

DEFESA E REABILITAÇÃO DA ORLA COSTEIRA.

AVALIAÇÃO E FORMAS DE INTERVENÇÃO; CASOS DE ESTUDO

A.B. Fortunato, M. Clímaco, F. Oliveira, A. Oliveira, F. Sancho, P. Freire

Investigadores, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, {afortunato, mclimaco, foliveira, aoliveira, fsancho, pfreire}@lnec.pt

Resumo

Apresenta-se uma panorâmica geral sobre a protecção da orla costeira. Referem-se os processos físicos responsáveis pela dinâmica sedimentar, e os principais problemas a ela associados que afectam praias e embocaduras de estuários e lagunas. As soluções mais comuns para este tipo de problemas são depois revistas de forma crítica. Finalmente, três casos de estudo são utilizados para exemplificar problemas e soluções, e, simultaneamente, ilustrar abordagens seguidas em estudos de engenharia: uma praia encaixada em erosão (praia de Hac-Sá, República Popular da China), um sistema composto por três praias, um canal e uma laguna com problemas simultâneos de erosão e assoreamento (praias de Leblon, Ipanema e Arpoador, Brasil) e uma embocadura lagunar com problemas de assoreamento e de estabilidade (Lagoa de Óbidos, Portugal).

Introdução

A orla costeira tem constituído, desde sempre, uma zona de intensa atracção para o Homem por oferecer condições propícias a diversos usos, como a pesca, a agricultura, actividades portuárias e de transporte, a defesa, actividades de lazer, etc. Para além da sua importância socio-económica, a orla costeira apresenta elevado valor ambiental devido à riqueza e variedade dos seus habitats, muitos dos quais proporcionam também a protecção natural das zonas interiores a inundações.

As zonas costeiras são constituídas por diversos elementos morfo-sedimentares, interdependentes entre si através de processos hidrodinâmicos, sedimentares, morfológicos e ecológicos. Estas características conferem à orla costeira uma dinâmica natural complexa, que nem sempre é compatível com os usos a que está sujeita. A sua intensa ocupação e pressão antrópicas (cerca de dois terços da população mundial vive em zonas costeiras) tornam-na cada vez mais vulnerável à acção de factores naturais (tempestades, tsunamis, subida do nível médio do mar) e, também, à própria acção do Homem (redução de fontes sedimentares, dragagens, introdução de fontes de poluição). Como consequência, assiste-se a fenómenos com graves riscos associados, como a erosão costeira, o assoreamento de embocaduras de estuários e de lagunas e a poluição de zonas sensíveis.

Perante o impacto económico, social e ecológico desses fenómenos, e na perspectiva de um aumento dos riscos devido à evolução climática futura, a resposta adequada terá que ser no sentido de um planeamento e gestão integrados. Esta gestão terá necessariamente que se suportar no conhecimento da dinâmica da orla costeira tendo em conta a sua interdependência com o oceano e a zona terrestre, nomeadamente, as bacias hidrográficas. Só neste contexto será possível prever a evolução dos sistemas face a alterações naturais ou introduzidas pelo Homem e propor, quando necessário, medidas mitigadoras adequadas.

Dinâmica sedimentar da orla costeira

Processos físicos

A morfologia do litoral é o resultado visível da dinâmica sedimentar, isto é, das trocas de sedimentos que ocorrem dentro de cada unidade morfo-sedimentar e através das suas fronteiras. Estas trocas ou fluxos de sedimentos são, por sua vez, forçadas pelos agentes ou acções dinâmicas intervenientes na zona costeira, dos quais as mais importantes são: a agitação marítima, as correntes de maré, o vento, as correntes litorais e o caudal fluvial (em embocaduras). A importância relativa destes agentes varia de local para local, sendo, no entanto, comum a forte predominância da acção de marés em estuários, e da agitação marítima e das correntes litorais em costas oceânicas abertas. Por outro lado, o transporte de sedimentos médio anual em qualquer zona costeira resulta do efeito acumulado dos transportes associados aos vários agentes, que variam ao longo do tempo, com realce para a possibilidade de, por vezes (e.g., durante tempestades marítimas), poderem ocorrer alterações morfológicas rápidas e significativas. Destaque-se por último a ocorrência de tsunamis – ondas geradas por maremotos e deslizamentos para o mar de grandes massas de terra – que apesar de ocorrerem com muito baixa frequência, podem provocar enorme transporte de sedimentos e, conseqüentemente, ocasionar bruscas e expressivas alterações na morfologia litoral.

Dada a sua complexidade, o transporte litoral de sedimentos é geralmente abordado segundo as duas componentes: transversal e paralela à costa. Na primeira componente prevalece o transporte pelas ondas e correntes transversais, enquanto na segunda os sedimentos são arrastados predominantemente pelas correntes longilitorais.

Principais problemas

O resultado do balanço sedimentar em determinada zona costeira, isto é, o balanço entre os sedimentos que entram e que saem essa zona, determina o equilíbrio ou o desequilíbrio da mesma. Um litoral em desequilíbrio pode, assim, encontrar-se em erosão (retrocesso da linha de costa) ou em acreção (avanço da linha de costa). A erosão costeira constitui um dos principais problemas de gestão do litoral, implicando a perda directa de território terrestre e a alteração das actividades humanas em seu redor. Em particular, a erosão costeira pode-se traduzir, entre outros, em perda de património construído ou natural, custo acrescido de protecção ou de reconstrução, deslocação de pessoas e de actividades económicas, e inconveniente para a actividade turística (em expansão mundial). A erosão costeira é um processo natural, mas que é muitas vezes também provocado ou exacerbado por acções antrópicas. Actualmente, 20% da costa europeia encontra-se em erosão, sendo que igual percentagem da população vive em municípios litorais (Projecto EUROSION, <http://www.eurosion.org/>). Estes números mostram a importância deste fenómeno a nível europeu, que tem paralelo a nível mundial.

Enquanto a erosão é a principal preocupação em praias, o assoreamento é frequentemente um problema nas embocaduras de estuários e lagunas.

As embocaduras são zonas morfológicamente complexas, constituídas por canais e bancos de areia, onde o transporte de sedimentos é controlado pela acção conjunta das ondas e das correntes de maré (Fortunato, 2006). As embocaduras constituem a via de comunicação entre os estuários e o mar, para embarcações, para a matéria dissolvida e em suspensão na água e para os próprios seres vivos, o que lhes confere uma grande importância económica e ambiental.

O estudo da sua dinâmica sedimentar reveste-se de uma grande complexidade, que deriva fundamentalmente dos equilíbrios por vezes delicados entre agentes de características marcadamente diferentes (Fortunato, 2006): por um lado, a agitação marítima, que promove o assoreamento, e, por outro, as correntes devidas à maré e aos caudais fluviais, que favorecem a abertura das embocaduras. Estes agentes interagem entre si de várias formas, como a geração

de correntes pela agitação, a refração das ondas pelas correntes e o incremento das tensões de atrito pelas ondas. Por exemplo, a agitação marítima é responsável pelo trânsito litoral, que, ao ser interceptado pelas embocaduras, favorece o seu assoreamento.

A estabilidade das embocaduras estuarinas e lagunares decorre geralmente de um equilíbrio, por vezes precário, entre a enchente e a agitação marítima, que tendem a colmatar a embocadura, e o jacto de vazante, que tende a mantê-la aberta (Bruun, 1978). Este equilíbrio dinâmico pode ser quebrado por acontecimentos naturais ou por intervenções humanas, levando a grandes alterações morfológicas, tais como o fecho da embocadura ou a migração da aberta. Exemplos de acontecimentos naturais incluem grandes temporais, cheias, furacões ou tsunamis, que podem alterar radicalmente a fisiografia de uma embocadura em muito pouco tempo.

Algumas intervenções humanas podem também gerar alterações importantes em embocaduras. São exemplos a perda de área das lagunas por aterros para urbanização e construção de salinas, que conduzem a reduções do prisma de maré e conseqüentemente da capacidade das correntes de vazante de expulsarem os sedimentos marinhos, e a construção de esporões nas praias adjacentes a embocaduras, que altera o afluxo natural de sedimentos às mesmas.

As alterações morfológicas das embocaduras podem ainda causar problemas de qualidade da água e riscos materiais (Fortunato, 2006). O seu assoreamento dificulta as trocas entre estas lagunas e o mar, contribuindo para os problemas de qualidade da água nestas lagunas (Oliveira *et al.*, 2006), os quais podem ter graves conseqüências económicas e ambientais, tais como a proibição da apanha de bivalves e a ocorrência de mortandades de peixes. A migração das embocaduras pode também pôr em risco o património construído, tal como construções marginais e vias de comunicação.

Causas

A erosão costeira e o assoreamento de embocaduras ocorrem, muitas vezes, naturalmente. No entanto, em múltiplos casos, são as acções humanas, directa ou indirectamente, que alteram a evolução natural dos sistemas e potenciam a ocorrência desses fenómenos, que pelo impacto negativo que conduzem, se tornam em problemas.

Como principais causas dos problemas referidos, encontram-se a redução de fontes aluvionares, a interrupção do trânsito litoral e as alterações climáticas. Relativamente à primeira, tem-se verificado em inúmeros casos uma redução da quantidade de sedimentos (média anual) que chega à zona costeira resultante da construção de barragens ao longo dos rios, da execução de obras de regularização nestes, da extracção de inertes e da execução de dragagens para a criação ou manutenção de canais de navegação. Outras acções humanas, com por exemplo, a edificação no litoral e nas margens de rios e estuários, têm também contribuído para a alteração das condições naturais e das fontes aluvionares, agravando os problemas mencionados.

Por seu turno, a construção de portos, molhes de embocaduras e outras obras costeiras (p. ex., esporões, quebra-mares e defesas frontais) pode provocar a interrupção do trânsito litoral de sedimentos predominante em determinada zona, alterando o equilíbrio (dinâmico) existente. Desta alteração resulta, frequentemente, a erosão costeira a sotamar das estruturas marítimas e acreção a barlamar.

Por fim, destaque-se a crescente preocupação com as alterações climáticas (Santos *et al.*, 2002; Santos e Miranda, 2006), em particular com a subida do nível do mar, e suas implicações na zona costeira, nomeadamente, o recuo da linha de costa. No entanto, outros factores como o potencial aumento da frequência e intensidade de tempestades marítimas e a alteração da direcção predominante da agitação marítima podem exacerbar os problemas de erosão costeira e de assoreamento de embocaduras.

Soluções

Praias

Referem-se, em primeiro lugar, os tradicionais métodos de protecção costeira: defesas longitudinais aderentes; esporões; quebra-mares destacados; e alimentação artificial.

As defesas longitudinais aderentes (Figura 1) são usadas, em geral, em situações de emergência em que é necessário proteger a todo o custo património em risco ou em obras de carácter definitivo para protecção costeira, contra a erosão ou inundação. Pelo acréscimo de reflexões e turbulência que originam, estas obras podem induzir efeitos erosivos na orla arenosa subjacente e nas zonas contíguas adjacentes.



Figura 1 – Exemplo de defesa longitudinal aderente na praia de Castro Urdiales (Cantábria, Espanha).

Num dado trecho de costa, quando existe um desequilíbrio significativo do seu balanço aluvionar, isto é, quando sai mais material do que entra nesse trecho, a construção de esporões (Figura 2) pode permitir uma reorientação da costa, reduzindo a intensidade do transporte e reequilibrando o balanço aluvionar no trecho. A saturação sedimentar dos esporões com areias por meio de um enchimento artificial pode minimizar os eventuais impactes negativos temporários do corte sedimentar provocado por aquelas obras. Os esporões têm efeitos secundários muito diferentes consoante sejam utilizados como obras de retenção ou de contenção. Na segunda hipótese, os efeitos secundários são bastante reduzidos. Têm sido usados na estabilização da costa, em alguns casos conjuntamente com alimentação artificial, e na fixação de embocaduras.



Figura 2 – Exemplos de campos de esporões: restinga do Lobito (Angola) e Costa de Caparica (Portugal).

Os quebra-mares destacados (Figura 3) são mais aplicáveis em zonas onde a energia da agitação marítima e as amplitudes de maré são moderadas ou reduzidas.

O seu funcionamento hidráulico pode ser caracterizado pela capacidade de dissipar energia e de proporcionar condições de deposição das areias entre a linha de costa e a estrutura.

Estas obras modificam os processos de transporte longitudinal e transversal, podendo conseguir-se com a sua utilização o controlo e a reversão de uma dada situação de erosão.



Figura 3 – Exemplo de quebra-mares destacados na praia de O Palo (Málaga - Espanha).

A praia constitui ela própria a melhor forma de dissipar a energia das ondas. O método de alimentação artificial (Figura 4) está sobretudo indicado para casos de alargamento de praias, de criação de praias artificiais ou em algumas situações em que existe um défice aluvionar de valor baixo.

A alimentação artificial é mais viável técnica e economicamente quando se verificam conjuntamente as seguintes quatro condições: tratar-se de uma zona de grande importância turística ou densamente povoada; o regime de agitação marítima ser moderado; existirem reservas de areia adequada em locais próximos; e não haver grandes condicionalismos ambientais e ecológicos. É evidente que estas quatro condições raramente existem simultaneamente, inviabilizando muitas vezes o recurso a este método.

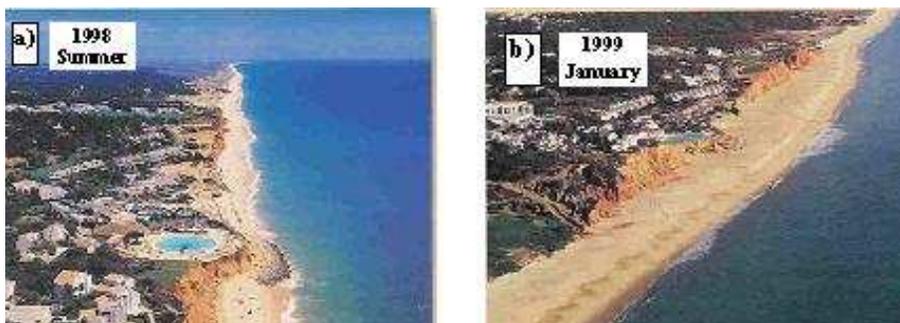


Figura 4 – Exemplo de alimentação artificial na praia de Vale do Lobo (Portugal). Situações anterior (a) e posterior (b) à alimentação artificial.

Não há regras simples nem gerais para a escolha do melhor método de protecção costeira a utilizar. Essa escolha depende de vários factores, de que se destacam: os valores globais e resultante dos trânsitos sedimentares; o clima de agitação marítima; o regime de marés; a morfologia e a geologia da costa; a configuração do perfil arenoso; as características das areias; a disponibilidade de reservas de areias; e a experiência de anteriores obras de protecção.

Para além da intensa investigação sobre os métodos tradicionais referidos, tem sido feito de ambos os lados do Atlântico, um grande esforço no desenvolvimento de novas tecnologias de protecção costeira de baixo custo. Como exemplos de soluções de protecção menos

convencionais (Figura 5) referem-se: os sacos de polipropileno cheios de areia; os gabions; e os geotêxteis.

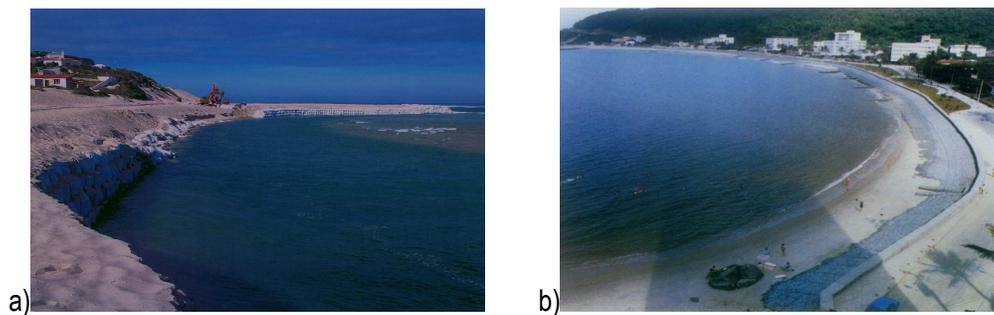


Figura 5 – Exemplos de protecção costeira: a) sacos de polipropileno na margem sul da Lagoa de Óbidos (Portugal); b) gabions na Praia de Caiobá (Paraná - Brasil).

Embora existam situações de aplicação de algumas novas tecnologias com sucesso, de um modo geral, os resultados obtidos ficaram aquém do esperado, e geralmente só são aplicáveis em zonas costeiras de energia moderada ou reduzida.

Das experiências nacional e internacional do LNEC, pode-se concluir que a maior utilização de um método em detrimento dos outros tem a ver com as condições específicas de cada país, para além da política nacional definida nesta matéria. Essas condições específicas são, por exemplo: as características e condições naturais da costa; a tradição e experiência; e os materiais e tecnologias disponíveis.

Embocaduras

As soluções para resolução dos problemas de instabilidade, assoreamento e meanderização de embocaduras podem ser agrupadas em dois tipos de abordagens distintas:

- Soluções baseadas em obras fixas visíveis (incluindo quebra-mares salientes, quebra-mares aderentes e muros guia);
- Dragagens e outras soluções (dragagens de estabelecimento de canais e reposicionamento da embocadura, descarregadores de areia e sistemas de transposição – *by-pass* – de areias).

A utilização de quebra-mares salientes para fixar e estabilizar embocaduras é uma solução clássica, utilizada na grande maioria das embocaduras (Figura 6). Apesar de existirem casos em que não se revelou eficaz (Figura 6), esta é sem dúvida a solução mais comum para o tipo de problema em análise. Têm simultaneamente como objectivo fixar a embocadura, evitar a penetração de sedimentos de origem marinha no estuário e concentrar as correntes de vazante para favorecer a saída de sedimentos.

Os quebra-mares aderentes (Figura 7) não constituem uma solução completa para os problemas das embocaduras, dado que não impedem a migração da aberta ou reduzem o assoreamento do corpo de água a montante. No entanto, podem contribuir para alguma redução destes problemas, na medida em que podem impedir o progresso da meandrização do canal da embocadura em direcção às margens.

Os diques de guiamento têm sido também aplicados em alguns locais, com o objectivo de evitar a meandrização dos canais da embocadura (Figura 8). Estas obras contribuem para o bom funcionamento hidráulico do sistema, ao limitar a meandrização do canal. O dique de guiamento construído na margem norte da Lagoa de Óbidos em Portugal (Figura 8) tem funcionado de

forma adequada, evitando a meandrização para Norte do canal da embocadura e protegendo esta margem. Este sucesso motivou a proposta de um dique de guiamento para a margem sul, como parte integrante de uma solução mais vasta para a embocadura da Lagoa de Óbidos (Fortunato e Oliveira, 2004).



Figura 6 – Exemplos de aplicação de quebra-mares para estabilização de embocaduras: Lagoa Rodrigo de Freitas, Brasil (cortesia da Fundação Rio Águas), e Fish Pass, E.U.A. (Davies e Zarillo, 2003).



Figura 7 – Quebra-mar aderente à margem (in Clímaco, 2003).

Outra solução utilizada (Seabergh, 2002) consiste na construção de descarregadores de areia (*sand traps*). Estas estruturas visam promover a deposição de areia em locais pré-definidos, nos quais é fácil dragar, evitando o assoreamento em locais onde o assoreamento é mais indesejável. Este tipo de solução permite manter os canais de navegação operacionais com menor frequência e custo de dragagem. Os descarregadores de areia são adequados para costas onde o transporte litoral tem um sentido dominante bem marcado. As areias que se depositam nos descarregadores são dragadas e lançadas a sotamar da embocadura, de forma a continuarem o seu trânsito litoral. Esta solução é também geralmente associada à presença de quebra-mares salientes.

Os problemas associados ao assoreamento de embocaduras estão frequentemente associados à presença de trânsito litoral intenso com um sentido bem definido. Para este tipo de problemas existe uma nova abordagem – sistemas de transposição de areias – que permite interceptar os sedimentos a montante da embocadura (por bombagem), evitando a acumulação no canal de acesso, e transpô-los para jusante, de modo a evitar a erosão nas praias nesta zona, o que

ocorre frequentemente quando se constroem estruturas de retenção a montante como esporões ou quebra-mares salientes. O sistema de transposição de areias na embocadura do rio Tweed na Austrália é um exemplo da aplicação destes sistemas.



Figura 8 – Dique de guiamento junto à Foz do Arelho, Portugal.

Casos de estudo

Hac-Sá (República Popular da China)

Em Outubro de 2000 ocorreu um surto erosivo no trecho sul da praia de Hac-Sá, localizada na ilha de Coloane em Macau, que causou uma redução considerável de largura da faixa arenosa, um rebaixamento do perfil da praia emersa e a destruição de infra-estruturas, de apoio balnear e outras, localizadas no topo da praia (Figura 9). Dado o elevado impacto socio-económico desta situação, foi solicitado ao LNEC um estudo de diagnóstico das causas do surto erosivo e uma proposta de soluções alternativas de reabilitação da praia. O estudo compreendeu duas fases: na primeira, caracterizou-se a situação actual da hidrodinâmica e dinâmica sedimentar e diagnosticaram-se as causas do surto erosivo; na segunda, estudaram-se soluções alternativas de reabilitação baseadas em alimentação artificial e obras fixas.

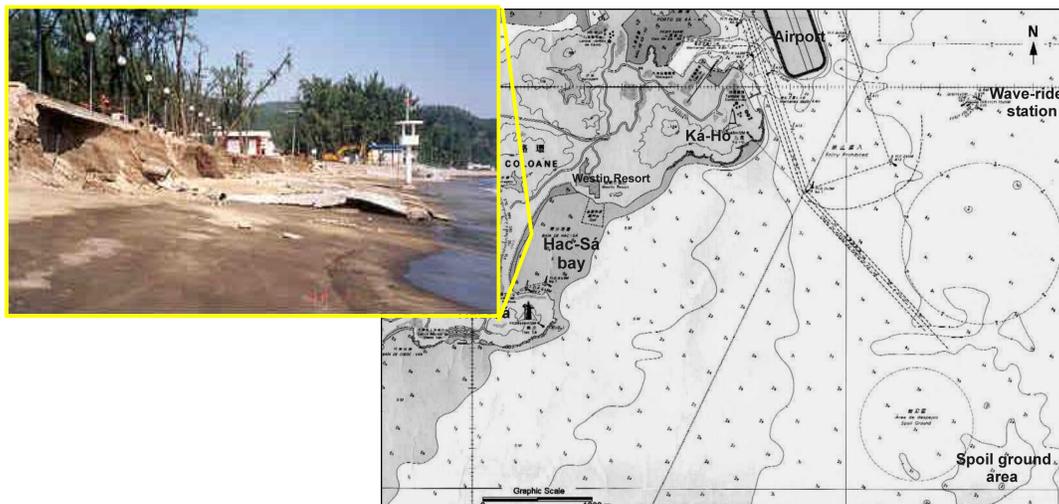


Figura 9 – Baía de Hac-Sá (baseado no mapa “Macau, China. Portos de Macau, Taipa e Coloane.”, 2001, Capitania dos Portos); e fotografia do impacto da erosão em Outubro de 2000.

A praia de Hac-Sá, com cerca de 1,2 km de extensão e desenvolvimento longitudinal na direcção NNE-SSW, é uma praia encaixada entre dois promontórios e exposta a ESE (Figura 9). A face da praia é constituída principalmente por areia fina escura com diâmetro mediano de 17 mm, sendo, no entanto, possível observar areia branca (constituída maioritariamente por quartzo) com diâmetro mediano entre 0.3 e 1.5 mm, desde o sector central ao sector norte da praia. Na zona submersa, desde aproximadamente 1.8 m abaixo do nível médio, o fundo marítimo é constituído por lodo com elevado conteúdo de argila (superior a 38%), sendo o diâmetro mediano variável entre 2 e 9 μm , e o declive médio é bastante suave (cerca de 0.2%).

A metodologia aplicada na caracterização da dinâmica sedimentar baseou-se: i) na caracterização dos agentes forçadores da dinâmica costeira com importância local (regime de ventos, tufões, maré astronómica, sobrelevação meteorológica, regime de correntes e regime de agitação marítima), realizada através da análise de séries de registos meteorológicos (vento, pressão atmosférica e pluviosidade), de registos de agitação marítima (obtidos pela bóia-ondógrafo, assinalada na Figura 9) e de registos do nível do mar; ii) na avaliação da evolução morfológica recente do sistema praia (inclui fundo marítimo e contorno terrestre), realizada através da comparação de levantamentos topo-hidrográficos da zona de estudo (com extensão até 5 km da praia, onde se localiza o banco de depósito de dragados, assinalado na Figura 9), entre si, e com fotografias aéreas rectificadas, de diferentes datas (desde 1985); e iii) na avaliação dos processos de dinâmica sedimentar (transporte sedimentar longitudinal e transversal) e seus mecanismos de interacção, realizada através de modelação matemática (de propagação de ondas marítimas, de evolução do perfil de praia a curto prazo e de evolução da linha de costa a médio e longo prazo).

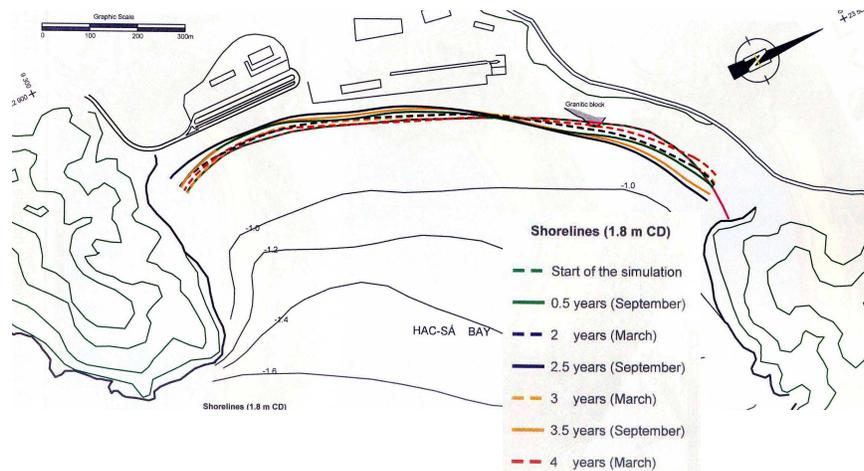


Figura 10 – Variações sazonais da linha de costa anteriores à erosão de Outubro de 2000.

O estudo mostrou que a linha de costa tem grandes oscilações sazonais (Figura 10) em resposta às condições de agitação marítima, especificamente, à variabilidade significativa da direcção das ondas (Oliveira, 2003a). Dadas as características geomorfológicas de praia encaixada, o transporte longitudinal líquido é nulo, ou seja, a movimentação sedimentar está confinada entre os promontórios. No entanto, o transporte longitudinal total anual médio é cerca de $120 \times 10^3 \text{ m}^3$: de Abril a Setembro o transporte total residual ($60 \times 10^3 \text{ m}^3$) tem sentido para Norte, produzindo um aumento da largura de praia no extremo norte e diminuição no extremo sul; de Outubro a Março verifica-se o oposto, sendo no final de Março a ocasião em que o sector sul da praia apresenta a maior largura de praia do ano (Oliveira et al., 2003). Relativamente à distribuição

transversal do transporte longitudinal, concluiu-se que o transporte longitudinal se prolonga desde a face da praia até 2,8 m abaixo do nível médio. Através da simulação matemática de eventos de tempestade, também foi possível concluir sobre a resposta do perfil de praia relativamente à acção erosiva das ondas: nestas condições, em que predomina o transporte transversal de sedimentos, verifica-se um rápido recuo do perfil de praia, que no caso de uma tempestade típica para esta zona chega a alcançar cerca de 10 m (Oliveira, 2003b).

Nas 3 últimas décadas, a baía de Hac-Sá sofreu grandes alterações, quer no seu contorno terrestre quer no seu fundo: i) os promontórios foram alargados sobre o mar através de aterros e posterior protecção da acção das ondas com enrocamento (Figura 11); ii) construíram-se infra-estruturas, de apoio balnear e outras, na parte superior da praia (Figura 11), bastante avançadas em particular no sector sul, que causaram a redução da largura de praia; iii) ocorreu um assoreamento generalizado (à taxa média 2-3 cm/ano), dentro e em frente à baía (Figura 12), devido à alteração das condições hidrodinâmicas causadas pela construção do aeroporto de Macau (assinalado na Figura 9); e iv) verificou-se o crescimento de um banco de areia em frente à praia devido à deposição de dragados (assinalado na Figura 9).

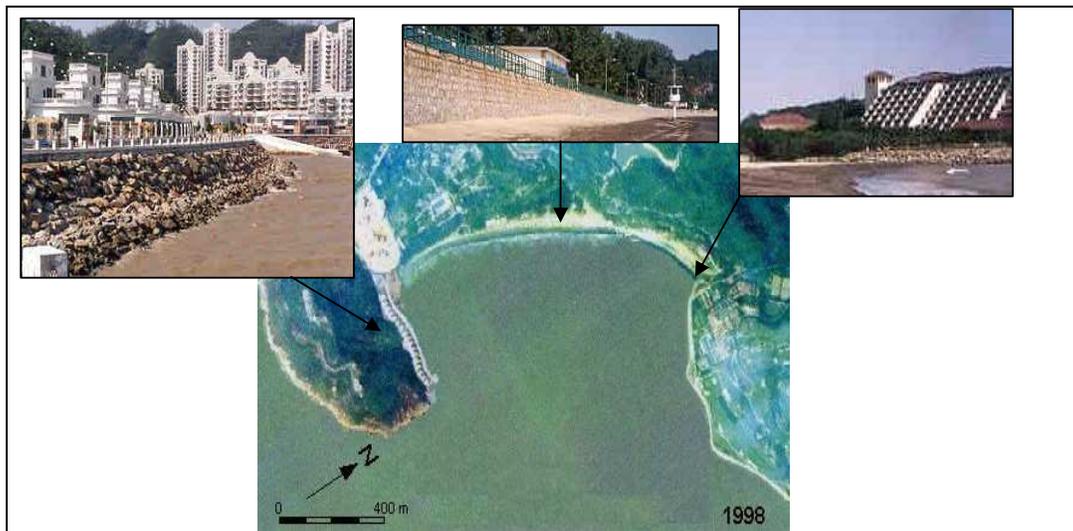


Figura 11 – Baía de Hac-Sá (fotografia aérea rectificada de 1998 e fotos oblíquas de 2002).

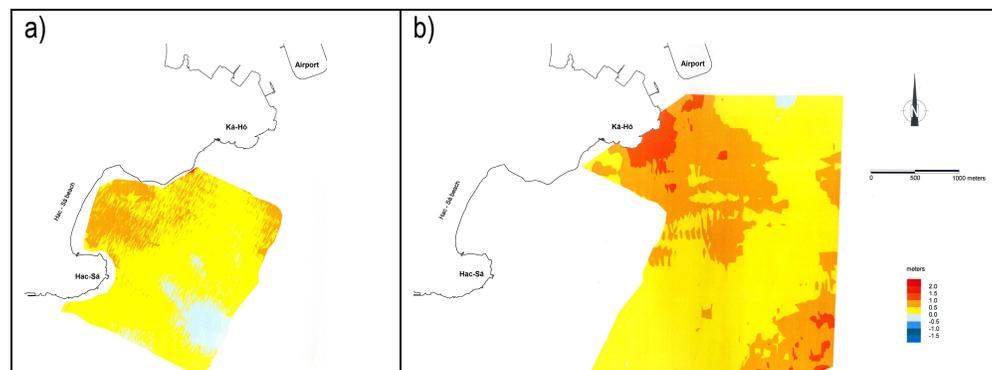


Figura 12 – Evolução morfológica do fundo marítimo: a) entre 1985 e 2002; b) entre 1985 e 2001.

Relativamente às causas de erosão, investigou-se o impacto de 6 potenciais factores: condições de agitação; alteração da propagação das ondas gerada pelo depósito de dragados em frente à praia (Oliveira, 2006); ocorrência de níveis do mar excepcionais; dragagens de manutenção do canal de acesso ao Clube Náutico; descargas pluviais (alteração dos locais de descarga directa na praia devida à ocupação do topo da praia); e avanço das construções (a insuficiente largura emersa da praia não permite a recuperação natural do perfil de praia, uma vez que a acção directa das ondas sobre as estruturas não dissipativas presentes no topo da praia aumentam o volume de transporte sedimentar da praia para o largo). Concluiu-se que a alteração da propagação das ondas e o avanço das construções que ocorreu nas últimas décadas foram as principais causas da erosão, apesar das dragagens de manutenção do canal de acesso ao Clube Náutico terem contribuído para o desencadear do surto erosivo, através do pequeno recuo da linha de costa do sector sul da praia produzido.

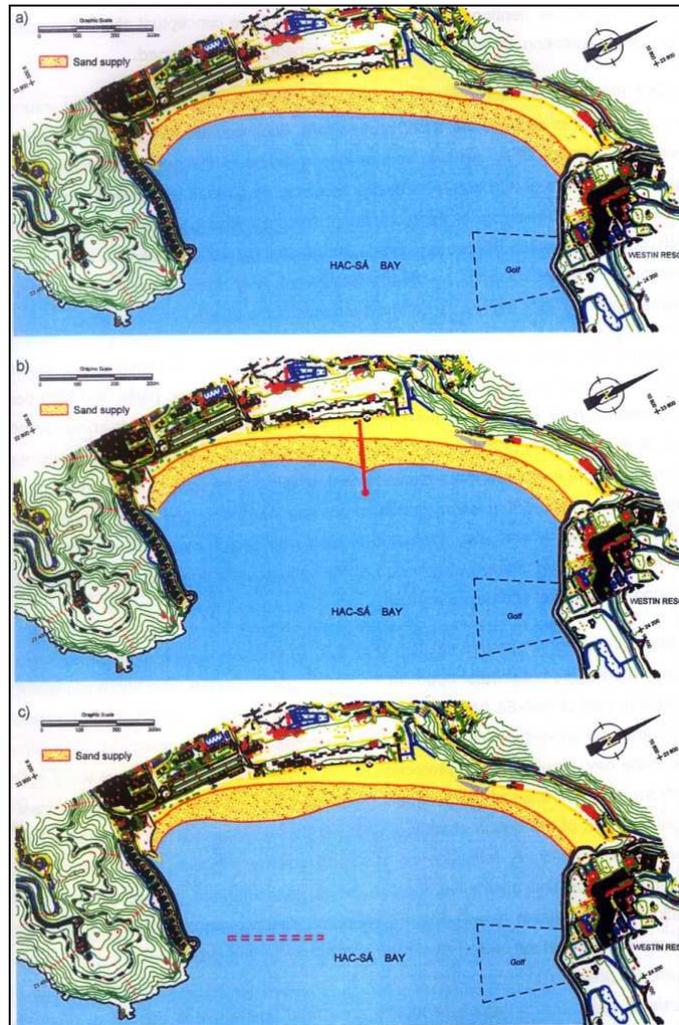


Figura 13 – Esquema das soluções propostas para reabilitação da praia de Hac-Sá.

Conhecidas as características da dinâmica sedimentar e as causas da erosão, foram propostas 3 soluções para reabilitação da praia, todas baseadas em alimentação artificial (Figura 13): a) reforço de areia em toda a praia; b) implementação de estrutura transversal a meio da praia e reforço de areia em ambos os trechos; e c) implementação de um quebra-mar submerso, paralelo à direcção principal da praia, no sector sul da baía e reforço de areia na praia. Analisado

o comportamento morfodinâmico das soluções, após ajustamento natural do perfil de praia à nova configuração, com base em modelação matemática da evolução da linha de costa a médio e longo prazo, concluiu-se sobre as suas vantagens e inconvenientes. A solução c), apesar de diminuir a energia incidente no sector sul da praia e, por isso, diminuir o recuo da linha de costa a médio e curto prazo neste sector, iria causar grandes alterações na dinâmica natural da praia e possivelmente a deposição de lodo no extremo sul. Esta solução tem um maior grau de risco associado à previsão dos processos físicos costeiros e morfologia da praia a longo prazo. A solução a) apresenta as seguintes vantagens sobre a solução b): maior estabilidade morfológica devida à ausência de flutuações da linha de costa na parte central da praia; manutenção do comprimento original da praia, oferecendo condições mais favoráveis ao uso recreativo do que a partição da praia em duas; reabilitação da praia com uma solução não estrutural, permitindo a manutenção da dinâmica natural da praia, i.e., dos seus processos físicos principais e mecanismos de interacção; e menor custo.

Pelas razões apresentadas recomendou-se a solução a): fornecimento de $400 \times 10^3 \text{ m}^3$ de areia de forma distribuída (333 m^3 por metro longitudinal de praia) para obtenção de um alargamento de 60 m da praia após ajustamento do perfil (com valor mínimo da nova cota máxima igual a 3,7 m). Com vista a manter o perfil de equilíbrio natural da praia e o mesmo comportamento hidro-sedimentar que o material nativo a areia a fornecer terá que ter um diâmetro mediano (D_{50}) compatível ($0,33 \text{ mm} < D_{50} < 0,50 \text{ mm}$; $0,12 \text{ mm} < D_{10} < 0,18 \text{ mm}$; $1,50 \text{ mm} < D_{90} < 2,50 \text{ mm}$). Para além desta solução, fizeram-se recomendações para intervenções complementares para melhoramento das condições da praia: demarcação do canal de acesso ao Clube Náutico, para evitar a fuga de areia da praia após dragagem; desvio da drenagem de águas pluviais e remoção das saídas directas para a praia; controlo do avanço das infra-estruturas sobre a praia; e fim do despejo de dragados em frente à praia.

Praias de Leblon, Ipanema e Arpoador (Brasil)

O estudo visou a reabilitação ambiental da Lagoa Rodrigo de Freitas e das praias de Ipanema, Leblon e Arpoador. Os seus objectivos gerais eram melhorar a qualidade da água da Lagoa através do aumento dos caudais que se escoam pelo Canal do Jardim de Alah e reabilitar a orla marítima adjacente, que sofria de problemas de erosão desde há algumas décadas.

Foram previamente definidos, no âmbito de outras componentes do estudo, o volume de trocas de água entre a Lagoa e o mar compatível com a resolução dos problemas de qualidade da água e as características hidrodinâmicas do futuro escoamento no Canal do Jardim de Alah. Estabelecidos estes parâmetros, coube à componente de Dinâmica Costeira a resolução das seguintes questões: conseguir uma redução drástica dos assoreamentos que ocorriam permanentemente na embocadura exterior do canal do Jardim de Alah, através do prolongamento dos pequenos molhes existentes, garantindo dessa forma uma livre e permanente comunicação da Lagoa com o mar, sem necessidade de dragagens de manutenção significativas; e promover o alargamento das praias por meio de alimentação artificial, de forma a obter a melhoria das condições balneares e a garantir que o Passeio Marginal deixasse de ser atacado pelas ondas.

A morfologia das praias de Leblon, Ipanema e Arpoador (Figura 14) é caracterizada pela existência de uma orla arenosa contínua, com 3,7 km de comprimento, ligeiramente arqueada, voltada aproximadamente a sul e constituída por areias médias, de diâmetro mediano da ordem de 0,4 mm.

A largura da faixa emersa varia de 70 a 100 m nas praias do Leblon e de Ipanema, e de 20 a 40 m na praia do Arpoador, estando sujeita a variações interanuais. Estas variações podem originar situações persistentes de oscilação global da massa de areia: para Este, engordando o

Arpoador e emagrecendo o Leblon; para Oeste, engordando a praia do Leblon e emagrecendo a do Arpoador.



Figura 14 – Praias de Leblon, Ipanema e Arpoador, e Canal do Jardim de Alah (Brasil).

A propagação da agitação marítima entre o largo e as praias apresenta-se muito complexa, devido à existência de diversas ilhas: a Ilha Redonda, o grupo das Ilhas Cagarras e a Ilha Rasa (Figura 15). Estas ilhas constituem obstáculos à propagação das ondas originando a geração de zonas de sombra, com orientação e extensão que dependem da direcção e do período da onda incidente. A análise da propagação das ondas até à batimétrica 10 m foi efectuada por simulação em modelo numérico de 21 diferentes casos de combinação de rumo ao largo e período. A sobreposição destas zonas de sombra cria um padrão complexo de distribuição de alturas e rumos ao longo das praias. Foi efectuada uma caracterização detalhada desses parâmetros, tendo sido definidos 7 regimes de agitação marítima local, indispensáveis para a modelação da dinâmica costeira.

As marés na orla marítima da Lagoa são do tipo semi-diurno, com desigualdades diurnas. As variações de nível de origem astronómica originam oscilações, entre as preia-mares e as baixamares, que podem atingir 1,40 m em águas vivas máximas.

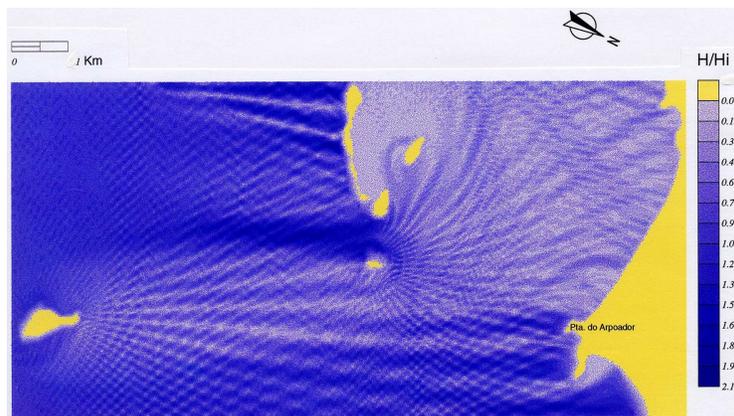


Figura 15 – Propagação da agitação marítima desde o largo até às praias de Leblon, Ipanema e Arpoador. Exemplo de resultados obtidos com um modelo matemático.

O conjunto das praias em estudo forma uma unidade sedimentar praticamente independente, isto é, constitui um trecho costeiro sem trocas significativas com as orlas arenosas que lhe ficam

anexas, a Este e a Oeste. A dinâmica sedimentar é caracterizada por transportes sólidos longitudinais que se processam num e noutro sentido, os quais são aproximadamente iguais, em ano médio, dada a situação geral de equilíbrio do arco formado pelas praias. A quantificação dos transportes globais efectuada em cinco pontos dessa orla arenosa, com diferentes fórmulas de cálculo, forneceu valores contidos na gama de 700.000 a 1.000.000 m³/ano. Esta constante movimentação de elevados caudais de areia ao longo das praias explica a grande dificuldade de manter desobstruída a embocadura do Canal do Jardim de Alah, o que só é conseguido através de constantes dragagens de manutenção.

O cálculo da distribuição do transporte longitudinal no perfil das praias, efectuado com modelos de evolução da linha de costa (DHI, 2000; Vicente e Clímaco, 2003), apresentou um valor anual acumulado praticamente nulo abaixo da batimétrica 10 m e muito diminuto abaixo da de 8 m. A forte diminuição dos transportes de areia no perfil, quando se progride no sentido das maiores profundidades, confirmou que o problema do assoreamento do Canal do Jardim de Alah podia ser resolvido através do prolongamento dos molhes que actualmente fixam a sua embocadura.

As simulações mostraram ainda que um forte temporal pode, só por si, originar recuos da linha de água nas praias do Leblon e do Arpoador da ordem de 40 e 20 m, respectivamente.

As praias em estudo caracterizam-se por uma estabilidade aluvionar global, que decorre da permanência da massa de areia entre as pontas rochosas que as limitam, estando sujeitas, apesar desta estabilidade, a desequilíbrios morfológicos que originam episódios erosivos.

Simularam-se com os referidos modelos de evolução da linha de costa, numa operação de calibração, as principais evoluções sofridas pelas praias nas últimas décadas. Estas simulações permitiram uma satisfatória interpretação, compreensão e reprodução da dinâmica das praias e das suas configurações de equilíbrio e de oscilação.

Analysaram-se várias soluções alternativas, pouco diferentes entre si, que apresentavam as seguintes características gerais: acentuado prolongamento dos molhes, da ordem dos 200 m, deslocando a embocadura para uma zona de maiores profundidades, onde a redução da capacidade de transporte minimizava os problemas de assoreamento; diferentes aprofundamentos do canal existente com vista a intensificar o volume de trocas entre a laguna e o mar; e diferentes configurações da boca dos molhes para tentar reduzir a penetração da agitação marítima e sua propagação no interior do canal.

Da análise destes resultados destacam-se os seguintes aspectos: forte atenuação da agitação marítima no interior do canal, o que elimina os riscos de galgamento do Passeio Marginal e inundação da avenida; predominância do transporte em suspensão sobre o arrastamento; e assoreamento muito diminuto da boca e canal dos molhes, compatível com uma fácil manutenção.

Considerou-se que o melhoramento das praias de Leblon, Ipanema e Arpoador teria de passar por uma alimentação artificial. Simulou-se com modelação matemática, além da situação correspondente à configuração de equilíbrio médio, as situações mais acentuadas de oscilação no sentido do Leblon e do Arpoador, responsáveis pelas ocorrências de erosões nos extremos do arco formado pelas praias. Nas condições de simulação foi incluído o prolongamento dos molhes, tendo sido analisado o efeito de compartimentação da orla arenosa determinado por este prolongamento. Esta obra conduzirá ao quase anulamento das trocas sedimentares entre a praia do Leblon e as praias de Ipanema e do Arpoador, e afectará a forma como os dois trechos oscilarão nos processos de adaptação às referidas flutuações naturais, decorrentes de alterações da distribuição da energia do clima anual de agitação marítima pelos seus rumos de actuação.

Os resultados das simulações permitiram concluir que: é adequado um volume de enchimento de $1,2 \times 10^6 \text{ m}^3$ de areia idêntica às das praias; os problemas de erosão da praia do Leblon ficam definitivamente resolvidos devido à diminuição das oscilações da linha de água resultante da sua compartimentação pelos molhes, obras que impedem as trocas de areia com a praia de Ipanema; a praia de Ipanema beneficia de um aumento geral de largura, proporcionado pela alimentação artificial, que compensa uma maior oscilação junto à embocadura do canal do Jardim de Alah, devido ao referido efeito de compartimentação; e a praia do Arpoador beneficia de um alargamento mais reduzido dada a excessiva inflexão e avanço da implantação local do Passeio Marginal.

A Figura 16 mostra a solução final proposta.



Figura 16 – Praias de Leblon, Ipanema e Arpoador: solução proposta.

Embocadura da Lagoa de Óbidos (Portugal)

A Lagoa de Óbidos (Figura 17), uma laguna situada na costa oeste de Portugal, tem uma área de 8 km^2 em preia-mar de águas vivas e uma profundidade máxima de 4 m relativamente ao nível médio. A sua pequena dimensão, os baixos caudais fluviais e o intenso transporte litoral têm levado a fechos da embocadura pelo menos desde o século XV (Henriques, 1992), reduzindo as trocas com o mar (Oliveira et al., 2006) e deteriorando a qualidade da água. Mais recentemente, construções nas margens da laguna foram postas em risco ou destruídas pela migração da embocadura. Estes problemas motivaram duas propostas de soluções, uma envolvendo a construção de quebra-mares e outra o aumento da área da laguna. No entanto, ambas foram abandonadas após estudos detalhados, pelo que os problemas deste sistema apenas têm sido mitigados através de soluções temporárias baseadas em dragagens e na colocação de sacos de areia. O presente estudo visou propor uma solução mais duradoura e com menores custos de manutenção. Dada a precisão limitada de todos os tipos de modelos morfológicos, a solução foi desenvolvida e analisada com recurso a vários modelos numéricos, empíricos e analíticos (Fortunato e Oliveira, 2007), após uma caracterização aprofundada da situação actual baseada em modelação e análise de dados de campo.

A solução proposta para a estabilização da embocadura da laguna consiste num esquema de dragagem de canais principais e secundários, na manutenção do guia-correntes existente, e na construção de um novo na margem sul (Figura 18).

O esquema de dragagens proposto tem como objectivos melhorar a capacidade de auto-manutenção e renovação da Lagoa. O número de canais na lagoa de Óbidos tem variado ao longo dos anos. Os canais propostos foram definidos com base na análise de dados históricos e na aplicação de um modelo empírico (Allersma, 1994) e de um modelo numérico hidrodinâmico (ELCIRC, Zhang et al., 2004). O canal norte mantém o alinhamento mais estável do último século, enquanto o canal sul foi adaptado para minimizar as perdas de carga. A secção dos canais foi definida através de um procedimento iterativo que combina o modelo ELCIRC com o modelo empírico de O'Brian (1969). O primeiro permite calcular o prisma de maré para uma determinada geometria do canal, enquanto o segundo determina a secção transversal estável para um determinado prisma de maré.

Para além destes canais principais, propôs-se a dragagem de 7 canais secundários sobre os bancos de areia. Estes canais secundários visam facilitar o escoamento da água na vazante, melhorando a capacidade de automanutenção da embocadura (Fortunato e Oliveira, 2005a,b), e contrariar o assoreamento progressivo da laguna. Os resultados das simulações numéricas mostram que as dragagens propostas reforçam a eficiência hidráulica da embocadura, aumentam as correntes de vazante relativamente às de enchente e melhoram as trocas com o mar (por exemplo, o prisma de maré aumenta em 22% relativamente à situação após a dragagem de emergência de Julho de 2001).

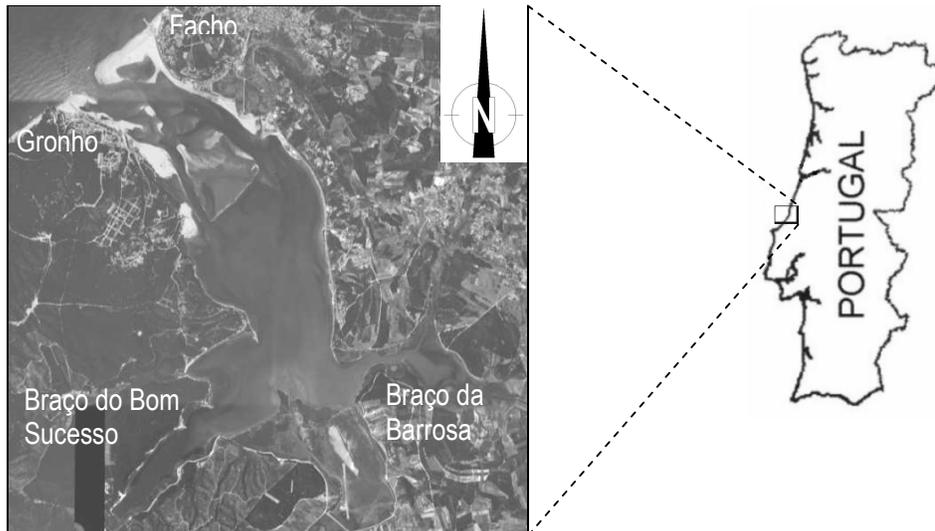


Figura 17 – Lagoa de Óbidos: localização e toponímia.

Apesar das suas vantagens, as dragagens propostas não garantem a estabilidade da embocadura a longo prazo, uma vez que a meandrização e o assoreamento dos canais poderiam repor a morfologia actual ao fim de meses ou anos. Para evitar grandes alterações morfológicas após as dragagens, propôs-se manter o guia-correntes construído em 1999 junto à margem norte, e construir um novo guia-correntes a sul do canal. O limite de jusante da nova obra é definido de forma a esta não afectar o trânsito litoral, minimizando o impacte na costa. Este guia-correntes tem dois trechos distintos: os 100 m de jusante têm um coroamento acima da máxima preia-mar de forma a evitar galgamentos; os 200 m de montante ficam submersos em preia-mar, reduzindo a intensidade das correntes de enchente e aumentando a das de vazante. Esta cota mais baixa minimiza também os impactes visuais, uma vez que parte da obra só fica visível durante parte do ciclo de maré.

Globalmente, a solução proposta permitirá manter a embocadura aberta com pouca necessidade de dragagens. Garantirá, ainda, a protecção das margens da laguna e a existência permanente de uma praia oceânica na margem sul.

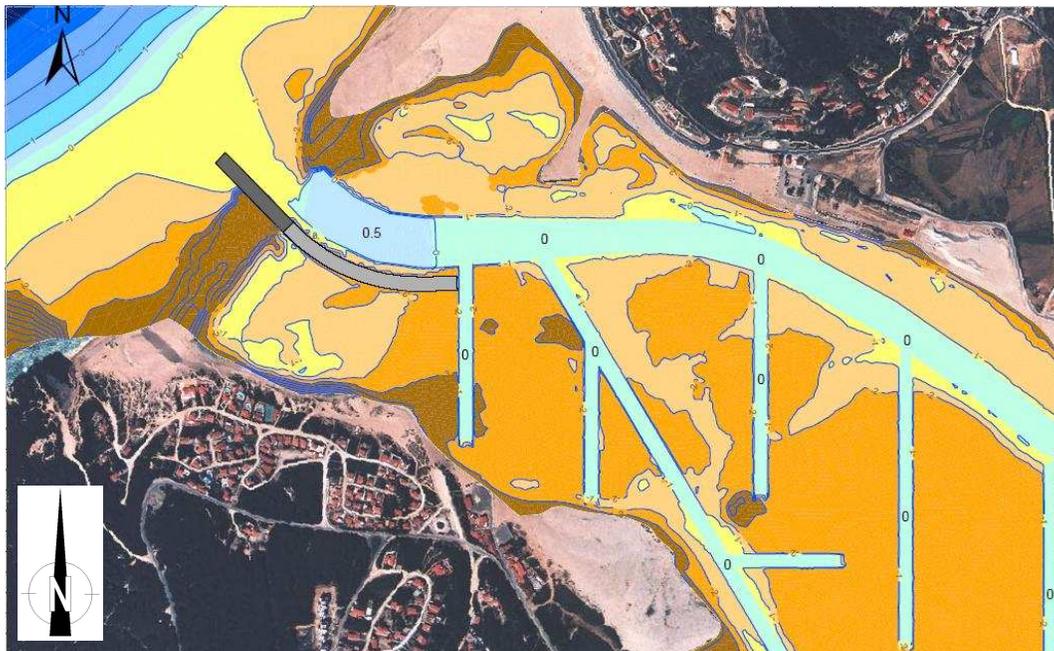


Figura 18 – Solução proposta para a embocadura da Lagoa de Óbidos.

Considerações finais

Os problemas associados à dinâmica sedimentar da zona costeira têm implicações económicas, sociais e ambientais severas, afectando negativamente o turismo, a navegação, a pesca e os habitats. Acresce que há sinais claros de que estes problemas se vão agravar no futuro:

- Por um lado, as ameaças à zona costeira aumentam. As alterações climáticas, nomeadamente as alterações nos regimes de agitação marítima e a subida do nível médio do mar, aumentarão os problemas de erosão costeira. As alterações climáticas provocarão também cheias e secas mais intensas, o que promoverá a construção de barragens nas bacias hidrográficas. Esta construção será ainda fomentada pelo aumento dos preços dos combustíveis fósseis e pela necessidade de cumprir o protocolo de Kioto. Estas barragens retêm os sedimentos, reduzindo a sua afluência à zona costeira e potenciando os problemas de erosão costeira. Em países em forte desenvolvimento, como Angola, a extracção de inertes para construção em rios e estuários tende a crescer, contribuindo também para o défice de sedimentos na zona costeira.
- Por outro lado, os efeitos económicos e sociais das alterações na zona costeira tornar-se-ão mais severos. A nível de navegação, há uma tendência para o aumento do comércio marítimo, da tonelagem dos navios porta-contentores, e da prática de náutica de recreio. Simultaneamente, o turismo ligado à prática balnear constitui uma fonte de receita crescente em muitos países. Finalmente, a percentagem da população que vive junto à costa tende a aumentar na generalidade dos países, aumentando o número de pessoas vulneráveis ao efeito de eventos extremos.

Apesar do aumento previsível das ameaças à zona costeira e da vulnerabilidade desta, há motivos para optimismo. A engenharia costeira tem evoluído muito nas últimas décadas, tendo sido desenvolvidas, testadas e aperfeiçoadas novas soluções para os problemas costeiros. Um

melhor conhecimento dos processos físicos envolvidos, associado a ferramentas de análise cada vez mais potentes permitem-nos hoje desenvolver soluções mais eficazes e eficientes.

Referências

- Allersma, E. (1994). Channels in Estuaries; 1-D Modelling of Parallel Channels. *Report H1828*. Delft, The Netherlands, WL | Delft Hydraulics.
- Bruun, P. (1978). *Stability of tidal inlets: theory and engineering*. Developments in geotechnical engineering, Vol. 23, Elsevier, Amsterdam.
- Clímaco, M. (2003). *Erosão da Margem Sul da Lagoa de Óbidos. Análise do Problema e Estabelecimento de Alternativas de Protecção*. Rel. 62/03 – NEC, LNEC.
- Davies, R.A. e Zarillo, G.A. (2003). *Human-Induced Changes in Back-Barrier Environments as factors in Tidal Inlet Instability with Emphasis on Florida*, ERDC/CHL CHETN-IV-57, U.S. Army Corps of Engineers.
- DHI Software (2000). *LITPACK- User Guide*, Danish Hydraulic Institute, Denmark.
- Doody, P., Ferreira, M., Lombardo, S., Lucius, I., Misdorp, R., Niesing, H., Salman, A., Smallegange, M. (2004). *EUROSION - Living with Coastal Erosion in Europe*. Acedido em 4 de Outubro de 2007, em <http://www.euroSION.org/project/euroSION_en.pdf>.
- Fortunato A.B. (2006). *Modelação numérica da dinâmica sedimentar em embocaduras*, Programa de investigação e de pós-graduação na área científica de Hidráulica Marítima, LNEC.
- Fortunato, A.B. e A. Oliveira (2005a). Influence of Intertidal Flats on Tidal Asymmetry, *Journal of Coastal Research*, 21/5: 1062-1067.
- Fortunato, A.B. e A. Oliveira (2005b). Promoting ebb dominance in coastal lagoons, J.M. Smith (ed.), *Proc. 29th International Conference on Coastal Engineering.*, ASCE, 2: 1173-1185.
- Fortunato, A.B., e A. Oliveira (2007). Case study: promoting the stability of the Óbidos lagoon inlet, *Journal of Hydraulic Engineering*, 133/7: 816-824.
- Henriques, M. V. (1992). Morphological evolution of the Óbidos Lagoon. *Journal of Coastal Research*, 8/3: 677–687.
- O'Brian, M.P. (1969). Equilibrium Flow Areas of Inlets on Sandy Coasts, *J. Waterways and Harbours Div.*, 95: 43-52.
- Oliveira, A., A.B. Fortunato e J. Rego (2006). Effect of morphological changes on the hydrodynamics and flushing properties of the Óbidos Lagoon. *Continental Shelf Research*, 26/8: 917–942.
- Oliveira, E.M., C. Vicente, M. Clímaco, F.S.B.F Oliveira, A.B. Fortunato, A. Oliveira, M.C. Silva, M.C. e J. Rocha (2000). *Lagoa Rodrigues de Freitas e Praias de Leblon, Ipanema e Arpoador: Solução Integrada de Reabilitação Ambiental. Relatório 5: Análise Comparativa de Soluções Alternativas*. Rel. 139/00 NET/NHE. Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, Portugal.
- Oliveira, F.S.B.F. (2003a). Caracterização da agitação marítima na baía de Hac-Sá, Macau, 3^{as} *Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária*, Aveiro, Portugal, CD-ROM, 13 pp.
- Oliveira, F.S.B.F. (2003b). Impact of anthropological pressure on the coastal area: cross-shore beach analysis. A case study, *CoastGIS'03*, Genova, Italy, CD-ROM, 8 pp.

- Oliveira, F.S.B.F. (2006). Impact of a disposal area of dredged sediment in front of a beach. *Journal of Coastal Research*, 39/2: 801-805.
- Oliveira, F.S.B.F., Vicente, C. e Clímaco, M. (2003). Characterisation of the sediment dynamics of Hac-Sá beach. Macao. *EPMEESC IX: Computational Methods in Engineering and Science*, lu et al. (eds), pp. 779-786.
- Santos, F.D., Forbes, K. e Moita, R. (eds.)(2002). *Climate Change in Portugal. Scenarios, Impacts and Adaptation Measures – SIAM Project*. Gradiva, Lisbon, Portugal.
- Santos, F.D. e P. Miranda (eds.)(2006). *Alterações Climáticas em Portugal. Cenários, Impactos e Medidas de Adaptação – SIAM II*. Gradiva, Lisboa.
- Seabergh, W.C. (2002). *Weir Jetties at Coastal Inlets: Part 1, Functional Design Considerations*, ERDC/CHL CHETN-IV-53, U.S. Army Engineer Research and Development Center, Vicksburg, MS <http://chl.wes.army.mil/library/publications/cetrn>.
- Vicente, C. e M. Clímaco (2003). Evolução de Linhas de Costa. Desenvolvimento e Aplicação de um modelo numérico. ICT-ITH 42, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, Portugal.
- Zhang, Y., A.M. Baptista e E.P. Myers (2004). A cross-scale model for 3D baroclinic circulation in estuary-plume-shelf systems: I. Formulation and skill assessment. *Continental Shelf Research*, 24/18: 2187-2214.