

Correntes, ondas e transporte de sedimentos na baía de Nacala, Moçambique

Portela, L. I. (1)

(1) Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), lportela@lnec.pt.

Resumo: A baía de Nacala é um sistema costeiro semi-confinado que acolhe o principal porto do norte de Moçambique. As marés, as correntes, as ondas e o transporte de sedimentos no sistema foram estudados com recurso a modelos hidrodinâmicos e morfodinâmicos. Estima-se que as correntes de maré atinjam velocidades máximas de $0,5 \text{ m s}^{-1}$ à entrada da baía e de $0,2 \text{ m s}^{-1}$ no seu interior. A ondulação do largo quase não se propaga para o interior da baía, onde a agitação é essencialmente de geração local. Estima-se que o transporte de sedimentos arenosos seja significativo apenas para eventos extremos (ciclones tropicais) e circunscrito a uma faixa marginal (acima da batimétrica dos 10 m). Estes resultados parecem consistentes com a distribuição dos sedimentos superficiais da baía, areias e areias siltosas nas zonas pouco profundas e materiais mais finos nas zonas de maior profundidade.

Palavras-chave: hidrodinâmica, Moçambique, modelação, morfodinâmica, sistema costeiro.

1. INTRODUÇÃO

Os sistemas costeiros de Moçambique enfrentam pressões crescentes, sendo necessário assegurar a sua proteção e utilização sustentável (Charrua *et al.*, 2020). Porém, estes sistemas têm sido objeto de um número geralmente reduzido de estudos, notando-se alguma escassez de dados de campo, mesmo no que se refere às condições hidrodinâmicas (Palalane *et al.*, 2016). Afigura-se, por isso, importante contribuir para o seu conhecimento.

A baía de Nacala, localizada na região norte de Moçambique, na província de Nampula ($14^{\circ}30'S$, $40^{\circ}40'E$), exemplifica algumas das transformações económicas e territoriais em curso. Oferecendo notáveis condições de abrigo, constitui um dos melhores portos naturais de águas profundas da África Oriental. Com obras inauguradas em 1951, o porto adquiriu nas décadas seguintes o estatuto de terceiro maior de Moçambique. Em 2013-2015, a atividade portuária sofreu um novo impulso com a construção de um terminal em Nacala-a-Velha, na margem W da baía, dedicado à exportação do carvão extraído na província de Tete. Este terminal apresenta uma cota de serviço da ordem de -20 m ZH (Portela, 2012). Presentemente, estão também a decorrer obras de ampliação e modernização do antigo porto, na margem E da baía.

O primeiro reconhecimento hidrográfico detalhado da baía de Nacala data de 1904. As cartas hidrográficas, como a de 1953, apresentam dados sobre a natureza do fundo. Encontram-se também disponíveis registos de marégrafo de 1975 e 1982 (<http://uhslc.soest.hawaii.edu/home>). Porém, embora tenham sido realizados estudos muito relevantes associados aos novos empreendimentos (Aurecon, 2010; JICA, 2011; Impacto, 2012), não se conhecem medições de correntes e ondas.

O presente trabalho pretende avaliar se a modelação numérica pode contribuir para um conhecimento mais completo de marés, correntes, ondas e transporte de sedimentos na baía de Nacala. Na ausência de observações que permitam a verificação da qualidade dos resultados, procura-se averiguar a consistência desses resultados com os de outros exercícios de modelação nos estudos mencionados.

2. ÁREA DE ESTUDO

A baía de Nacala situa-se num trecho costeiro dominado por formações coralíferas, muito recortado e com baías profundas (Figura 1). A baía encontra-se ligada ao canal de Moçambique pela baía de Fernão Veloso, onde se registam profundidades de 1000 m, reflexo de uma plataforma continental estreita. A profundidade média na baía de Nacala é de cerca de 20 m, verificando-se as profundidades mais elevadas, cerca de 70 m, na zona de entrada, a NE. Com cerca de 16 km por 5 km, a baía tem margens constituídas principalmente por praias e restingas arenosas e, nas zonas mais abrigadas, por rastos de maré e manchas de mangal.

A maré desempenha um papel preponderante no regime hidrodinâmico da baía, sendo as alturas referidas ao Zero Hidrográfico (ZH), em maré viva média, de $+3,9 \text{ m}$ em preia-mar e de $+0,6 \text{ m}$ em baixamar. O ZH está situado $2,25 \text{ m}$ abaixo do nível médio do mar (IH, 2019). Os caudais fluviais parecem pouco significativos (Aurecon, 2010).

Os ventos predominantes, associados às monções, são de S, no semestre de abril-setembro, e de NE, em outubro-março, sendo o rumo S o mais frequente (Portela, 2012). Com base em medições no aeroporto de Nacala em 2016-2020, estima-se que a velocidade média anual, 10 m acima do solo, seja de 5 m s^{-1} (www.windfinder.com).

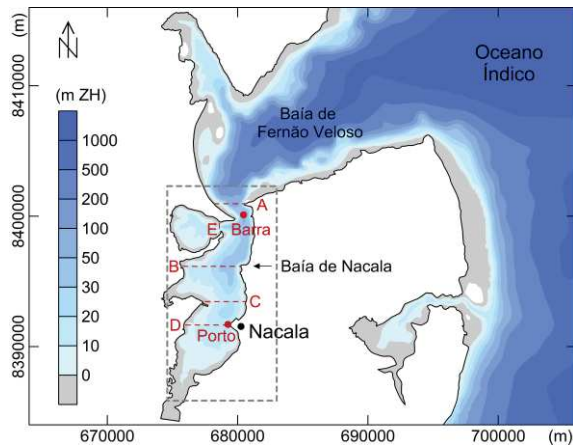


Fig. 1. Baía de Nacala, na região norte de Moçambique. Indica-se a localização das estações pontuais (Barra e Porto) e das secções de cálculo de caudais de maré (A, B, C, D e E).

A costa de Moçambique tem sido atingida em média por um ciclone ou tempestade tropical em cada 1-2 anos (16 eventos no período 1980-2008). A região norte registou 4 ciclones e tempestades tropicais entre 1994 e 2008 (INGC, 2009). É de salientar, pelos seus efeitos em Nacala, o ciclone Nadia, em 1994, embora, ao atingir terra, tenha descido para categoria 1 na escala de Saffir-Simpson, apresentando um valor máximo de velocidade do vento média, durante 1 minuto, de 39 m s^{-1} (INGC, 2009).

O sedimento da baía é dominado por areias e areias siltosas (valor típico de D_{50} de $0,15 \text{ mm}$) nas zonas de menor profundidade e por materiais silto-argilosos nas zonas mais profundas. A espessura da camada sedimentar (entre $0,5$ e 20 m) aumenta das margens para as zonas de maior profundidade (Aurecon, 2010; Portela, 2012).

3. METODOLOGIA

Aplicou-se o sistema de modelos Delft3D (Deltares, 2014, 2015). O domínio abrange a baía de Nacala e a zona exterior adjacente. A malha de cálculo, com passo espacial de 100 m , tem batimetria baseada na carta náutica 0466 do Instituto Hidrográfico (última correção em 2006) e em levantamentos locais mais recentes, de 2010-2011. Na aplicação do modelo hidrodinâmico, adotou-se um período de simulação de 30 dias e um passo temporal de 9 s . Como condição de fronteira oceânica, considerou-se a elevação produzida por uma síntese de 23 constituintes de maré. Nos cálculos com vento, consideraram-se três cenários de vento (w) uniforme: 14 m s^{-1} de S (180°); 14 m s^{-1} de ESE ($112,5^\circ$); e 32 m s^{-1} de NE (45°). Os cenários de vento adotados constituem uma primeira aproximação a condições de tempestade tropical e de ciclone. Procedeu-se à comparação entre valores de alturas de maré e de correntes em duas estações pontuais: Barra e Porto.

Na aplicação do modelo de ondas com os cenários de vento referidos, incluíram-se processos de geração, refração, difração, empolamento, *whitecapping*, atrito

de fundo e rebentação pela profundidade. Como condição de fronteira oceânica, adotou-se uma altura significativa $H_s = 2 \text{ m}$ (3 m no caso de $w = 32 \text{ m s}^{-1}$), um período de pico $T_p = 8 \text{ s}$ e uma direção $\theta_m = 45^\circ$.

Na simulação do transporte de sedimentos não-coesivos e da evolução morfológica do fundo por efeito da interação ondas-correntes, foi adotado um diâmetro mediano $D_{50} = 0,150 \text{ mm}$, uma espessura da camada sedimentar $z_s = 5 \text{ m}$ e uma massa volúmica aparente seca $\rho_d = 1600 \text{ kg m}^{-3}$.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

As curvas de maré calculadas, do tipo semidiurno, com importante variação de amplitude no ciclo maré viva-maré morta ($3,3 \text{ m}$ em maré viva média e $1,0 \text{ m}$ em maré morta média), são muito semelhantes nas duas estações em amplitude e em fase (apresenta-se apenas a da Barra; Figura 2a). As correntes de maré exibem uma variação espacial significativa, sendo as velocidades na Barra duas a três vezes mais elevadas do que na estação situada no interior da baía. Com efeito, na Barra foram calculados valores máximos e médios do módulo da velocidade de $0,34 \text{ m s}^{-1}$ e $0,12 \text{ m s}^{-1}$, respetivamente (Figura 2b), enquanto que no Porto foram calculados valores máximos e médios de $0,14 \text{ m s}^{-1}$ e $0,05 \text{ m s}^{-1}$ (Figura 2c). Analisando todo o domínio, e não apenas as estações pontuais, observa-se um máximo local de $0,53 \text{ m s}^{-1}$ à entrada da baía. Assim, as velocidades máximas obtidas são genericamente concordantes com as indicadas em Aurecon (2010) para o canal de entrada ($0,4 \text{ m s}^{-1}$) e para o interior da baía ($0,1 \text{ m s}^{-1}$).

O prisma de maré calculado à entrada da baía ascende a $0,21 \times 10^9 \text{ m}^3$ para uma maré viva com amplitude de $3,7 \text{ m}$, reduzindo-se a $0,07 \times 10^9 \text{ m}^3$ para uma maré morta com amplitude de $1,3 \text{ m}$ (Figura 2d). Estes valores são muito próximos dos indicados em Impacto (2012). Calcula-se que o caudal de maré máximo instantâneo à entrada da baía, nas condições referidas, varie entre $15 \times 10^3 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ em maré viva e $5 \times 10^3 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ em maré morta.

Apresentam-se os resultados de campos de correntes, em situação de maré viva vazante, para uma situação sem vento (Figura 3a) e com vento de 14 m s^{-1} de S (Figura 3b). A ocorrência de situações de vento forte, excepcionais, conduz a um aumento da velocidade das correntes, principalmente ao longo das áreas de menores profundidades. Para a situação de vento indicada na Figura 3b, calcula-se uma velocidade máxima de $0,62 \text{ m s}^{-1}$ à entrada da baía, mas o efeito do vento no seu interior é proporcionalmente maior. Para um vento de 32 m s^{-1} de NE (45°), calcula-se uma velocidade máxima de $1,25 \text{ m s}^{-1}$, sendo a circulação no interior da baía muito alterada. Este efeito do vento, proporcionalmente maior no interior da baía do que no canal de entrada, parece coincidir com o indicado em Aurecon (2010) para um cenário de ciclone tropical.

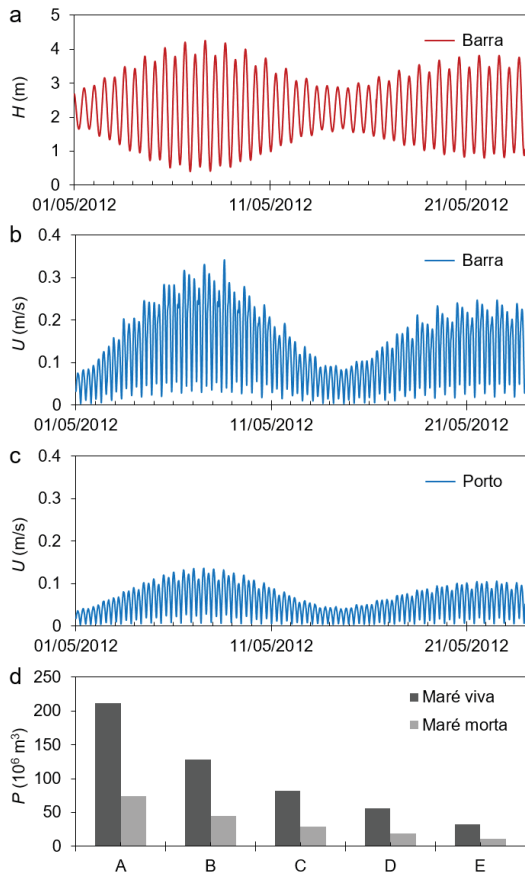


Fig. 2. Valores calculados de **a** altura de maré (m) na Barra, **b**, **c** módulo da velocidade (m s^{-1}) na Barra e no Porto e **d** prisma de maré (10^6 m^3) em cinco secções da baía (apresentadas na Fig. 1) em maré viva e maré morta.

Os resultados obtidos na simulação da agitação marítima (Figura 4) indicam que a agitação do largo praticamente não se propaga para o interior da baía. A agitação na área portuária é essencialmente de geração local, sendo condicionada pelo *fetch* associado ao rumo do vento. Estimou-se uma altura de onda significativa para um vento de 14 m s^{-1} do rumo ESE ($112,5^\circ$) de cerca de 1 m na zona de entrada e um valor máximo de 0,7 m no interior da baía. Para condições extremas, correspondentes a um vento de 32 m s^{-1} do rumo NE (45°), estimou-se que a altura de onda possa atingir cerca de 2 m na zona de entrada e um valor máximo de 1,9 m no interior da baía. Estes resultados afiguram-se compatíveis com a estimativa de uma altura de onda de 2,35 m no interior da baía durante o ciclone Nadia, admitindo uma velocidade do vento superior, apresentada em JICA (2011).

Com base no cálculo do transporte de sedimentos arenosos e da evolução morfológica por correntes e ondas, estima-se que a dinâmica sedimentar apenas seja significativa para eventos de elevada energia (ciclones e tempestades tropicais). Com efeito, os padrões de acumulação e de erosão obtidos para um vento de 14 m s^{-1} do rumo S (180°) indicam evoluções de cota ao fim de 10 dias pouco substanciais e muito localizadas em pontas e restingas arenosas, onde se

sabe que o D_{50} do sedimento tende a ser mais elevado (Aurecon, 2010). Os resultados obtidos com o cenário mais desfavorável, um vento de 32 m s^{-1} do rumo NE (45°), apresentados na Figura 5, mostram uma evolução morfológica acentuada, em particular na margem W e S da baía, mas limitada a uma faixa até uma profundidade de 5 m ou, de forma localizada, de 10 m. Prevê-se, assim, que os fundos situados a maior profundidade se mantenham estáveis mesmo para eventos de elevada energia, o que é muito favorável na perspetiva portuária.

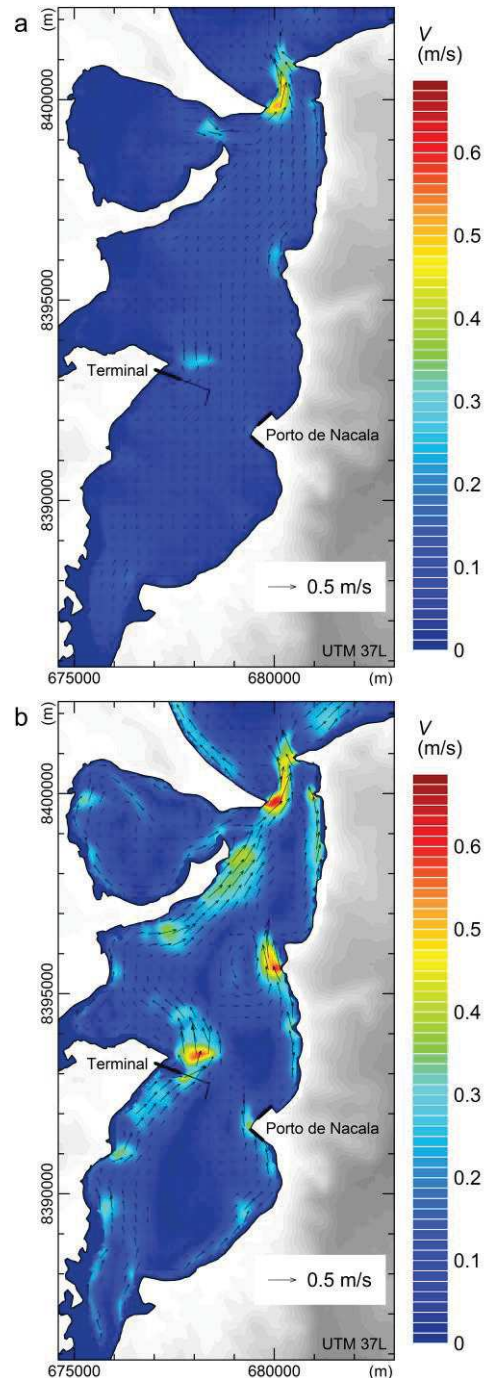


Fig. 3. Campo de velocidades na baía de Nacala em vazante de águas vivas **a** sem vento e **b** com um vento de 14 m s^{-1} do rumo S.

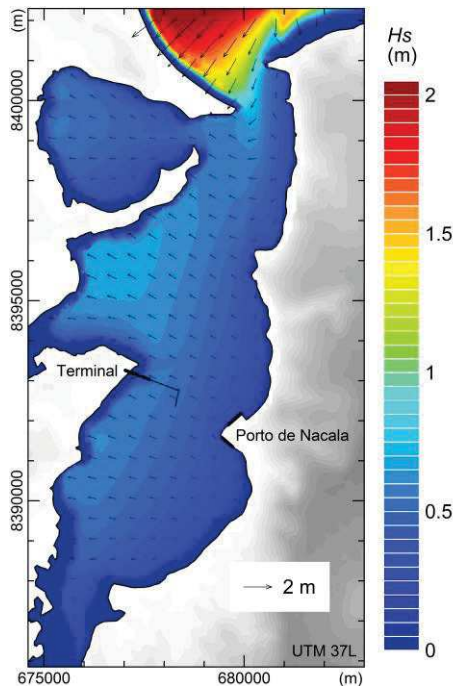


Fig. 4. Altura de onda significativa (m) para um vento de 14 m s^{-1} do rumo ESE ($112,5^\circ$), considerando na fronteira oceânica altura significativa de 2 m, período de 8 s e direção de 45° .

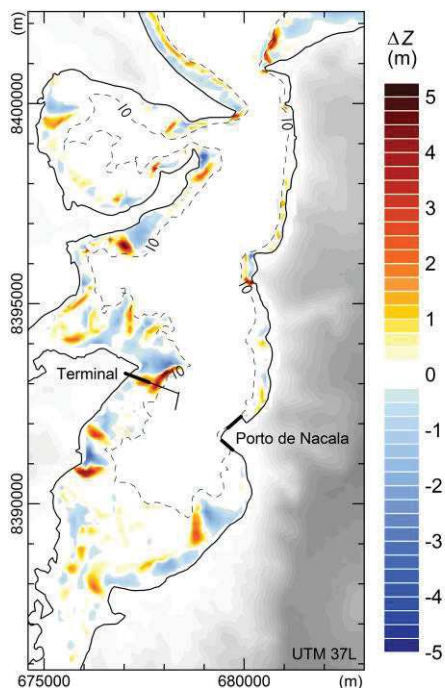


Fig. 5. Padrões de acumulação (+) e erosão (-) (m) de sedimentos arenosos ($D_{50} = 0,150 \text{ mm}$), considerando interação de correntes e ondas, camada sedimentar de 5 m, vento de 32 m s^{-1} do rumo NE e um período de evolução morfológica de 10 dias.

5. CONCLUSÕES

Efetuiu-se um estudo de modelação numérica sobre as principais características hidrodinâmicas e morfodinâmicas da baía da Nacala. Os resultados indicam que o sistema, relativamente profundo, apresenta correntes de maré pouco significativas, com

velocidade máxima de $0,5 \text{ m s}^{-1}$. A agitação marítima exterior praticamente não penetra na baía, pelo que a agitação é de geração local e limitada pelo fetch. A cobertura sedimentar reflete as características hidrodinâmicas do sistema, com maior presença de areias na faixa entre-marés e sedimentos mais finos em profundidade. A dinâmica sedimentar aparenta ser muito limitada. Os episódios de maior dinamismo estarão associados à ocorrência de eventos extremos (ciclones e tempestades tropicais). Mesmo para estes episódios, as condições de abrigo oferecidas pela baía são excepcionais. Os resultados obtidos indicam que a evolução morfológica estará circunscrita a uma faixa marginal, até a uma profundidade de 5 m ou, de forma localizada, 10 m, o que é muito favorável do ponto de vista da utilização portuária.

REFERÊNCIAS

- Aurecon (2010). Projecto do Corredor de Nacala. EIA do Terminal Portuário e Ramal Ferroviário de Nacala-a-Velha. Volume II – Caracterização da situação de referência, 493 pp.
- Charrua, A.B., Bandeira, S.O., Catarino, S., Cabral, P., Romeiras, M.M. (2020). Assessment of the vulnerability of coastal mangrove ecosystems in Mozambique. *Ocean and Coastal Management* 189, 105145.
- Deltares (2014). Delft3D-FLOW. Simulation of multidimensional hydrodynamic flows and transport phenomena, including sediments. User Manual. Version 3.15.34158. Deltares, Delft.
- Deltares (2015). Delft3D-WAVE. Simulation of short-crested waves with SWAN. User Manual. Version 3.05.34160. Deltares, Delft.
- IH (2019). *Tabelas de Maré 2020, volume 2*. Marinha, Instituto Hidrográfico, Lisboa.
- Impacto (2012). Reabilitação e expansão do porto de Nacala. Volume 2 – Relatório do EIA, 280 pp.
- INGC (2009). Climate Change Report: Study on the impact of climate change on disaster risk in Mozambique. Instituto Nacional de Gestão de Calamidades, Moçambique.
- JICA (2011). The Preparatory Survey on Nacala Port Development Project in the Republic of Mozambique. Japan International Cooperation Agency, 262 pp.
- Palalane, J., Larson, M., Hanson, H., Juízo, D. (2016). Coastal erosion in Mozambique: governing processes and remedial measures. *Journal of Coastal Research* 32, 700-718.
- Portela, L.I. (2012) Modelagem de correntes, marés, ondas e transporte de sedimentos na Baía de Nacala. Relatório 252/2012-DHA/NEC, LNEC, Lisboa.