

PREVISÃO DE ENTERRAMENTO DE MUNIÇÕES E MINAS NAVAIS EM LEITO MARINHO ARENOSO: UM MODELO ACOPLADO CONSIDERANDO MUDANÇAS MORFOLÓGICAS E INSTABILIDADE INDUZIDA POR ONDAS¹

Predicting the burial of munition and naval mines in sandy seafloor: a coupled model considering morphological changes and wave-induced instability

Vinícius Santos Pessanha¹ 

Resumo: A propagação das ondas no oceano pode induzir instabilidade no leito marinho e o transporte de sedimentos, afetando estruturas costeiras como plataformas de petróleo e oleodutos, assim como o enterramento de objetos, como artefatos explosivos (munições e minas navais). Por meio de um modelo hidromorfodinâmico que fornece as forçantes para o modelo de instabilidade do leito marinho induzida por ondas, este estudo teve como objetivo principal desenvolver um modelo numérico acoplado para prever o enterramento de artefatos causado por mudanças morfológicas e instabilidade do leito marinho. O objetivo secundário foi gerar mapas indicando o grau de instabilidade do leito e a profundidade de enterramento estimada, com base nos resultados obtidos pelo modelo acoplado. O modelo é validado por meio de comparação com observações de campo, que incluem medições de correntes, ondas e mudanças morfológicas, além do registro do enterramento de artefatos (com até 15,5 cm de diâmetro) em fundo marinho arenoso sob a ação de ondas. Os resultados confirmam a habilidade do modelo em representar a hidrodinâmica local, mudanças morfológicas e o enterramento de artefatos. Além disso, revelam que tanto a instabilidade do leito marinho quanto a sedimentação têm papel significativo no processo de enterramento dos artefatos. Os mapas gerados com base nos resultados do modelo têm potencial para serem utilizados como auxílio ao planejamento de operações de minagem e medidas de remediação, visando a limpeza de áreas de interesse.

Palavras-chave: Instabilidade do leito marinho. Modelagem morfológica. Enterramento de artefatos explosivos. Leito marinho arenoso.

Abstract: The propagation of waves can induce instability in the seafloor and sediment transport, affecting coastal structures such as oil platforms and pipelines, as well as the burial of objects, such as explosive artifacts (munitions and naval mines). The main objective of this study was to develop a model to predict artifact burial caused by morphological changes and seafloor instability. Additionally, the study aimed to generate maps indicating the degree of instability and estimated burial depth based on the results obtained from the coupled model. The model is validated through comparison with field observations, including measurements of currents, waves, and morphological changes, as well as records of artifact burial (with diameters of up to 15.5 cm) in sandy seafloor under wave action. The results confirm the ability of the model to represent local hydrodynamics, morphological changes, and artifact burial. Furthermore, results reveal that both seafloor instability and sedimentation play a significant role in the artifact burial process. The maps generated from the model results have the potential to assist in the planning of mining operations and remediation measures, aiming to clean up areas of interest.

Keywords: Seafloor instability. Morphological modeling. Burial of explosive artifacts. Sandy seafloor.

¹ Capitão de Corveta. Hidrógrafo. PhD em Oceanografia Física pela Naval Postgraduate School (Califórnia, Estados Unidos). Encarregado da Seção de Modelagem Oceanográfica, Divisão de Previsão Numérica do Centro de Hidrografia da Marinha, Niterói, RJ - Brasil. E-mail: vinicius.pessanha@marinha.mil.br

¹ Os resultados deste estudo foram publicados no Journal of Sea Research (PESSANHA et al., 2023). Disponível em <https://doi.org/10.1016/j.seares.2023.102351>.

1. INTRODUÇÃO

Nas regiões oceânicas, a propagação das ondas geradas por tempestades pode induzir um aumento significativo das forças de cisalhamento nos sedimentos do leito marinho, resultando em alterações morfológicas e instabilidade. Esses processos podem ter impactos severos em estruturas costeiras cruciais, como oleodutos, armazenamento de petróleo, plataformas de produção, quebra-mares e enterramento de objetos (CHU et al., 2021; KLAMMLER et al., 2021). Dentre os objetos suscetíveis ao enterramento, destacam-se os artefatos explosivos, como munições e minas navais. A determinação precisa da localização e profundidade de enterramento desses artefatos é fundamental para a implementação de medidas de remediação, garantindo a segurança das áreas de navegação e protegendo o meio ambiente.

A propagação das ondas cria um campo de pressão que afeta o leito marinho, resultando em variações de tensão que podem impactar sua estabilidade. As mudanças na tensão efetiva, definida como a diferença entre a tensão total, e a poropressão da água (a pressão exercida pela água do mar nos espaços porosos do leito marinho saturado), são fatores cruciais para a estabilidade do leito (SAKAI; HATANAKA; MASE, 1992). A tensão efetiva pode ser influenciada pela percolação (*seepage flow*), que é o movimento da água do mar através dos pequenos canais interconectados entre as partículas de sedimentos. A interação entre a percolação e o excesso de poropressão de água pode afetar a tensão efetiva e até mesmo causar a liquefação do leito marinho.

A liquefação induzida por ondas é um caso extremo de instabilidade do leito marinho quando o excesso de poropressão de água anula a tensão efetiva (JENG, 2018), causando uma diminuição na resistência do solo (GROOT et al., 2006). Como resultado, a mistura água-sedimento se comporta como um fluido, causando uma falha sedimentar (SUMER, 2006), permitindo que objetos e estruturas, previamente em repouso na superfície, afundem no sedimento e eventualmente sejam enterrados no leito marinho arenoso (SAKAI; HATANAKA; MASE, 1992).

Embora diversos modelos tenham sido desenvolvidos para prever a poropressão e a tensão efetiva induzida pelas ondas no leito marinho, muitos desses estudos têm simplificado as características do leito marinho e do fluido. Estudos recentes têm avançado nessa área, como os trabalhos de Klammler, Sheremet e Calantoni (2020) e Klammler et al. (2021), que determinaram a profundidade de enterramento de objetos

na costa e introduziu o conceito de grau de liquefação, relacionado à tensão efetiva vertical diminuída pelo aumento da poropressão. No entanto, essas pesquisas ainda não consideraram outros processos importantes, como a sedimentação devido ao transporte de sedimentos, que pode desempenhar um papel significativo no enterramento de artefatos.

As medições do experimento de campo *Target and Reverberation Experiment* (TREX13) foram utilizadas em diversos estudos (CHU et al., 2021; GOUGH et al., 2022; PESSANHA; CHU; GOUGH, 2023) que abordaram as alterações morfológicas e o enterramento de objetos observados na costa de *Panama City*, Flórida. No entanto, esses trabalhos não abordaram o impacto da liquefação induzida por ondas.

Neste estudo, um modelo numérico acoplado inovador é apresentado, integrando esses dois processos fundamentais, a sedimentação e a instabilidade induzida por ondas, para uma previsão precisa do enterramento de artefatos em ambientes costeiros. Para isso, o modelo numérico Delft3D (LESSER et al., 2004), reconhecido por sua capacidade de prever ondas, correntes, transporte de sedimentos e evolução morfológica em ambientes costeiros, é empregado para estimar a pressão induzida pelas ondas no leito marinho. Essa pressão é essencial para determinar tanto o grau de liquefação como a profundidade estimada do enterramento dos objetos. O modelo de instabilidade induzida por ondas é devidamente alimentado com os resultados do modelo numérico Delft3D como forçante. Adicionalmente, os dados coletados no experimento TREX13 são utilizados para validar e verificar os resultados obtidos pelo modelo.

2. OBJETIVOS

O principal objetivo deste estudo foi desenvolver um modelo acoplado, integrando aspectos hidrodinâmicos e mudanças morfológicas (Delft3D), juntamente com a liquefação induzida por ondas (KLAMMLER; SHEREMET; CALANTONI, 2020; KLAMMLER et al., 2021), para prever o enterramento de artefatos e investigar a hipótese de que tanto a liquefação quanto a sedimentação ocorreram durante o experimento de campo TREX13. O objetivo secundário foi gerar mapas do grau de instabilidade do leito e da profundidade máxima de falha sedimentar, considerando a ocorrência de liquefação, com base nos resultados do modelo acoplado. Essa abordagem permitirá ampliar a análise da instabilidade

do leito marinho em toda a área de interesse, superando as limitações associadas à localização de estações de observação, como observado em estudos anteriores.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. ÁREA DE ESTUDO E EXPERIMENTO DE CAMPO

Entre 20 abril e 23 maio de 2013, o experimento de campo TREX13 foi conduzido na costa de *Panama City*, Flórida (Figura 1A), onde o sedimento é composto principalmente por areia fina de quartzo com tamanho médio de grão de sedimento (D_{50}) de 230 μm (CALANTONI; STAPLES; SHEREMET, 2014). No início do experimento, duas estruturas metálicas chamadas *quadpods* foram posicionadas em profundidades distintas (7,5 e 20 m). A essas estruturas metálicas foram fixados diversos equipamentos, incluindo sonar de varredura setorial, perfilador acústico de ondas e correntes (AWAC) e perfilador acústico Doppler (PC-ADP), para coletar dados de altura da superfície do mar (ASM), correntes, altura significativa da onda (H_s), direção média da onda (θ_{dir}) e período de pico da onda (T_p). Além disso, próximo a

ambos os *quadpods*, réplicas de munições de diferentes tamanhos e densidades foram posicionadas sobre o leito marinho. Pessanha et al. (2023) apresentam uma descrição detalhada sobre os equipamentos utilizados e suas configurações.

Durante o experimento, duas frentes frias passaram por *Panama City* apresentando ondas e ventos de sul. Entre 4 e 5 de maio, a primeira frente fria passou pela área de estudo, causando o primeiro evento de ondas, gerando uma altura significativa de onda de 1,2 m e um período de pico de onda de 10 segundos no local do *quadpod* nº 1. Em seguida, entre 5 e 6 de maio, uma segunda frente cruzou por *Panama City*, fazendo com que o segundo evento de ondas tivesse condições mais intensas, com uma altura significativa de 2 m e um período de pico de onda de 7 segundos.

3.2. MODELO HIDROMORFODINÂMICO

Neste trabalho, assim como em estudos recentes na costa de *Panama City* (CHU et al., 2021; PESSANHA; CHU; GOUGH, 2023), foi empregado o sistema de modelagem de código aberto Delft3D com três módulos: circulação (*flow*), ondas e morfologia. O módulo de circulação prevê e fornece a altura da superfície do mar e corrente como entrada para os módulos de ondas e morfologia. Adicionalmente, esse módulo calcula o transporte de sedimentos sob as forças de vento,

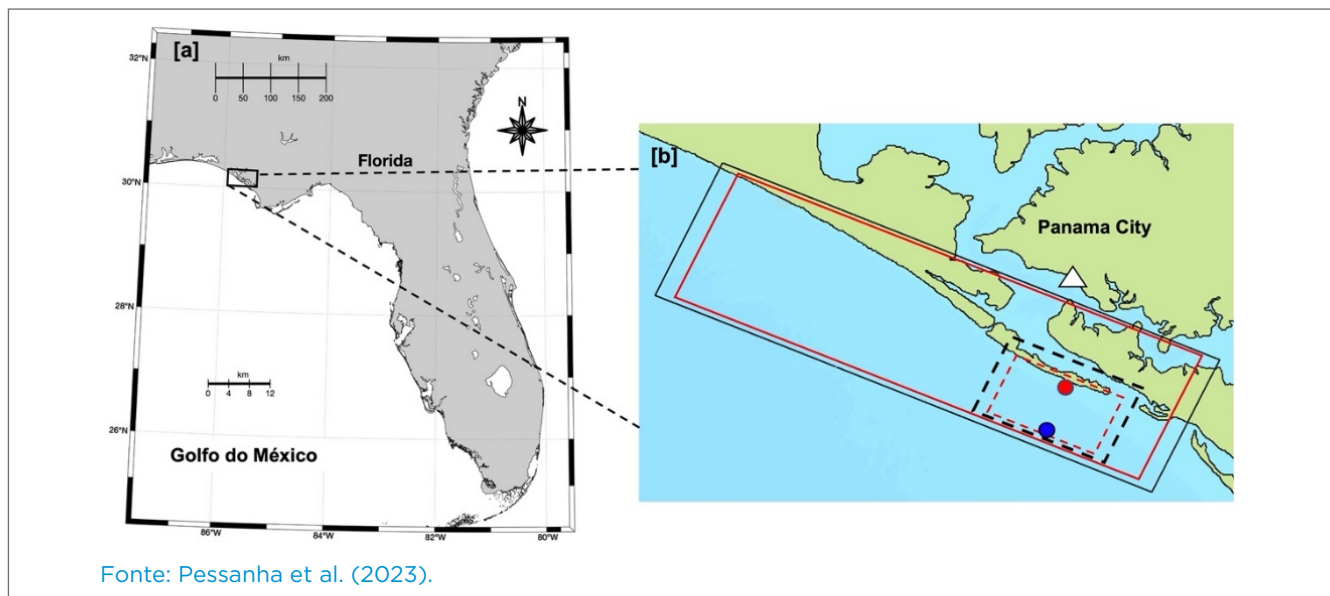


Figura 1. (A) Localização da costa de *Panama City* indicada pelo retângulo preto. (B) Estação NOAA 8729108 (triângulo branco) e área do domínio do modelo com os limites das grades computacionais: onda domínio externa (linha preta), fluxo domínio externa (linha vermelha), onda domínio interna (linha preta tracejada) e fluxo domínio interno (linha vermelha tracejada). O ponto vermelho representa a localização do *quadpod* nº 1 e o ponto azul denota a localização do *quadpod* nº 2.

maré e ondas. Por sua vez, o módulo de ondas prevê a geração, propagação, dissipação e interações não lineares de onda-onda, considerando a batimetria, o vento e as correntes. Por fim, o módulo de morfologia funciona em conjunto com os módulos de ondas e circulação para atualizar a batimetria considerando o campo de transporte de sedimentos. Lesser et al. (2004) oferecem detalhes sobre a descrição do modelo e suas equações.

Para melhorar a resolução espacial na área de estudo, o modelo foi dividido em dois domínios: o domínio externo com resolução mais baixa e o domínio aninhado com resolução mais fina. O domínio externo gera as condições de contorno para o domínio aninhado usando a técnica de aninhamento *offline*, resultando em redução do custo computacional. Ambos os domínios possuem grades separadas para fluxo e ondas (Figura 1B), com domínio externo variando de 500 a 100 metros de resolução, e o domínio aninhado com resolução de 60 a 20 metros. O transporte de sedimentos e a evolução morfológica foram estimados somente no domínio aninhado para otimizar o custo computacional. Pessanha et al. (2023) descrevem em detalhes o modelo, as grades, as condições de contorno e os parâmetros de calibração.

3.3. MODELO DE INSTABILIDADE INDUZIDA POR ONDA

A ocorrência de liquefação é estimada usando o modelo de instabilidade induzida por ondas introduzido por Klammler, Sheremet e Calantoni (2020), em que a distribuição da pressão induzida pelas ondas sobre a superfície do leito marinho é calculada a partir dos resultados do modelo hidromorfodinâmico. A poropressão induzida por ondas (p_p) e a tensão efetiva vertical (σ'_z) são determinadas por solução analítica (HSU; JENG, 1994; KLAMMLER; SHEREMET; CALANTONI, 2020), cujo cálculo das constantes complexas envolve aproximadamente 100 expressões descritas por Jeng (2018).

Klammler et al. (2021) propuseram um critério de instabilidade do leito marinho baseado na anulação da tensão efetiva vertical chamado grau de liquefação (L) (Equação 1),

$$L = \begin{cases} \lim_{z \rightarrow 0^-} [(-\gamma_w \sigma'_z) / (\gamma_s - \gamma_w)z], & \text{if } \sigma'_z > 0 \\ 0, & \text{if } \sigma'_z \leq 0 \end{cases} \quad (1)$$

Onde:

z : a coordenada vertical;

γ_w : o peso específico da água do mar;

γ_s : o peso específico do sedimento saturado.

Como o potencial de liquefação é maior logo abaixo da superfície do leito marinho, o limite na Equação 1 é avaliado para z tendendo a 0⁻. Valores negativos de σ'_z causam um efeito compressivo no sedimento e agem para estabilizá-lo ($L = 0$). Valores positivos de σ'_z , por outro lado, aumentam a fluviabilidade dos sedimentos e o risco de instabilidade do leito marinho ($L > 0$). Valores de $L \geq 1$ podem indicar uma circunstância extrema onde ocorre a anulação da tensão efetiva e as partículas de sedimentos flutuam, resultando em um episódio limitado e transitório de liquefação induzida por ondas.

3.4. PROJETO DE SIMULAÇÃO E AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DO MODELO

A simulação foi projetada para prever as condições hidrodinâmicas observadas durante o experimento de campo. Primeiramente, o modelo foi calibrado e validado. Em seguida, a distribuição de pressão sobre a superfície do leito marinho [$p_b(x,t)$] foi estimada a partir do resultado do modelo Delft3D (ASM , H_s , T_p e profundidade local) usando a teoria de onda linear. Então, $p_b(x,t)$ foi usado como entrada no modelo de instabilidade induzida por ondas para determinar a ocorrência de liquefação. Além disso, as mudanças morfológicas na área de estudo foram avaliadas a partir dos resultados do modelo Delft3D.

A avaliação do desempenho do modelo Delft3D foi realizada por meio da raiz do erro quadrático médio (*root mean square error* – RMSE) (Equação 2),

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum (X_{mod} - X_{obs})^2} \quad (2)$$

Onde:

X : a variável de interesse (por exemplo, ASM);

X_{mod} : a saída do modelo;

X_{obs} : a observação;

N : o número de observações;

(X) : a média temporal.

Além disso, foi utilizado o indicador de desempenho, *skill score* (SS) (Equação 3)

$$SS = 1 - \left(\frac{\sum |X_{mod} - X_{obs}|^2}{\left[\sum (|X_{mod} - \langle X_{obs} \rangle| + |X_{obs} - \langle X_{obs} \rangle|)^2 \right]} \right) \quad (3)$$

para avaliar a habilidade de previsão do modelo (WILLMOTT, 1981), conforme discutido por Krause,

Boyle e Båse (2005), com $SS = 1$ indicando concordância perfeita entre saída do modelo e observações; e $SS = 0$, indicando discordância total.

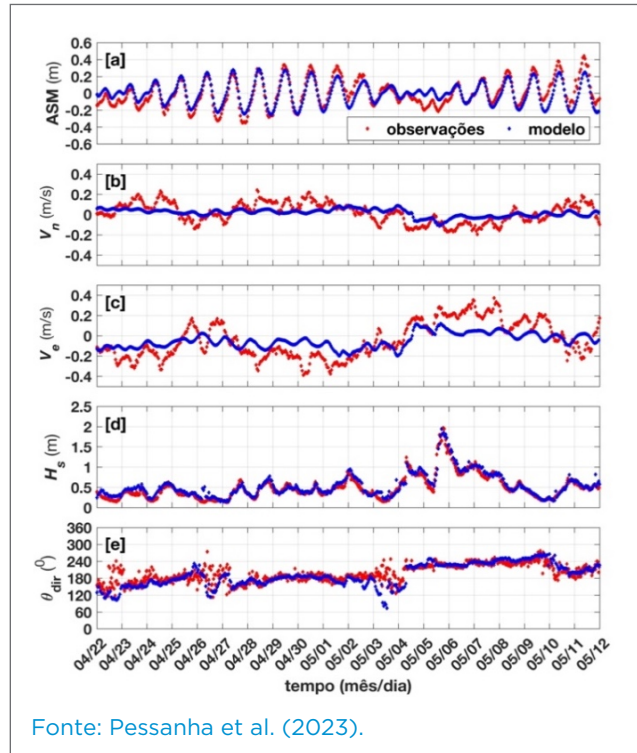


Figura 2. Comparação entre os resultados do modelo (em azul) e as médias horárias das observações (em vermelho) no local do *quadpod* nº 1.

4. RESULTADOS

4.1. CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO DO MODELO

O modelo foi calibrado por testes de sensibilidade em relação aos parâmetros definidos pelo usuário e à comparação entre a saída do modelo e as observações do *quadpod* nº 1 entre 24 e 30 de abril, conforme Pessanha et al. (2023). Ademais, o período de 22 de abril a 12 de maio de 2013 foi usado para validação do modelo com as observações de campo.

Como apresentado na Figura 2A, o modelo representou muito bem a *ASM* (média horária) com alto valor de SS (0,917) e baixo $RMSE$ (0,083 m). Além disso, as características das correntes foram satisfatoriamente reproduzidas com SS de 0,574 e $RMSE$ de 0,082 m/s para média da corrente meridional (V_n) (Figura 2B) e com SS de 0,670 e $RMSE$ de 0,137 m/s para média da corrente zonal (V_z) (Figura 2C). Apesar da subestimação da corrente, considera-se que o resultado do modelo é apropriado, uma vez que a corrente local durante o experimento atingiu valores baixos e desempenhou um papel secundário nas alterações morfológicas, conforme discutido por Pessanha et al. (2023). O modelo apresentou excelente concordância com as características da onda, H_s (Figura 2D) e θ_{dir} (Figura 2E), e SS de 0,972 e $RMSE$ de 0,099 m para H_s .

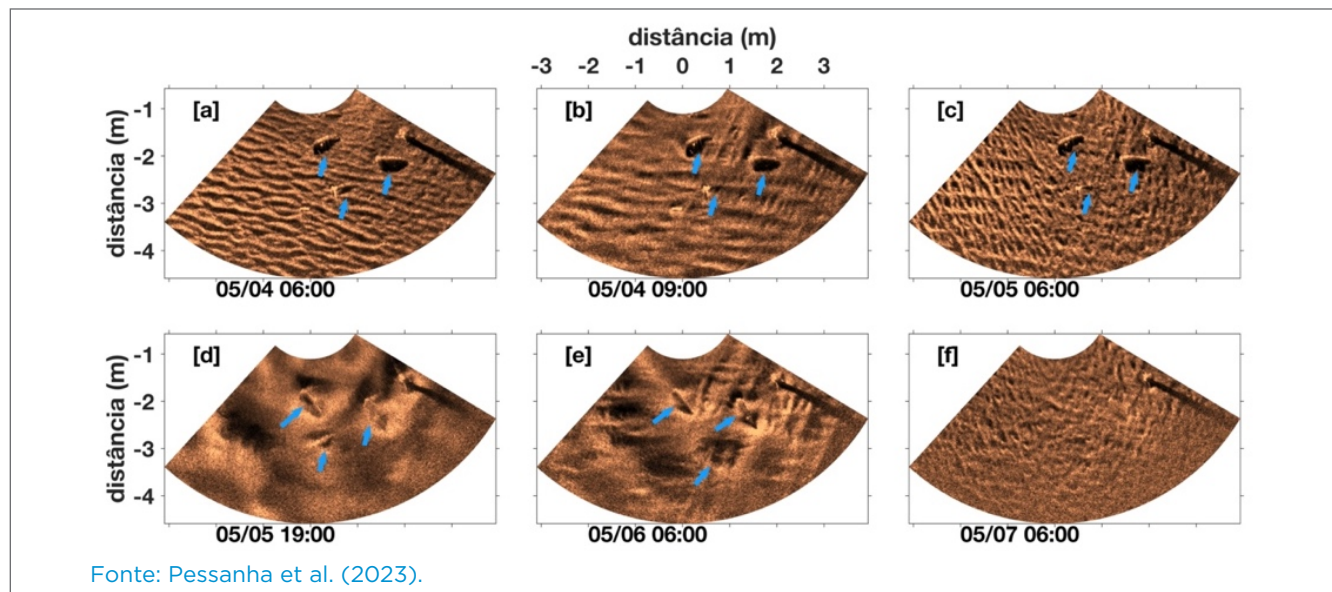


Figura 3. Imagens de sonar de varredura setorial nas proximidades do *quadpod* nº 1 com três artefatos destacados pelas setas azuis.

4.2. EVOLUÇÃO DO LEITO MARINHO

A evolução do leito marinho antes, durante e depois dos dois eventos de onda nas proximidades do *quadpod* nº 1 é apresentada na Figura 3. As imagens de sonar mostram ondulações de areia (*sand ripples*) e três artefatos (destacados por setas azuis) antes do primeiro evento de ondas (Figura 3A). Após o primeiro evento, as ondas agitaram o sedimento (Figura 3B), mas a sedimentação não foi suficiente para enterrar os

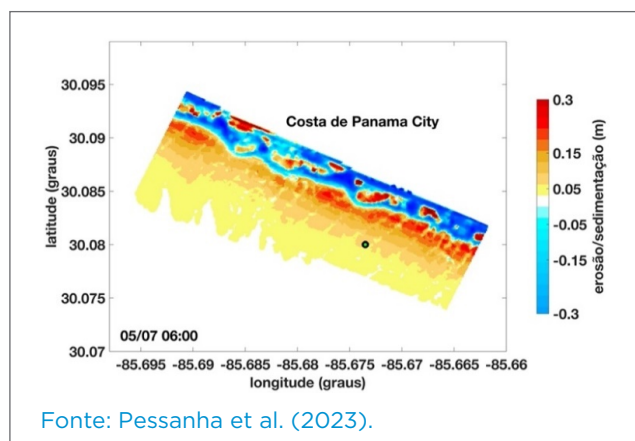


Figura 4. Saída do modelo para erosão (áreas em azul) e sedimentação (áreas em vermelha e amarelo) em 7 de maio às 06:00. A localização do *quadpod* nº 1 é representada pelo ponto verde.

objetos (Figura 3C). Já o segundo evento de ondas teve um impacto mais extenso, com mudança de forma do leito e a areia cobrindo parcialmente os objetos (Figuras 3D e 3E). Posteriormente, os objetos foram completamente enterrados (Figura 3F). Em 8 de maio, todos os objetos próximos ao *quadpod* nº 1 foram recuperados durante um mergulho de manutenção, confirmando que os objetos foram enterrados pela corrente. Os objetos posicionados próximos ao *quadpod* nº 2 se mantiveram na superfície do leito marinho e não foram enterrados.

O modelo previu mudanças no leito marinho em 7 de maio às 06:00 (Figura 4) após o segundo evento de ondas com aproximadamente 0,05 m de sedimentação nas proximidades do *quadpod* nº 1. Além disso, o modelo indicou a ocorrência de erosão (áreas em azul) perto da costa estendendo-se até aproximadamente 200 m da costa e sedimentação (áreas em vermelho e amarelo) de 200 m até aproximadamente 1 km da costa. Algumas áreas de sedimentação também aparecem onde a erosão é predominante (primeiros 200 m da costa).

4.3. GRAU DE LIQUEFAÇÃO E PROFUNDIDADE DE FALHA SEDIMENTAR

O grau de liquefação (L) é calculado para a localização de ambos os *quadpods* usando a saída do modelo e as observações

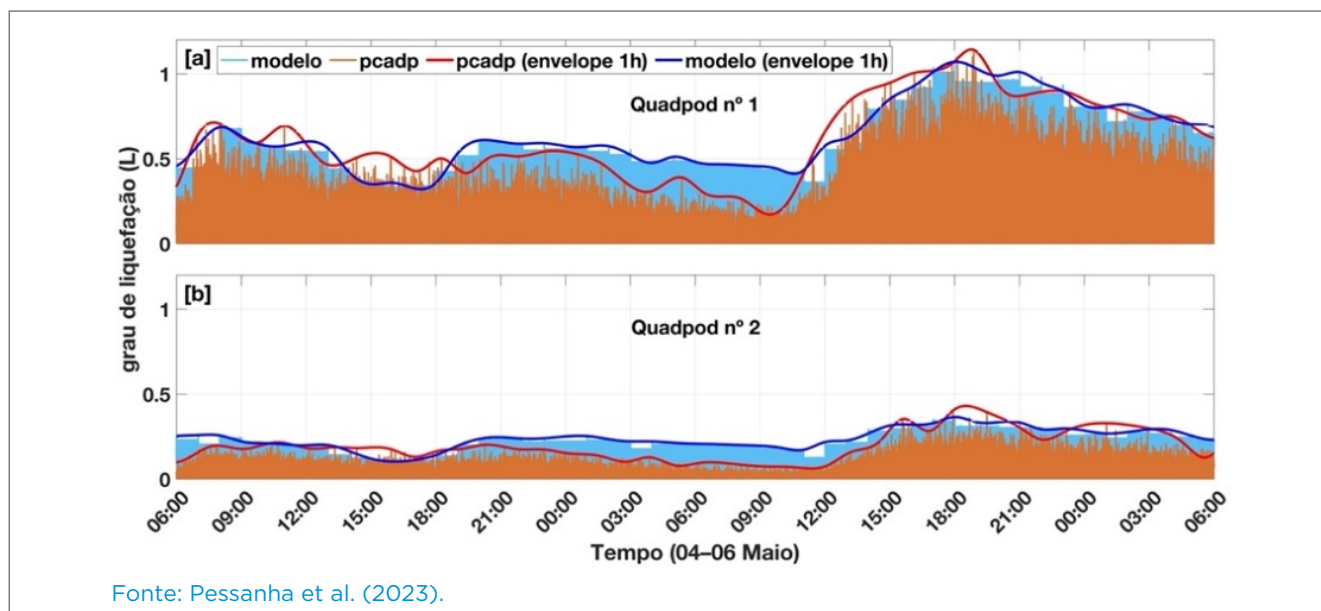


Figura 5. Séries temporais do grau de liquefação (L) na localização dos (A) *quadpod* nº 1 e (B) *quadpod* nº 2, com L calculado a partir da saída do modelo (azul) e observações do PC-ADP (laranja). As curvas grossas em azul e vermelho denotam o envelope de pico de L sobre as máximas para cada intervalo de 1 hora. $L \geq 1$ indica a ocorrência de liquefação.

do PC-ADP. A comparação apresentada na Figura 5 indica que L estimado a partir da saída do modelo representa bem o L calculado a partir das observações em ambos os *quadpods*. A Figura 5 apresenta a série temporal de L , incluindo o período da passagem das frentes frias (4 a 6 de maio). Na localização do *quadpod* nº 1 (Figura 5A), L atinge um máximo de aproximadamente 0,7 durante o primeiro evento de ondas e aproximadamente 1,1 durante o segundo evento de ondas, denotando uma condição de liquefação do leito marinho ($L > 1$). Na localização do *quadpod* nº 2, no entanto, o valor de L é baixo, com um pico de aproximadamente 0,4 durante o segundo evento de ondas (Figura 5B). Os eventos de liquefação ocorreram na localização do *quadpod* nº 1 em 5 de maio por volta de 18:00, durante o segundo evento de ondas, quando $L \geq 1$. A liquefação durante o segundo evento de ondas, conforme sugerida pelo modelo, está em concordância com o período em que o *quadpod* nº 1 afundou no sedimento. O afundamento do *quadpod* nº 1 foi verificado por comparações da diferença da altura da superfície do mar entre a estação NOAA 8729108 (Figura 1B) e os *quadpods*, conforme Pessanha et al. (2023). Essas comparações indicam que o *quadpod* nº 1 afundou no sedimento arenoso em 0,1 m.

O grau de liquefação e a profundidade máxima de falha sedimentar são calculados sobre o domínio do modelo usando o campo de pressão estimado a partir da saída do modelo. A Figura 6A apresenta o mapa da distribuição do máximo de L durante o primeiro evento de ondas, variando entre 0,3 perto

da localização do *quadpod* nº 2 e 0,75 em torno do local do *quadpod* nº 1. Os valores de L no domínio são todos menores que 1 durante o primeiro evento de ondas. Durante o segundo evento de ondas (Figura 6B), L varia de 0,4 perto da localização do *quadpod* nº 2 a 1,1 nas proximidades do *quadpod* nº 1. Um mapa de profundidade máxima de falha sedimentar durante o segundo evento de ondas (Figura 6C) é ampliado em torno da localização do *quadpod* nº 1 para identificar a área onde ocorre a liquefação ($L \geq 1$), com uma profundidade de falha de até 0,1 m. A profundidade de falha e L correlacionam-se negativamente com a profundidade local, com coeficientes de correlação (R) de -0,6 e -0,62, respectivamente. Ou seja, maiores valores de L e profundidade de falha estão relacionados a menores profundidades. Assim, em águas rasas, o efeito das ondas tende a aumentar a instabilidade do leito marinho, o que afeta a forma de linhas com os mesmos valores de L e profundidade de falha (Figura 6).

5. CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou um modelo acoplado hidromorfodinâmico e de instabilidade induzida por ondas para prever o enterramento de artefatos no leito marinho. O modelo foi validado por meio de observações de um experimento de campo na costa de *Panama City*, Flórida. As análises das observações e dos resultados do modelo

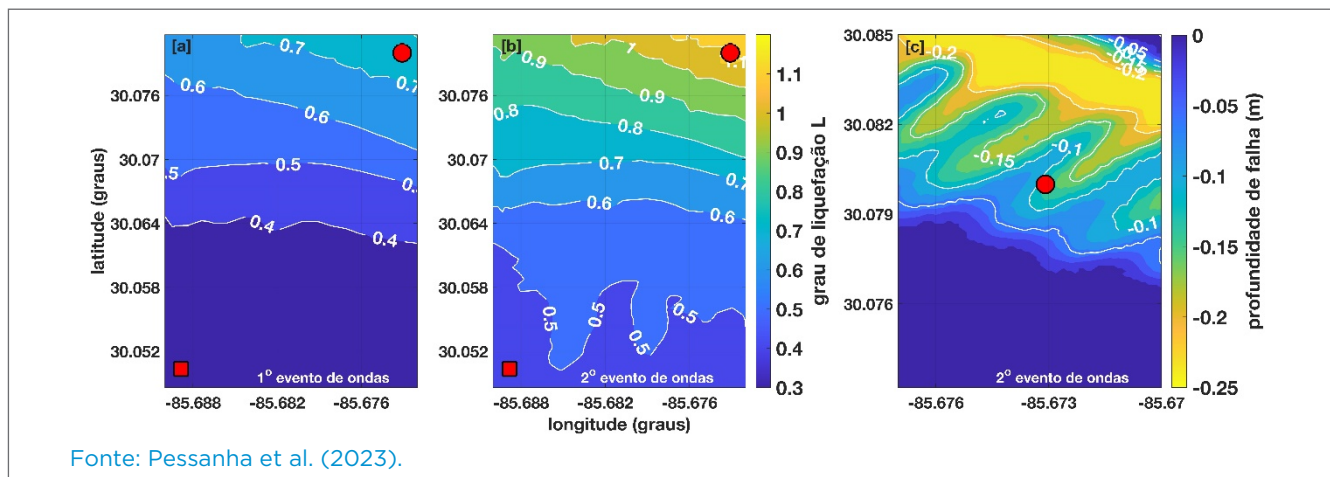


Figura 6. Mapa do grau máximo de liquefação (L) durante (A) o primeiro evento de ondas e (B) o segundo evento de ondas. (c) Mapa de profundidade de falha durante o segundo evento de ondas e ampliado em torno da localização do *quadpod* nº 1. A localização dos *quadpods* nº 1 e nº 2 são indicados pelo ponto e quadrado vermelhos, respectivamente.

confirmam a hipótese de que tanto a liquefação quanto a sedimentação ocorreram durante o experimento de campo, resultando no enterramento dos artefatos. Com base nos resultados do modelo, foram elaborados três mapas relevantes: um mapa de mudança morfológica, identificando áreas com ocorrência de erosão e sedimentação; um mapa de grau de liquefação, que indica regiões com instabilidade no leito marinho; e um mapa de profundidade de falha sedimentar, que prevê a profundidade máxima de ruptura do leito marinho nos locais propícios à ocorrência de liquefação.

Avançando em relação às pesquisas anteriores, este estudo inovador permite que análises de evolução morfológica e liquefação sejam realizadas em toda a área de interesse, em vez de serem limitadas pela localização das estações de observação, o que tem implicações importantes para o estudo da instabilidade do leito marinho e enterramento de artefatos. Adicionalmente, os mapas do grau de liquefação e da profundidade máxima de falha sedimentar possuem um grande potencial como ferramentas para auxiliar na tomada de decisões e no planejamento de operação de minagem e medidas de remediação voltadas à limpeza de áreas de interesse.

REFERÊNCIAS

- CALANTONI, J.; STAPLES, T.; SHEREMET, A. *Long Time Series Measurements of Munitions Mobility in the Wave-Current Boundary Layer SERDP Project Number 2320*. Alexandria, 2014. Disponível em: [https://www.serdp-estcp.org/Program-Areas/Munitions-Response/Munitions-Underwater/MR-2320/\(language\)/eng-US](https://www.serdp-estcp.org/Program-Areas/Munitions-Response/Munitions-Underwater/MR-2320/(language)/eng-US). Acesso em: 2 maio 2023.
- CHU, P. C.; PESSANHA, V. S.; FAN, C.; CALANTONI, J. Coupled delft3D-object model to predict mobility of munition on sandy seafloor. *Fluids*, v. 6, n. 9, p. 330, 2021. <https://doi.org/10.3390/fluids6090330>
- GOUGH, M. K.; CHU, P. C.; PESSANHA, V. S.; CALANTONI, J. Deep burial of a tapered cylinder by an energetic wave event. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, v. 48, n. 2, p. 554-565, 2022. <https://doi.org/10.1109/JOE.2022.3214811>
- GROOT, M. B.; KUDELLA, M.; MEIJERS, P.; OUMERACI, H. Liquefaction Phenomena underneath Marine Gravity Structures Subjected to Wave Loads. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, v. 132, n. 4, p. 325-335, 2006. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-950X\(2006\)132:4\(325\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-950X(2006)132:4(325))
- HSU, J. R. C.; JENG, D. S. Wave-induced soil response in an unsaturated anisotropic seabed of finite thickness. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, v. 18, n. 11, p. 785-807, 1994. <https://doi.org/10.1002/nag.1610181104>
- JENG, D. S. *Mechanics of Wave-Seabed-Structure Interactions*. Cambridge: Cambridge University Press, 2018. <https://doi.org/10.1017/9781316672266>
- KLAMMLER, H.; PENKO, A. M.; STAPLES, T.; SHEREMET, A.; CALANTONI, J. Observations and Modeling of Wave-Induced Burial and Sediment Entrainment: Likely Importance of Degree of Liquefaction. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, v. 126, n. 8, 2021. <https://doi.org/10.1029/2021JC017378>
- KLAMMLER, H.; SHEREMET, A.; CALANTONI, J. Seafloor Burial of Surrogate Unexploded Ordnance by Wave-Induced Sediment Instability. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, v. 45, n. 3, p. 927-936, 2020. <https://doi.org/10.1109/JOE.2019.2919356>
- KRAUSE, P.; BOYLE, D.; BÄSE, F. Comparison of Different Efficiency Criteria for Hydrologic Models. *Advances in Geosciences*, v. 5, p. 89-97, 2005. <https://doi.org/10.5194/adgeo-5-89-2005>
- LESSER, G. R.; ROELVINK, J. A.; VAN KESTER, J. A. T. M.; STELLING, G. S. Development and validation of a three-dimensional morphological model. *Coastal Engineering*, v. 51, n. 8-9, p. 883-915, 2004. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2004.07.014>
- PESSANHA, V. S.; CHU, P. C.; GOUGH, M. K. Sediment accretion in a lower-energetic location during two consecutive cold fronts. *Journal of Operational Oceanography*, v. 16, n. 3, p. 256-266, 2023. <https://doi.org/10.1080/1755876X.2022.2100145>
- PESSANHA, V. S.; CHU, P. C.; GOUGH, M. K.; ORESCANIN, M. M. Coupled model to predict wave-induced liquefaction and morphological changes. *Journal of Sea Research*, v. 192, 102351, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.seares.2023.102351>
- SAKAI, T.; HATANAKA, K.; MASE, H. Wave-Induced Effective Stress in Seabed and Its Momentary Liquefaction. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, v. 118, n. 2, p. 202-206, 1992. [https://doi.org/https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-950X\(1992\)118:2\(202\)](https://doi.org/https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-950X(1992)118:2(202))
- SUMER, M. B. Special Issue on Liquefaction around Marine Structures. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, v. 132, n. 4, 2006. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0733-950X\(2006\)132:4\(225\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0733-950X(2006)132:4(225))
- WILLMOTT, C. J. On the Validation of Models. *Physical Geography*, v. 2, n. 2, p. 184-194, 1981. <https://doi.org/10.1080/02723646.1981.10642213>