

IMPACTE DO PROLONGAMENTO DO QUEBRA-MAR NORTE DO PORTO DE LEIXÕES NA DINÂMICA SEDIMENTAR

André B. Fortunato, Paula Freire, Filipa S.B.F. Oliveira, Alberto Azevedo, Liliana Pinheiro

Laboratório Nacional de Engenharia Civil

Resumo

Caracteriza-se a dinâmica sedimentar na zona do Porto de Leixões e avalia-se o impacto do prolongamento do quebra-mar norte através da análise de dados de campo e de resultados de modelos numéricos. Sedimentos provenientes do rio Leça depositam-se maioritariamente na zona montante do porto. As melhores condições de abrigo aumentarão esta deposição, reduzindo a sedimentação a jusante. Na zona costeira, o abrigo proporcionado pelos quebra-mares dificulta a mobilização de areia e o seu transporte para o interior do porto. No entanto, forma-se por vezes uma corrente de deriva de sul para norte que é parcialmente capturada pelo porto durante a enchente, podendo transportar areias muito finas para o interior do porto. O prolongamento do quebra-mar dificultará a entrada no porto de areias finas e médias de origem marítima, mas reforçará a captura da deriva litoral pelo quebra-mar norte, potenciando a entrada de areias muito finas no porto. A praia de Matosinhos irá rodar no sentido anti-horário. A médio prazo, a acumulação de areia junto ao quebra-mar sul poderá assorear o canal de acesso, e a erosão a sul poderá fomentar galgamentos na praia. Finalmente, penetra areia no porto através do quebra-mar norte em situações energéticas.

Introdução

A Administração do Porto do Douro, Leixões e Viana do Castelo, S.A. promoveu um conjunto de estudos que visam perspetivar o crescimento do Porto de Leixões com melhores condições de segurança (Fortes et al., 2017). Estão em análise, em particular, o prolongamento do quebra-mar norte, a dragagem do canal de acesso e da bacia de rotação, e a alteração da configuração interior do porto (Figura 1). O Laboratório Nacional de Engenharia Civil contribuiu para este conjunto de estudos através de estudos específicos sobre a agitação marítima e a dinâmica sedimentar, em modelo físico e numérico. A presente comunicação descreve o estudo relativo à dinâmica sedimentar no Porto de Leixões e na sua envolvente.

A zona de estudo é constituída pelo Porto de Leixões e pela praia de Matosinhos, tendo dimensões aproximadas de 3x3 km². Para efeitos de simulação de alguns processos físicos, considera-se um domínio significativamente mais vasto, estendendo-se 50 km para norte e para sul da foz do Douro. Este domínio mais vasto inclui ainda o estuário do Douro até à barragem de Crestuma.

A solução analisada corresponde ao prolongamento do quebra-mar norte em cerca de 300 m. Para além disso, eliminou-se a extremidade do molhe norte antigo (cerca de 50 m) e considerou-se um novo terraplano e um novo porto de pesca com uma profundidade de 3.5 m (Zero Hidrográfico de Leixões – ZHL). Considerou-se ainda uma nova bacia de rotação, com fundos a 15.5 m (ZHL), e um novo cais, com uma profundidade de 14.8 m (ZHL).

Este artigo está organizado em cinco secções para além desta introdução. A metodologia seguida é descrita em primeiro lugar. As secções seguintes descrevem a dinâmica sedimentar na zona de estudo a partir da análise de dados observados e de modelos numéricos. Uma vez que os modelos utilizados são distintos, descreve-se separadamente a dinâmica sedimentar no interior do Porto de Leixões e na praia de Matosinhos. A última secção resume as principais conclusões.

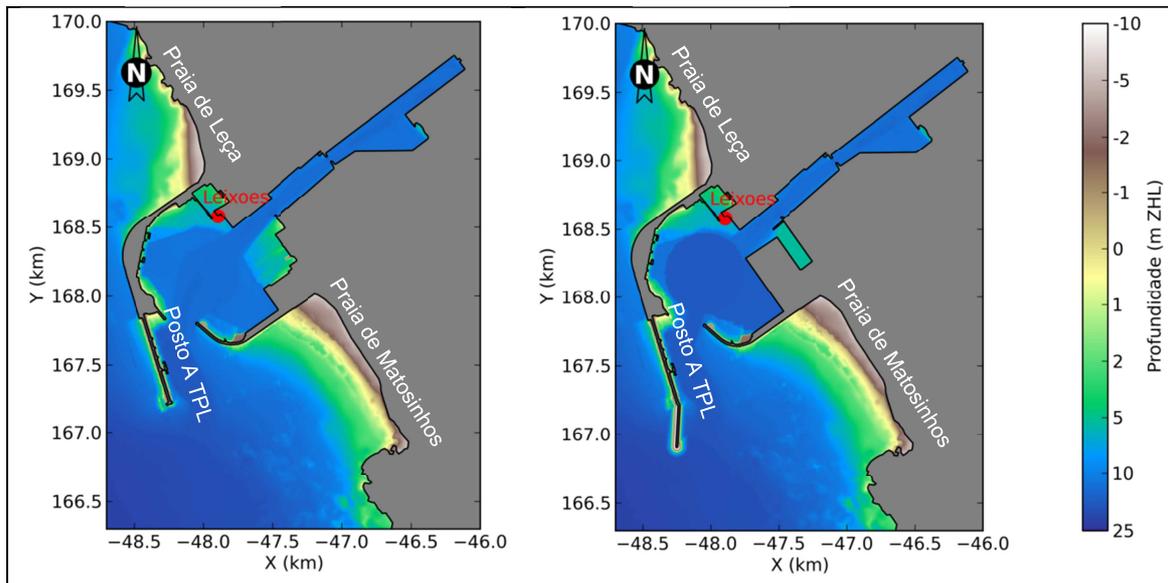


Figura 1. Configurações do Porto de Leixões analisadas: configuração atual (esquerda) e solução analisada (direita).

Metodologia

Com base nos elementos disponíveis foi construído um modelo conceptual da dinâmica sedimentar no Porto de Leixões e identificados os possíveis fluxos sedimentares (Figura 2):



Figura 2. Modelo conceptual da dinâmica sedimentar no Porto de Leixões.

- 1) Trânsito litoral, que poderá ser parcialmente capturado pelo porto.
- 2) Dinâmica da praia de Matosinhos. Embora esta praia esteja confinada a norte pelo quebra-mar sul do Porto de Leixões, uma rotação excessiva desta praia no sentido anti-horário pode conduzir à transposição de areias da praia para o interior do porto.
- 3) Sedimentos provenientes do rio Leça, que podem incluir areias e sedimentos coesivos.

4) Fluxo de areias através do quebra-mar norte. Em situações de forte agitação, os fluxos de água através desta estrutura muito permeável são sentidos nos navios atracados.

Não existindo um modelo de transporte de sedimentos universal, que reproduza todos os processos relevantes, foi escolhido um modelo diferente para cada um destes possíveis fluxos de sedimentos. Assim:

1) O modelo acoplado de circulação, agitação marítima e dinâmica sedimentar SCHISM (Zhang et al., 2016; Guerin et al., 2016) foi usado para simular a dinâmica sedimentar das areias provenientes do trânsito litoral.

2) A dinâmica da praia de Matosinhos foi simulada com o modelo de linha de costa LITLINE (DHI, 2016). As condições de agitação marítimas necessárias para forçar o modelo foram obtidas com o modelo DREAMS (Fortes, 1993), cuja aplicação está descrita em Pinheiro et al. (2017).

3) O destino dos sedimentos provenientes do rio Leça foi simulado com um modelo lagrangeano (VELApart, Oliveira e Fortunato, 2002).

4) Finalmente, os fluxos de areia através do quebra-mar norte não foram explicitamente simulados dado que não serão afetados pelas intervenções previstas.

A aplicação de modelos foi precedida de uma análise aos dados observados, que contribuiu para a compreensão da dinâmica sedimentar e forneceu os dados necessários aos modelos. Esta análise incluiu a comparação de levantamentos hidrográficos da zona do porto realizados na última década, cruzada com a análise dos volumes de dragagem no mesmo período, e a avaliação da evolução morfológica da zona ativa da praia de Matosinhos. Colheram-se ainda amostras de sedimentos no interior e exterior do porto e nas praias de Leça e Matosinhos, tendo sido determinados os respetivos parâmetros granulométricos.

Para caracterizar as condições hidrodinâmicas na zona de estudo foi feita a análise estatística de uma base de dados de *hindcast* de agitação marítima (Oliveira et al., 2017) na costa Portuguesa para o período 1979-2015. Esta análise indicou janeiro de 1991 como um período representativo para a simulação da morfodinâmica a escalas locais. Foi depois aplicado o modelo SCHISM, devidamente validado, para simular níveis, correntes e agitação marítima (Figura 3). Este modelo foi forçado por resultados de modelos regionais de circulação (Fortunato et al., 2016) e agitação marítima (Oliveira et al., 2017).

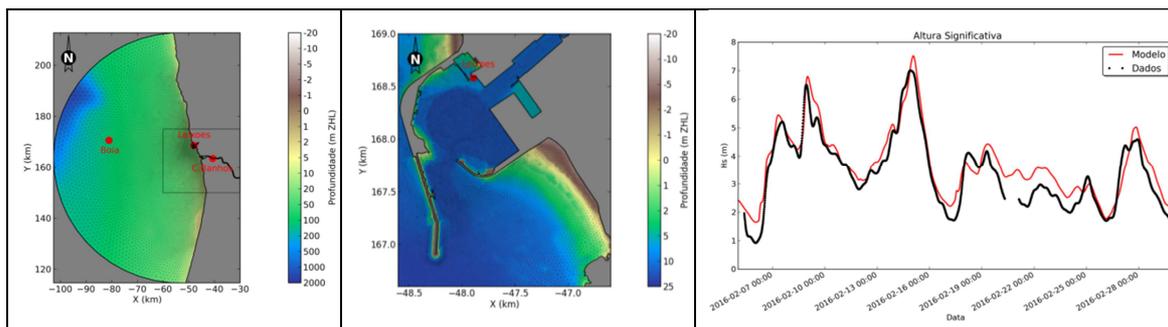


Figura 3. Simulação acoplada da circulação e agitação marítima no Porto de Leixões: malha e domínio de cálculo; detalhe da zona portuária; exemplo de validação do modelo de agitação (modelo SCHISM).

A dinâmica sedimentar na envolvente do Porto de Leixões foi simulada com o modelo SED2D (Guerin et al., 2016) acoplado ao modelo SCHISM. O conjunto de modelos foi aplicado em modo morfodinâmico (i.e., tendo em consideração o efeito da evolução da batimetria nas ondas e nas correntes). O modelo foi previamente adaptado para impedir a erosão em zonas onde os fundos são rochosos (incluindo o manto de tetrápodes do quebra-mar). Com base na informação disponível foram consideradas 5 classes de sedimento, de diâmetros entre 0.1 e 1 mm, com diferente frequência de ocorrência.

A dinâmica dos sedimentos provenientes do rio Leça foi simulada qualitativamente com o modelo VELApart (Oliveira e Fortunato, 2002). Este simula a trajetória dos sedimentos, sujeitos

ao transporte horizontal por advecção, à deposição e à ressuspensão. É forçado pelo campo de correntes provenientes das simulações do modelo SCHISM descritas acima. Um elevado número de partículas foram lançadas na foz do rio Leça a diferentes alturas e instantes, e com diferentes velocidades de queda, e seguidas durante 1 mês. Análises de sensibilidade permitiram minimizar a incerteza.

A dinâmica sedimentar da praia de Matosinhos foi simulada com os modelos LITDRIFT e LITLINE (DHI, 2016). Com estes modelos calculou-se a evolução da linha de costa induzida pelo gradiente do transporte sedimentar longitudinal que resulta da conjugação de vários fatores: variação do clima de agitação marítima ao longo da fronteira do lado mar da zona ativa da praia, variação do perfil transversal de praia, variação da granulometria da areia na praia, efeito das estruturas transversais e longitudinais, e disponibilidade sedimentar nas fronteiras do sistema em estudo.

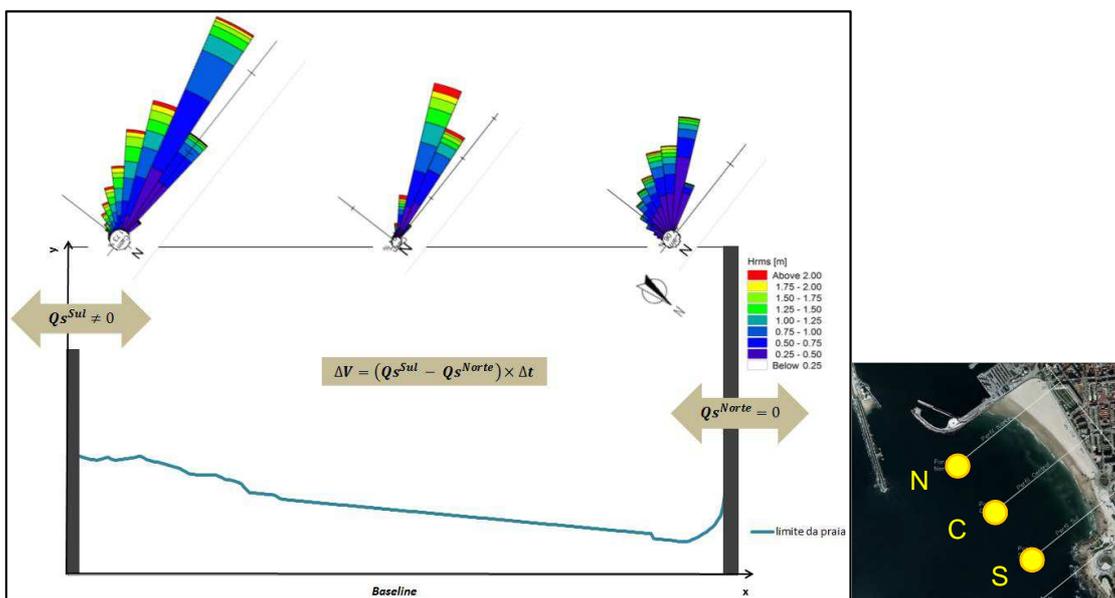


Figura 4. Modelo conceptual adotado para evolução da linha de costa da praia de Matosinhos: condições de fronteira norte e sul, e climas de agitação marítima (entre 2008-2016) nos Pontos Norte (N), Central (C) e Sul (S) para a configuração atual do Porto de Leixões.

Aplicou-se o modelo conceptual sintetizado na Figura 4 num sistema de coordenadas no plano cartesiano local. Como condição de fronteira norte considerou-se a taxa de transporte sedimentar nula, i.e., o bloqueio total do transporte sedimentar longitudinal pelo quebra-mar sul do Porto de Leixões. Como condição de fronteira sul considerou-se o bloqueio parcial do transporte longitudinal de sedimentos pelo promontório a sul da praia, desde a linha de água (de cota variável, devido à maré) até à profundidade 5 m ZHL (profundidade aproximada à qual tem início o perfil arenoso nos levantamentos topo-hidrográficos de 2008, 2012 e 2016). Ao longo da fronteira marítima impôs-se o nível de maré (obtido por síntese harmónica) e condições de agitação marítima definidas por séries temporais no período de estudo (aproximadamente 8 anos, entre junho/2008 e março/2016). As condições de agitação marítima foram obtidas em três pontos em frente à praia, à profundidade 10 m ZHL no levantamento topo-hidrográfico de 2016 (Figura 4), utilizando três matrizes de transferência que relacionam as condições de agitação incidente no exterior do porto com as condições de agitação em cada um dos pontos, respetivamente. Estas matrizes foram construídas através de simulações sistemáticas com os modelos numéricos SWAN (Booij *et al.*, 1999) e DREAMS (Fortes, 1993) com base em toda a gama possível de trios de valores (Hs, Tz, Dir) do regime geral observado ao largo. A série temporal de agitação foi então transferida para cada um dos pontos através de uma interpolação polinomial a três variáveis. As condições para os restantes pontos ao longo da fronteira foram interpoladas pelo modelo. Considerou-se a resolução da linha de costa com um espaçamento $\Delta x=5$ m ao longo da *baseline* e a resolução dos processos

de hidrodinâmica e transporte sedimentar ao longo dos perfis normais à *baseline* com um espaçamento $\Delta y=1$ m. Foram consideradas duas estruturas transversais: um esporão com comprimento superior à extensão da zona ativa localizado a norte da praia para simular o quebra-mar sul do Porto de Leixões e um esporão com comprimento até à profundidade 5 m ZHL localizado a sul da praia para simular o promontório onde se encontra o Forte de S. Francisco Xavier. Considerou-se ainda uma estrutura longitudinal contínua (defesa aderente) para simular o paredão e as infraestruturas fixas que limitam o topo da praia de Matosinhos.

Caracterização da situação atual

Porto de Leixões

No interior do porto os sedimentos superficiais são vasas ricas em matéria orgânica, em que a fração silto-argilosa (partículas com dimensão inferior a $63 \mu\text{m}$) é superior a 95%. Excetua-se a entrada do porto, onde a fração grosseira (partículas com dimensão superior a $63 \mu\text{m}$) dos sedimentos correspondente a 30% da amostra total. Para o exterior, em frente à praia de Matosinhos, a fração grosseira é dominante, não se encontrando no entanto partículas com dimensão superior a 2 mm. O diâmetro mediano das areias varia entre 0.15 e 0.22 mm.

No período analisado (de 2007 a 2016) o volume anual médio de material dragado no Porto de Leixões (dragagens de estabelecimento e de manutenção) é cerca de 200 mil m^3 . O volume de dragagem mais elevado (604 mil m^3) ocorreu em 2014. A componente de material dragado no Posto A TPL é a que mais contribui para o volume total, sendo a fração do volume dragado anualmente nessa zona superior a 59% do volume total. Em média, essa fração é de 84%.



Figura 5. Variação da taxa média anual de evolução dos fundos na zona interior do porto nos períodos 2014-2015 (A) e 2015-2016 (B). Estes valores não consideram as dragagens efetuadas. Fonte da imagem: ESRI Basemap.

Entre 2007 e 2016, a taxa média de evolução dos fundos na zona interior do porto foi no sentido do assoreamento da ordem de 0.2-0.3 m/ano. Excetua-se o período entre 2010 e 2011 em que o valor foi superior (cerca de 1 m/ano), possivelmente devido aos trabalhos de

construção do Terminal de Cruzeiros. Geralmente, zona a montante da bacia de rotação, onde desagua o rio Leça, apresenta uma taxa de assoreamento superior à generalidade do porto (da ordem de 0.4 m/ano no período analisado), o que sugere sedimentação associada a aflúncias fluviais (Figura 5). Em alguns períodos analisados é evidente um maior assoreamento no canal de entrada do porto, sugerindo a sedimentação de material com origem na zona costeira exterior (Figura 5B).

Praia de Matosinhos

Os sedimentos recolhidos na zona subaérea da praia de Matosinhos são areias lavadas de grão médio, variando o diâmetro mediano entre 0.19 e 0.29 mm. Na praia de Leça as areias são mais grosseiras (0.46-0.64 mm).

A comparação de levantamentos e o cálculo de taxas de evolução na praia de Matosinhos para os períodos 2008-2012 e 2012-2016 mostra que há diferenças entre estes períodos. Entre 2008 e 2012 a evolução faz-se no sentido de acumulação com taxa média de 6 700 m³/ano. A análise da evolução da praia neste período, incluindo parte da área subaérea (até à cota de 5.0 m ZHL), mostra uma tendência idêntica com taxa média anual superior em 18 700 m³/ano à obtida para a zona inferior. Entre 2012 e 2016, observa-se tendência erosiva com taxa média de 32 700 m³/ano, em que a erosão parece localizada no setor central estendendo-se para Sul.

Na totalidade do período analisado a evolução faz-se no sentido da erosão com taxa média de 12 600 m³/ano. A análise destes resultados deve ter em conta que no período estudado houve rejeição de material dragado em frente ao terço sul da praia (até cotas de -4 m ZHL), a norte do Castelo do Queijo, que terá certamente influenciado a evolução da praia e a taxa associada. A APDL procede também, ocasionalmente, à transferência de areia da parte norte da praia para a parte sul.

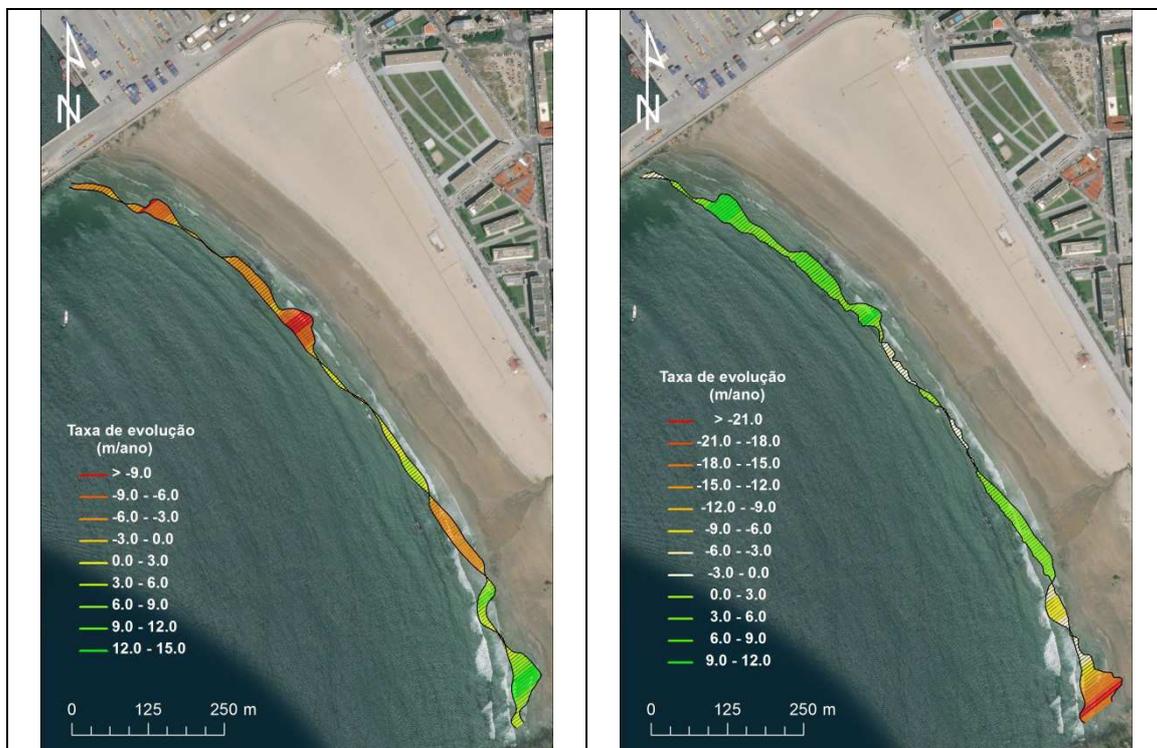


Figura 6. Taxa de evolução (m/ano) da linha do Zero Hidrográfico de Leixões entre 2008 e 2012 (A) e 2012 e 2016 (B). Valores negativos correspondem a recuo e positivos a progradação da linha de costa. Fonte da imagem: ESRI Basemap

A evolução da forma plana da praia de Matosinhos, entre 2008 e 2012, é caracterizada por uma rotação no sentido horário, havendo concordância entre a tendência evolutiva das linhas relativas ao NMM e ZHL (Figura 6A). O valor máximo de recuo no terço norte é de 7.3 m/ano, tendo como linha de referência o NMM, e de 9.8 m/ano para a linha do ZHL. A taxa de progradação máxima a Sul varia entre 6.0 m/ano (NMM) e 15 m/ano (ZHL). A taxa média de evolução de toda a extensão da praia para a linha ZHL é de -0.6 m/ano.

Entre 2012 e 2016 (Figura 6B) observa-se uma alteração significativa da evolução da linha do ZHL, com o maior recuo localizado a Sul (máximo 22.8 m/ano) e progradação nos terços Norte e Central (máximo de 11.0 m/ano). A taxa média de evolução para toda a extensão da praia foi de 1.1 m/ano.

Dinâmica sedimentar no porto de Leixões

Hidrodinâmica

O prolongamento do quebra-mar norte do Porto de Leixões melhora significativamente as condições de abrigo no anteporto e na praia de Matosinhos (Figura 7). Este efeito depende do ângulo de incidência das ondas, mas, em geral, estas condições melhoram em quase toda a praia, e em particular a norte.

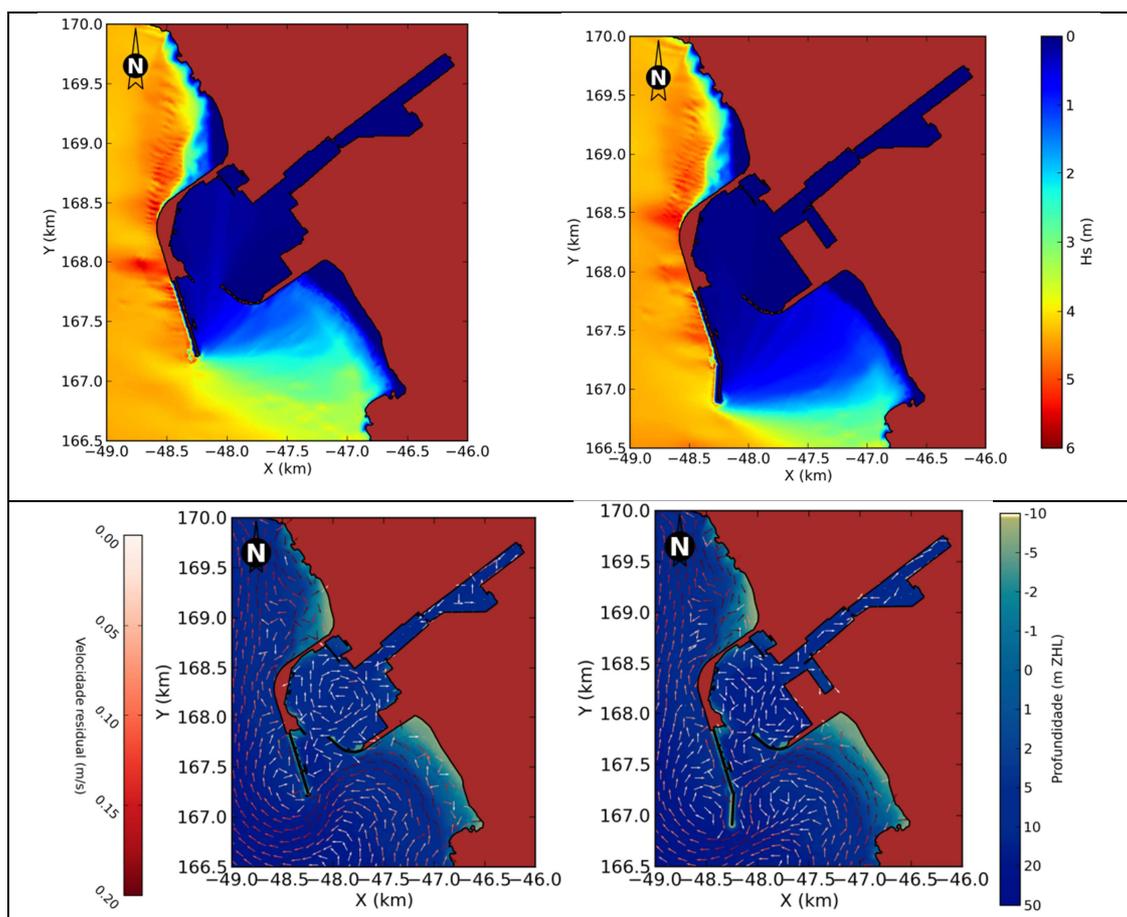


Figura 7. Impacte do prolongamento do quebra-mar norte na hidrodinâmica, obtido com o modelo SCHISM: situação atual (esquerda) e solução ensaiada (direita). Em cima: altura de onda significativa no instante mais energético de janeiro de 1991; em baixo: velocidades residuais durante janeiro de 1991.

As correntes geradas pelas ondas são também afetadas pelo prolongamento do quebra-mar. Em muitas situações, gera-se uma corrente litoral dirigida de sul para norte ao longo da praia

de Matosinhos, como se pode ver pelo campo de velocidades residuais (Figura 7). Durante a enchente, essa corrente litoral é capturada pelo porto, podendo assim transportar material em suspensão para o interior do porto. Este desvio da corrente litoral para o interior do porto é intensificado pelo prolongamento do quebra-mar norte.

Sedimentos provenientes do rio Leça

A dinâmica dos sedimentos provenientes do rio Leça foi analisada com base nos resultados do modelo VELApart. Foram simuladas as trajetórias de cerca de 150 mil partículas de sedimento desde o limite de montante do modelo, onde desagua o rio Leça, até à sua deposição no fundo ou até saírem do porto. Parte destas partículas deposita-se no fundo, e outra parte sai da bacia portuária e é arrastada para o largo.

Os resultados (Quadro 1) indicam que atualmente uma fração significativa dos sedimentos provenientes do rio Leça se depositam no interior do porto, o que é consistente com a análise dos dados. Esta deposição, que aumenta com a velocidade de queda das partículas de sedimento, ocorre sobretudo na zona de montante do porto e junto às margens (Figura 8). O prolongamento do quebra-mar norte aumentará a percentagem de sedimentos depositados, em particular para os sedimentos mais finos (i.e., com menor velocidade de queda). Os resultados sugerem ainda que as taxas de sedimentação baixarão na zona da bacia de rotação, provavelmente porque o aumento da deposição a montante reduzirá a disponibilidade de sedimentos mais a jusante.

Quadro 1. Percentagem de partículas que se depositam no porto para diferentes velocidades de queda (W_s)

	$W_s = 0.05 \text{ mm/s}$	$W_s = 0.1 \text{ mm/s}$	Média
Configuração atual	43	66	55
Solução analisada	89	93	91

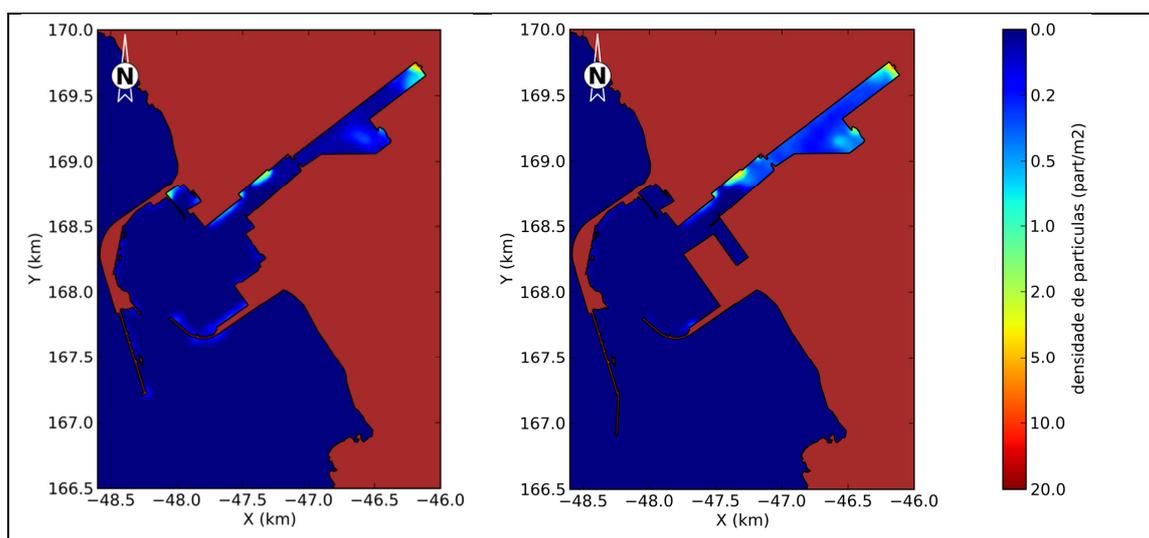


Figura 8. Densidade de partículas depositadas: configuração atual (esquerda) e solução analisada (direita)

Esta análise é apenas qualitativa, dado que os processos de transporte estão reproduzidos de forma simplificada. Por exemplo, espera-se que a capacidade de exportação dos sedimentos para o exterior do porto aumente significativamente com o caudal fluvial, que aqui foi mantido constante. Com efeito, a maiores caudais fluviais corresponderão velocidades mais elevadas na zona montante do porto, e logo um maior transporte para a zona costeira. No entanto, o

assoreamento não diminuirá necessariamente para maiores caudais fluviais, dado que as aflúências de sedimentos ao porto também tenderão a aumentar com o caudal. Assim, uma análise quantitativa do assoreamento do Porto de Leixões por sedimentos de origem fluvial requer dados detalhados sobre as aflúências líquidas e sólidas através da rede hidrográfica.

Trânsito sedimentar e assoreamento

A dinâmica dos sedimentos não coesivos no Porto de Leixões e na sua envolvente durante o mês de janeiro de 1991 foi simulada para as duas configurações. Os resultados são analisados em termos da erosão e do assoreamento no final das simulações, e dos caudais sólidos residuais (Figura 9). Considerou-se uma distribuição espacialmente uniforme de sedimentos, pelo que o modelo tende a sobrestimar o transporte sedimentar em zonas em que os sedimentos são mais grosseiros (Praia de Leça), e a subestimar esse transporte nas zonas em que os sedimentos são mais finos (praia de Matosinhos e Porto de Leixões). Note-se que os caudais sólidos são extremamente sensíveis ao diâmetro dos sedimentos (Pinto et al., 2006).

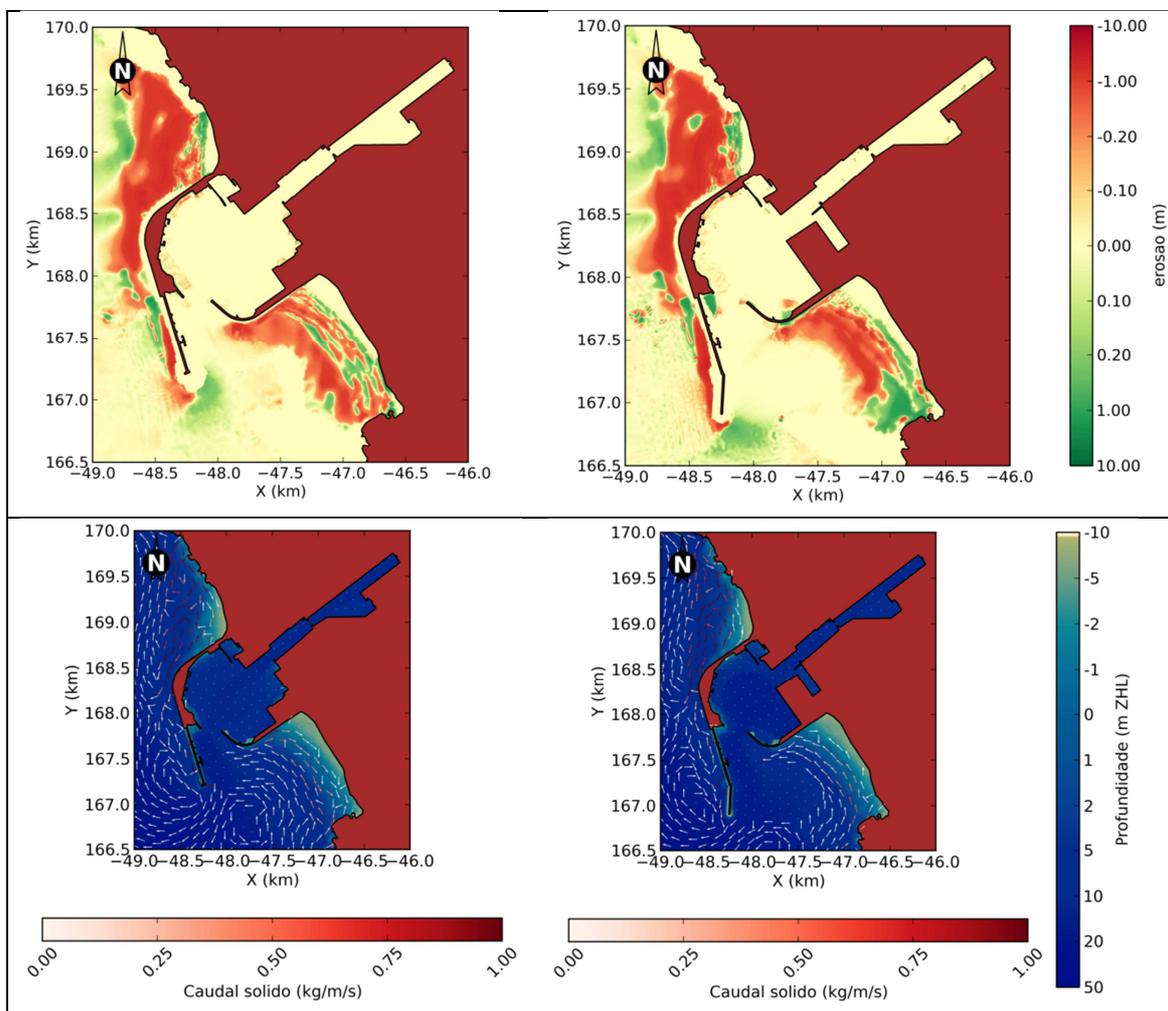


Figura 9. Simulação da dinâmica sedimentar no Porto de Leixões com o modelo SCHISM para a configuração atual (esquerda) e solução analisada (direita): evolução morfológica (em cima) e caudais sólidos residuais (em baixo).

A maior dinâmica sedimentar é observada na praia de Leça. Aqui observa-se o comportamento típico de uma praia sob a ação de uma tempestade, com erosão do topo da praia e o transporte destes sedimentos para maiores profundidades. Esta praia é particularmente dinâmica por estar muito exposta. No entanto, e como referido atrás, a dinâmica sedimentar nesta praia estará provavelmente empolada pela escolha dos diâmetros dos sedimentos.

Na praia de Matosinhos ocorre também uma movimentação significativa de areias, embora menor do que na praia de Leça. Esta diferença tem várias explicações: 1) a praia de Matosinhos está mais protegida do que a de Leça; 2) a batimetria usada na praia de Matosinhos foi medida no fim do inverno (março de 2016) estando por isso provavelmente próxima de um perfil típico de inverno; 3) o modelo tende a sobrestimar o transporte sedimentar na praia de Leça e a subestimá-lo na praia de Matosinhos.

Os caudais sólidos residuais na praia de Matosinhos são dirigidos para norte, provocando uma acumulação de sedimentos junto ao quebra-mar sul. De acordo com o modelo, existe uma extensa zona, incluindo todo o interior do porto e uma zona protegida pelo quebra-mar norte, em que as condições hidrodinâmicas não são suficientes para mobilizar os sedimentos considerados (i.e., com diâmetros superiores ou iguais a 0.1 mm). Este resultado é consistente com os dados sedimentológicos, que apontam para uma quase ausência de areias nos sedimentos superficiais do porto. Assim, os sedimentos não tenderão em geral a penetrar no interior do porto, embora se admita que alguns sedimentos mais finos possam ser transportados em suspensão e depositar-se no anteporto. Observam-se algumas zonas de assoreamento no interior do porto, nomeadamente junto às margens, mas com pouca expressão. Junto à cabeça do molhe norte, os caudais sólidos residuais são dirigidos para o exterior do porto. Este comportamento contribui para que o trânsito litoral não seja capturado pelo porto, reduzindo assim o assoreamento.

Com o prolongamento do molhe norte, observam-se algumas alterações na dinâmica sedimentar. A zona em que as condições hidrodinâmicas não permitem a mobilização dos sedimentos à entrada do porto estende-se centenas de metros para sul e, sobretudo, para este. O anteporto fica assim mais protegido e a extensão da zona sujeita a assoreamento diminui.

Na praia de Matosinhos o padrão de erosão e assoreamento torna-se mais estruturado, com uma maior erosão da zona sul da praia e uma deposição na zona norte. Este comportamento decorre provavelmente da maior proteção do topo norte da praia, que dificulta o transporte de norte para sul. Em resultado deste padrão, tenderá a acumular-se mais areia junto ao molhe sul. A médio prazo, o assoreamento progressivo da zona norte da praia de Matosinhos na solução analisada poderá causar a transposição de sedimentos à volta da cabeça do molhe sul, em particular se a zona sul da praia de Matosinhos for sendo alimentada artificialmente para compensar a erosão. Este aspeto será analisado com mais pormenor na secção seguinte.

Em contraste com o comportamento revelado pela análise dos dados, o modelo não evidencia um assoreamento significativo no interior do porto, e em particular no Posto A TPL. Este contraste sugere que o assoreamento que se verifica no Posto A TPL se deve a um mecanismo não considerado no modelo, concretamente ao atravessamento do quebra-mar norte pelos sedimentos (Figura 2).

Dinâmica da praia de Matosinhos

A dinâmica sedimentar da praia de Matosinhos foi simulada para a configuração atual e para a solução analisada. O efeito das intervenções foi avaliado através da comparação i) da agitação marítima nos Pontos Norte, Central e Sul e ii) da evolução da linha de costa no período de estudo (aproximadamente 8 anos, entre junho de 2008 e março de 2016).

As estatísticas da altura e da direção das ondas confirmam que o Porto de Leixões tem um efeito de abrigo da agitação marítima incidente na praia de Matosinhos e que a solução analisada reforça este efeito relativamente à situação atual: aumenta a frequência de ocorrência das ondas com H_{rms} (altura média quadrática de onda, $H_{rms}=0.706H_s$) inferior a 0.5 m nos Pontos Norte, Central e Sul e reduz a frequência de ocorrência das restantes classes de H_{rms} nos Pontos Norte e Central (Figura 10). No Ponto Sul este decréscimo verifica-se apenas para ondas incidentes com $0.5 \leq H_{rms} < 2.0$ m, pois para ondas com $H_{rms} \geq 2.0$ m, que correspondem a cerca de 7% do total, a frequência de ocorrência das respetivas classes é semelhante ou ligeiramente superior no caso da solução analisada.

A solução analisada tem também um impacte relevante na direção das ondas incidentes em frente à praia, uma vez que se verifica um deslocamento do centro de gravidade do histograma

de direções no sentido das classes de onda incidente mais rodadas a sul nos Pontos Norte, Central e Sul (Figura 10). Este impacte deve-se a duas consequências do prolongamento do quebra-mar: i) a praia, em particular a sua zona norte e central, fica mais protegida das ondas ao largo mais rodadas a norte, aumentando assim a importância relativa das ondas rodadas a sul; e ii) a difração em torno do quebra-mar provoca uma rotação do ângulo de incidência das ondas no sentido anti-horário, aumentando a fração dos rumos incidentes mais rodados a Sul.

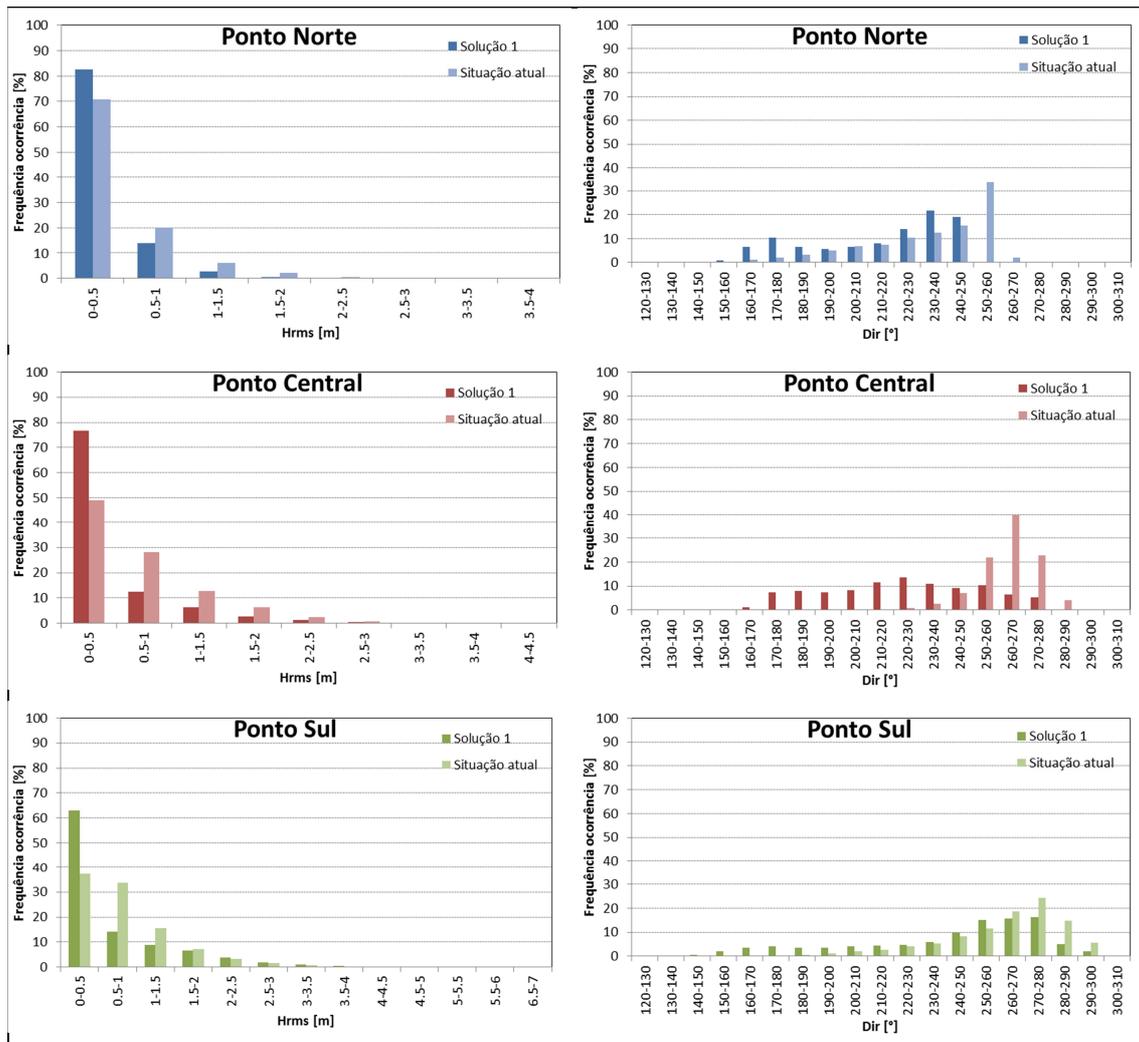


Figura 10. Histogramas de H_{rms} (esquerda) e Dir (direita) no período de estudo (2008-2016), para a configuração atual e a solução analisada, nos Pontos Norte (em cima), Central (no centro) e Sul (em baixo).

Efetuu-se a parametrização da zona ativa da praia nos setores Norte, Central e Sul com recurso ao cálculo da distribuição do transporte sedimentar longitudinal potencial na direção normal à linha de costa induzido pela agitação marítima (nos cerca de 8 anos de estudo). Para cada um destes setores considerou-se o perfil transversal extraído do transepto (normal ao alinhamento médio da linha de costa) que contém o respetivo ponto de agitação marítima Norte, Central e Sul. Desta análise, efetuada para definir os volumes sedimentares envolvidos nas variações morfológicas induzidas pelo gradiente de transporte longitudinal no âmbito da implementação do modelo de evolução da linha de costa, concluiu-se que atualmente a profundidade limite da zona ativa (definida como sendo a zona onde ocorre 99% do transporte total acumulado no perfil transversal) no setor central da praia é aproximadamente 6.5 m ZHL e que, consentaneamente com o gradiente longitudinal da agitação marítima verificado na praia, a extensão desta zona diminui do setor sul para o setor norte, onde é cerca de 350 m.

A solução analisada causa a rotação da forma plana da praia no sentido anti-horário em torno do setor central da praia (Figura 11). O fenómeno resulta da transferência de volume sedimentar do setor sul para o setor norte da praia ao longo do perfil ativo e tem como consequência a variação da largura da praia emersa na direção longitudinal: ocorre um aumento no sector norte, com valor máximo no extremo norte da praia, e uma diminuição no sector sul, com valor mínimo no extremo sul da praia. Este fenómeno deve-se ao facto da solução analisada ter maior efeito de abrigo relativamente às ondas incidentes mais rodadas a norte em frente à praia, em particular nos Pontos Norte e Central, e conferir uma maior exposição da praia aos rumos incidentes mais rodados a sul, em particular nos Pontos Central e Sul, do que a configuração atual, conforme se conclui da análise do efeito da solução analisada na agitação marítima.

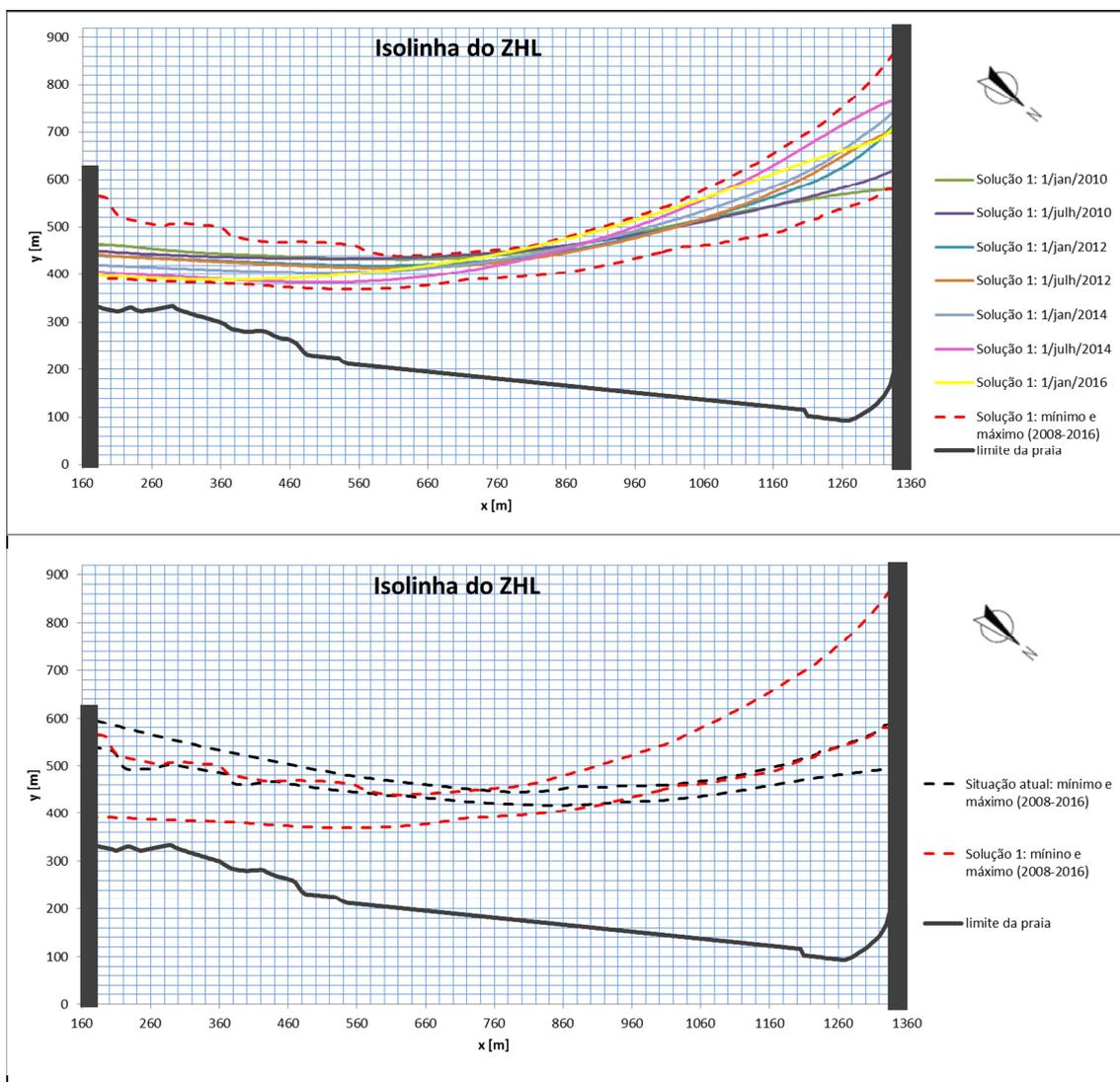


Figura 11. Evolução da isolinha do ZHL da praia de Matosinhos no período de estudo (2008-2016): resultados numéricos para a solução analisada (em cima) e posições extremas alcançadas (máximos e mínimos) para configuração atual e solução analisada (em baixo).

A solução analisada também causa um aumento da amplitude da variação da isolinha do ZHL ao longo da praia de Matosinhos, o qual é maior nos extremos da praia, em particular no extremo norte (Figura 11). Note-se que estes resultados estarão influenciados (majorados) pelo facto da isolinha do ZHL inicial da simulação (observada em 2008) ter uma configuração divergente da tendência da forma plana da praia conferida pela solução analisada. Contudo,

constata-se que no final da simulação ainda se verificam variações significativas da isolinha do ZHL ao longo da praia, como é o caso da isolinha do ZHL nas datas 1/jul/2014 e 1/jan/2016.

Destas conclusões baseadas nos resultados da modelação numérica, salientam-se duas consequências relevantes: i) a solução analisada promove a fuga de sedimentos para o canal de acesso ao porto no extremo norte da praia de Matosinhos, uma vez que a zona ativa da praia adjacente ao quebra-mar sul progride em direção ao mar; e ii) a solução analisada aumenta a vulnerabilidade à erosão e galgamento do setor sul da praia em condições extremas de tempestade marítima, uma vez que é o setor onde simultaneamente se verifica o maior recuo da zona ativa da praia e o muro que limita a praia se encontra mais avançado em direção ao mar. Contudo, a existência de afloramentos rochosos em frente e na zona ativa da praia de Matosinhos, nomeadamente, imediatamente abaixo da profundidade ativa no caso do Perfil Norte e na face de praia no extremo sul, poderá atenuar os dois efeitos apontados.

Conclusões

As alterações à dinâmica sedimentar no Porto de Leixões e na sua envolvente, resultantes do prolongamento do quebra-mar norte, foram estudadas através da recolha e análise de dados e da aplicação de vários modelos numéricos. A situação atual foi caracterizada através da análise de dados de sedimentologia, de batimetria e de volumes de dragagem. Foram implementados modelos de circulação, agitação marítima, transporte sedimentar e evolução da linha de costa. Estes modelos permitiram complementar a compreensão da dinâmica sedimentar atual baseada na análise de dados, e avaliar as alterações que resultarão das intervenções em estudo. Globalmente, estas abordagens complementares permitem tirar conclusões consistentes sobre a dinâmica sedimentar atual e futura.

A dinâmica sedimentar no Porto de Leixões e na sua envolvente pode ser decomposta em diferentes componentes.

A montante, o rio Leça constitui uma importante fonte de sedimentos. Estes sedimentos depositam-se maioritariamente na zona de montante do porto, uma das zonas mais sujeitas a assoreamento. Ao melhorarem as condições de abrigo, as intervenções previstas irão favorecer a deposição destes sedimentos de origem fluvial na zona montante do porto, esperando-se consequentemente uma redução da sedimentação na bacia de manobra.

Na zona costeira, os sedimentos superficiais são constituídos por areias médias na praia de Leça e por areias finas na praia de Matosinhos e no anteporto. O abrigo proporcionado pelos quebra-mares cria condições hidrodinâmicas que não permitem mobilizar estas areias e transportá-las para o interior do porto. No entanto, em determinadas condições de agitação marítima, forma-se uma corrente de deriva de sul para norte que é parcialmente capturada pelo porto durante a enchente. Esta corrente poderá transportar as frações mais finas dos sedimentos presentes na praia (areias muito finas) para o interior do porto. Com o prolongamento do quebra-mar norte, a zona em que não existem condições de mobilização de areias irá estender-se para sul e para este, dificultando ainda mais a penetração de areias finas e médias de origem marítima no interior do porto. Contudo, a captura da deriva litoral pelo quebra-mar norte irá aumentar, potenciando assim a penetração de areias muito finas no porto.

O prolongamento do quebra-mar norte irá também ter consequências na praia de Matosinhos. A melhoria das condições de abrigo na zona norte da praia e as diferentes condições de abrigo proporcionadas à praia em função da direção da agitação conduzirão a uma rotação da praia no sentido anti-horário. Esta rotação reforçará significativamente a tendência de acumulação de areia no extremo norte da praia (junto ao quebra-mar sul) e de erosão da zona sul. Caso esta tendência não seja contrariada por intervenções regulares, a acumulação de areia junto ao quebra-mar sul poderá levar a algum assoreamento no canal de acesso ao porto a médio prazo. Simultaneamente, a erosão no extremo sul da praia poderá fomentar episódios de galgamento nessa zona.

Finalmente há indicações de que, em situações de forte agitação marítima, penetra areia no porto através do quebra-mar norte, o que afeta principalmente o Posto A TPL. Este fenómeno

não foi analisado em detalhe, uma vez que não é previsível que venha a ser afetado pelas intervenções previstas.

Agradecimentos

Este trabalho foi financiado pela Administração do Porto do Douro, Leixões e Viana do Castelo, S.A., a quem se agradece a autorização para publicar este artigo. Agradece-se ao Doutor Thomas Guerin a ajuda na implementação do modelo de transporte de sedimentos SED2D.

Referências

- Booij, N., Ris, R., Holthuijsen, L. 1999. A third-generation wave model for coastal regions. 1. Model description and validation. *Journal of Geophysical Research*, 104: 649-666.
- DHI 2016. *Litpack. Noncohesive Sediment Transport in Currents and Waves. User Guide*. Danish Hydraulic Institute, Denmark.
- Fortes, C.J.E.M. 1993. *Modelação matemática da refração e difração combinadas de ondas marítimas (análise pelo método dos elementos finitos)*. Tese de Mestrado em Engenharia Mecânica, IST, Lisboa, Portugal.
- Fortes, C.J., Lemos, R., Fortunato, A.B., Capitão, R., Pinheiro, L., Neves, M.G., Freire, P., Oliveira, F., Azevedo, A., Lopes, H., Tato, P., Luís, L. (2017). Estudos realizados com vista à melhoria das condições de segurança do acesso marítimo ao Porto de Leixões, 9^{as} *Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária*.
- Fortunato, A.B., Li, K., Bertin, X., Rodrigues, M., Miguez, B.M. 2016. Determination of extreme sea levels along the Iberian Atlantic Coast. *Ocean Engineering*, 111: 471-482.
- Guerin, T., Bertin, X., Dodet, G. 2016. A numerical scheme for coastal morphodynamic modelling on unstructured grids. *Ocean Modelling*, 104: 45–53.
- Oliveira, A., Fortunato, A.B. 2002. *Velapart user's manual: a quasi-3D particle tracking model for shallow water simulations*, Relatório LNEC, 37 pp.
- Oliveira, A., Fortunato, A.B., Capitão, R., Rogeiro, J., Fortes, C.J., Sousa, A. 2017. *Produção de mapas de descritores de agitação marítima na costa de Portugal Continental*, Rel. 138/17, Laboratório Nacional de Engenharia Civil.
- Pinto, L., Fortunato, A.B., Freire, P. 2006. Sensitivity analysis of non-cohesive sediment transport formulae. *Continental Shelf Research*, 26/15: 1826-1839.
- Zhang, Y.J., Ye F., Stanev, E.V., Grashorn, S. 2016. Seamless cross-scale modeling with SCHISM. *Ocean Modelling*, 102: 64-81.