;

REFERÊNCIAS

- GERRITSMAN, J. S. (1967). “Full-scale destroyer motion measurements”. *Journal of Ship Research*.
- LEWIS, F. M. (1929). “The inertia of water surrounding a vibrating ship”. *Transactions Sname*.
- OCHI, M. K. (1964). “Prediction of occurrence and severity of ship slamming at sea”. Proceedings of 5th O.N.R. Symposium. Bergen, Norway.
- OCHI, M. K.; MOTTER, L. E. (April de 1971). “A method to estimate slamming characteristics for ship design”. *Marine Technology*, vol. 8, nº 2.
- PREDES, M. O. (2020). “Análise paramétrica envolvendo variações de coeficientes de forma em *slamming*”. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, Brasil.
- PRICE, W. G.; BISHOP, R. E. D. (1974). *Probabilistic theory of ship dynamics*. Ed. Chapman and Hall.
- VON KARMAN, T. (1929). “The impact on seaplane floats during landing”. Washington, DC: NACA Technical Note.
- WAGNER, H. (1932). “Über Stoss und Gleitvorgänge an der Oberfläche von Flüssigkeiten”. *Z. Angew. Math. Mech.*, v. 12 , pp. 193-215.