

DIMENSIONAMENTO HIDRÁULICO E FUNCIONAMENTO DE ESPORÕES

Claudino VICENTE

Investigador Coordenador, LNEC, Av. do Brasil, 101, 1700-066 Lisboa, +351218443611, claudinovicente@sapo.pt

Manuel CLÍMACO

Investigador Principal, LNEC, Av. do Brasil, 101, 1700-066 Lisboa, +351218443611, mclimaco@lneec.pt

RESUMO

Analisa-se com um modelo de evolução de linhas de costa o funcionamento de um esporão isolado e de um campo de esporões, abordando-se os seguintes aspectos: posicionamento das obras de forma a garantir uma adequada protecção da zona a defender; comprimento necessário para que os esporões apresentem um comportamento eficaz; caracterização da estabilização e evolução morfológica induzidas pelas obras; volumes de acumulação e de erosão envolvidos na adaptação da praia; e oscilações da linha de água devido à ocorrência de temporais.

A análise é apoiada num exemplo teórico de dimensionamento de esporões para a costa oeste de Portugal, com dados reais de agitação marítima. Escolheu-se um trecho em erosão nas imediações da Vagueira, a sul da embocadura da ria de Aveiro, em que se procurou: proteger um comprimento de praia de 5 km com um esporão; e um trecho alargado, de 12 km, com um campo de três esporões.

Palavras-chave: Dimensionamento de esporões, modelos de evolução de linhas de costa, protecção contra a erosão, transposição de areias, efeito de temporais.

1. INTRODUÇÃO

São frequentes na zona costeira os esporões naturais, constituídos por saliências rochosas, que ao interferirem com o fluxo sedimentar originam zonas de acumulação de areias (Figura 1). A observação destas formações e dos seus efeitos na morfologia costeira conduziu à construção, desde há longo tempo, de obras transversais à costa, com idênticas características.

Os esporões têm vindo a ser usados para travar o avanço do mar sobre zonas valiosas do litoral, tendo-se generalizando a sua utilização a partir do final do século XIX. Até meados do século XX, os progressos resultaram principalmente da experiência prática, mas a partir de então a investigação levada a cabo deu-nos um melhor conhecimento do seu funcionamento (BRAMPTON e MOTYKA, 1983).

Os modelos de evolução de linhas de costa são instrumentos usados na abordagem de problemas costeiros em que ocorrem evoluções morfológicas quer naturais quer decorrentes da construção de obras. No presente trabalho procura-se analisar com um modelo deste tipo, o funcionamento de um esporão isolado e de um campo de esporões, abordando os seguintes aspectos:

- Posicionamento eficaz das obras, de forma a garantir uma adequada protecção da zona a defender.
- Comprimento necessário para os esporões.
- Caracterização da estabilização e evolução morfológica induzidas pelas obras.
- Volumes de acumulação e de erosão envolvidos na adaptação da praia.
- Oscilações da linha de água devidas à ocorrência de temporais.



Figura 1 – Esporões naturais.

2. SIMULAÇÃO NUMÉRICA

2.1 Considerações gerais

A presente análise foi apoiada em simulações numéricas do modelo Litmod (VICENTE, 1991; VICENTE e CLÍMACO, 2003). Este modelo, desenvolvido no LNEC, utiliza algumas formulações relativamente simples, mas muito testadas pela experiência, para descrever os fenómenos físicos em causa: leis de transporte sólido litoral baseadas no fluxo de energia das ondas; distribuições de transporte em perfil e profundidades de fecho, deduzidas de considerações empíricas e de investigações em modelo físico, disponíveis na bibliografia da especialidade; e refração de ondas de pequena amplitude sobre batimetria paralela, nas proximidades da rebentação.

Este modelo permite tratar trechos de grande comprimento, da ordem das dezenas de quilómetros, e testar evoluções de longo prazo, até algumas dezenas de anos. Apresenta grande flexibilidade de utilização, admitindo a adaptação dos módulos de cálculo às particularidades de cada situação concreta.

A evolução da linha de água é calculada, em cada célula em que se divide o trecho de praia, a partir das diferenças de caudal sólido que nela penetram e a abandonam num curto intervalo de tempo, admitindo-se que o perfil transversal no seu avanço ou recuo se desloca paralelamente a si próprio, sem alteração de forma.

A **forma do perfil** é uma informação usada para definir a ordenada do ponto de rebentação e a profundidade na extremidade do esporão, parâmetros necessários para: determinar os efeitos de difracção junto do esporão; avaliar a transposição com base na distribuição do transporte sólido ao longo do perfil; e definir o declive da praia, parâmetro que intervém nalgumas expressões de cálculo do transporte litoral.

O perfil de praia que o modelo usa nas suas simulações pode ser o perfil real, extraído dos dados de campo, ou um perfil teórico do tipo parabólico que a ele se ajuste (HANSON, 1987).

O transporte sólido litoral processa-se paralelamente à costa, concentrando-se na faixa compreendida entre a linha de água e a profundidade de fecho do perfil. O modelo calcula a **profundidade limite de transporte** para cada onda, em função do seu período e altura significativa, segundo BIRKEMEIER (1985).

De um modo geral, são pequenos os ângulos que os esporões formam com a direcção de propagação das ondas que sobre eles incidem. Este facto não impede que um trecho de praia a sotamar seja afectado pela **difracção**. Esse efeito traduz-se na diminuição do ângulo de ataque e da altura das ondas nesse trecho, o que provoca uma diminuição local do transporte litoral e, conseqüentemente, uma atenuação da erosão. Deixa assim de se verificar simetria entre as zonas de acumulação e de erosão. Para simular esse efeito o modelo Litmod utiliza um processo de cálculo da difracção baseado nas tabelas de WIEGEL (1964), correspondentes a um obstáculo semi-infinito, ou a formulação de GODA *et al.* (1978).

Um esporão constitui uma barreira ao transporte litoral que podendo ser total nalgumas situações, é mais frequentemente parcial, sendo apenas retida uma fracção do caudal longitudinal de areias que o atinge. Essa fracção pode mesmo ser nula, quando o esporão se encontra saturado. Para simular a intensidade variável da **transposição**, a qual depende das características da ondulação, do perfil da praia e do comprimento e grau de enchimento do esporão, é definido o factor de transposição que depende da relação, em cada passo de cálculo, entre a profundidade na extremidade do esporão e a profundidade limite de transporte da onda que actua nesse momento. Segundo essa relação não há transposição quando a extremidade do esporão ultrapassa a profundidade limite de transporte; e a transposição é total quando a linha de água da praia ultrapassa a extremidade do esporão.

3. DIMENSIONAMENTO HIDRÁULICO E FUNCIONAMENTO

O dimensionamento hidráulico de um esporão consiste na definição do comprimento e localização adequados à finalidade de sustentar o recuo da linha de água de uma praia sujeita a erosão. Deve ser implantado a sotamar do trecho a defender e apresentar um comprimento tal que a sua zona de acumulação se estenda a todo o trecho que se pretende proteger.

O comprimento da zona de acumulação é função da obliquidade das ondas na rebentação. Para um determinado comprimento da obra cresce com a diminuição da obliquidade das ondas relativamente à linha de costa. A análise desta relação e a determinação do comprimento mais adequado podem ser efectuadas através de simulações com um modelo de evolução de linhas de costa.

Estas simulações permitirão ainda avaliar: o agravamento das erosões a sotamar; a evolução e estabilização da linha de água em toda área de influência da obra; e as oscilações da linha de água devidas à incidência de temporais severos e à variabilidade inter-anual do regime de agitação marítima. Quando um esporão é insuficiente para proteger toda a zona pretendida poderá recorrer-se a mais do que um, formando um conjunto que se designa por **campo de esporões** (Figura 2). No seu projecto deverão identicamente ser tidos em conta os aspectos de localização, comprimento das obras e evolução resultante para a linha de costa.

Apresenta-se no ponto seguinte um exemplo prático de dimensionamento de esporões para a costa oeste de Portugal, com dados reais de agitação marítima.

4. EXEMPLO DE APLICAÇÃO

4.1 Considerações gerais

Escolheu-se para a análise do dimensionamento e funcionamento de um esporão na costa oeste, o trecho de praia em erosão a sul da Vagueira, próximo da embocadura da Ria de Aveiro.



Figura 2 – Campo de esporões da Costa Nova, a norte da Vagueira.

Trata-se de uma frente marítima de praia contínua com desenvolvimento rectilíneo e batimetria aproximadamente rectilínea e paralela, constituída por areias de granulometria média. A batimetria e a

linha de costa apresentam uma orientação aproximada de N-14°-E e uma potência anual média da agitação marítima na rebentação muito elevada. Esta origina importantes caudais de transporte sólido litoral, com forte saldo anual dirigido para sul.

O objectivo do esporão seria a acumulação de areias num trecho extenso, de 5 km de praia, de forma a protegê-lo da erosão que avança para sul, a partir da embocadura da Ria de Aveiro.

Foi ainda analisado o uso de um campo de três esporões para estender a protecção para sul a um trecho adicional de 7 km.

Utilizou-se a série cronológica de dados de **agitação marítima** de 5 anos, obtida a partir de registos de Julho de 1990 a Junho de 1995. Disponha-se, para o estabelecimento do modelo, de **dados** das configurações longitudinais e de perfil de praia e de granulometria das areias.

4.2 Simulação sem esporão

Simulou-se a dinâmica sedimentar do trecho de costa de 30 km que se desenvolve a sul da Vagueira, o qual está sujeito a um processo erosivo persistente, desencadeado pela construção dos molhes da embocadura da Ria de Aveiro.

Considerou-se um período de 20 anos de agitação marítima normal, através da repetição sucessiva dos dados de 1990 a 1995. Efectuou-se a **calibração** do modelo ajustando, por tentativas:

- O saldo médio anual de transporte sólido litoral, através da variação do coeficiente da fórmula de transporte, de forma a obter-se cerca de $1,1 \times 10^6$ m³/ano, valor que anteriores estudos estimam para este trecho de costa (VICENTE e CLÍMACO, 1998).
- O défice de alimentação proveniente de norte, de forma a obter um recuo máximo da linha de água da ordem de 6 m/ano (CEHIDRO, 1998; COELHO, 2005; TEIXEIRA, 1994).

Os resultados da simulação permitem destacar os seguintes aspectos da dinâmica e evolução do trecho de costa (Figuras 3 e 4):

Evolução

- O trecho analisado sofre de uma erosão, resultante do referido défice aluvionar, que diminui gradualmente de norte para sul. O recuo da linha de água ao fim dos 20 anos não afecta ainda a metade sul do trecho.
- O maior recuo verifica-se no extremo norte, com um valor total de 90 m em 20 anos e taxa máxima de erosão da ordem de 6 m/ano.
- No trecho a defender, compreendido entre os km 20 e 25, o recuo será de 10 a 30 m.

Transporte

- Obteve-se um saldo médio anual de transporte sólido litoral de $1,1 \times 10^6$ m³/ano, resultante da movimentação de $1,7 \times 10^6$ m³/ano para sul e de $0,6 \times 10^6$ m³/ano para norte.
- Os caudais máximos diários registados foram de 67×10^3 m³/dia, para sul, e de 80×10^3 m³/dia, para norte.
- Os volumes máximos semanais movimentados em situações de grandes temporais foram de 180×10^3 m³ para sul e de 160×10^3 m³ para norte.
- Os transportes longitudinais no perfil da praia apresentavam uma concentração de 70% do total acima da batimétrica 5 e valores praticamente nulos abaixo da batimétrica 12.

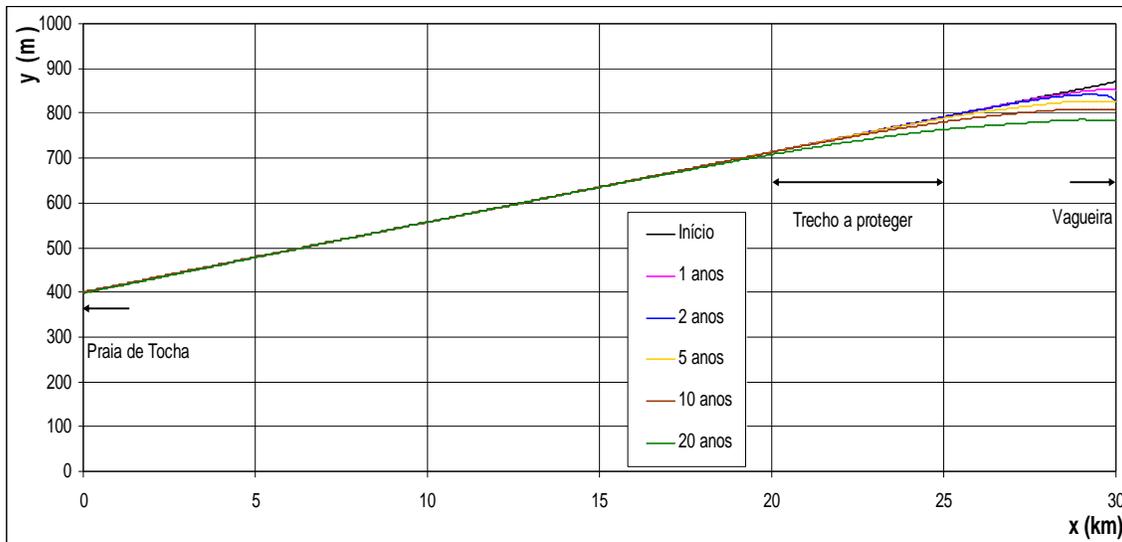


Figura 3 - Previsão da evolução do trecho de praia.

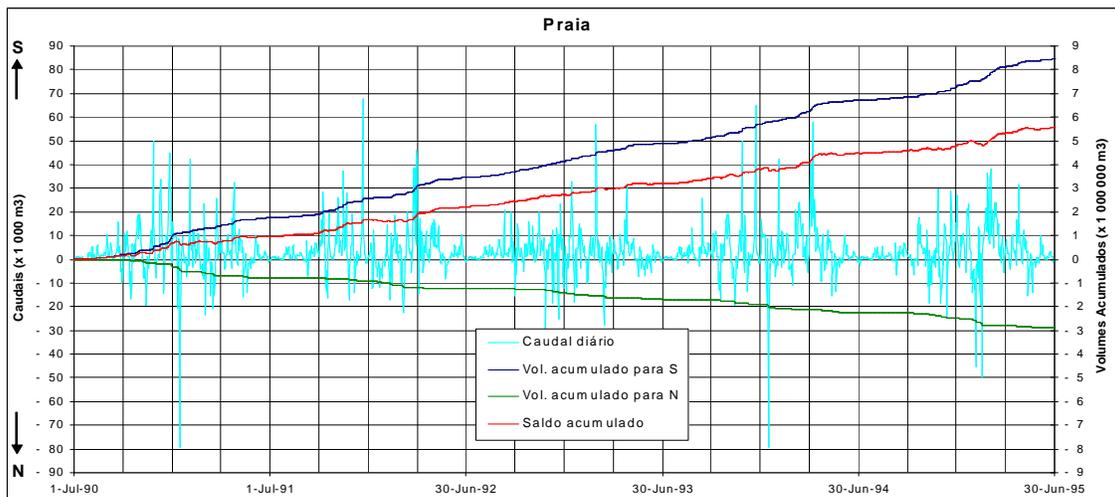


Figura 4 - Caudal sólido litoral. Série cronológica de 90-95.

4.4 Simulação com um esporão

Pretendia-se proteger com um esporão a zona de 5 quilómetros, entre os quilómetros 20 e 25, indicada na Figura 3. Desconhecendo-se o comprimento da obra necessário para garantir essa protecção, simularam-se esporões com diversos comprimentos. Verificou-se ser suficiente para proteger a zona referida a utilização de um esporão com 100 m de comprimento, contados a partir da linha de água inicial.

Apresentam-se nas Figuras 5 a 7 os principais resultados da aplicação do Litmod a um período de 20 anos, com as condições anteriormente indicadas, os quais evidenciam os seguintes aspectos:

- A acumulação de areias abrange toda a zona a proteger, com avanços máximos da linha de água de 70 m junto do esporão e de 15 m no km 25.
- A zona de erosão estende-se desde o esporão até ao km 7.
- A linha de água sofre uma evolução cujo ritmo se atenua ao longo dos anos.
- A transposição do esporão processa-se quase exclusivamente de norte para sul, com máximos diários da ordem de 45 000 m³.

- Os volumes de acumulação a norte do esporão e de erosão a sul, para o período de 20 anos, foram de cerca de: 10^6 m^3 e $-5,4 \times 10^6 \text{ m}^3$, respectivamente. O saldo destes valores traduz o défice de alimentação na fronteira norte do trecho.

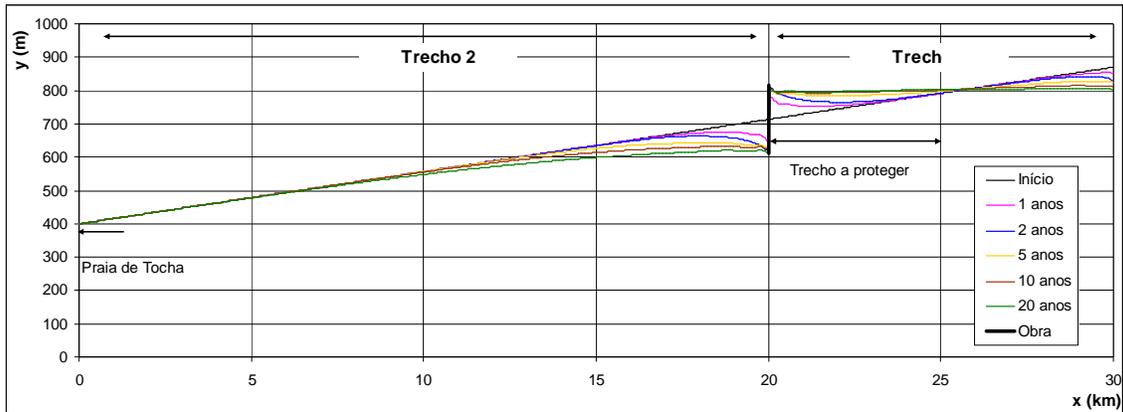


Figura 5 – Simulação do efeito de um esporão de 100 m. Série cronológica de 90-95 repetida.

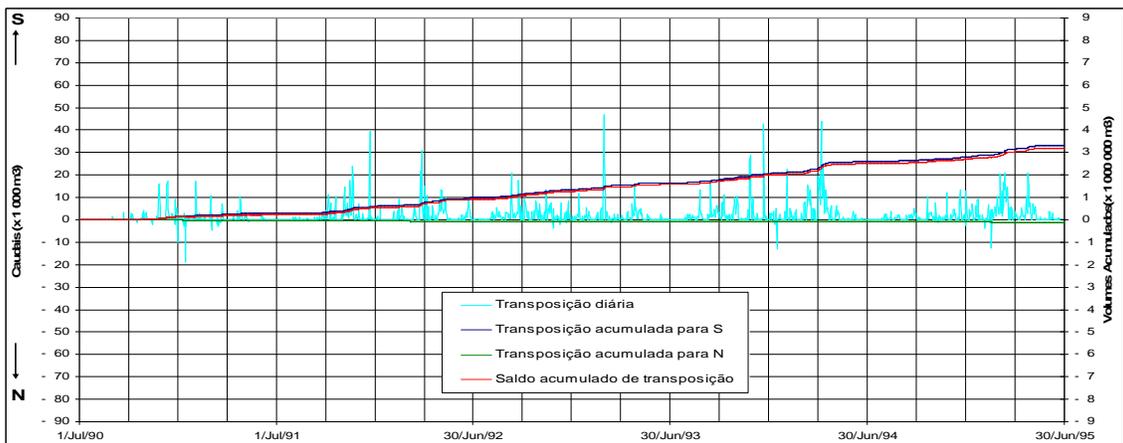


Figura 6 – Caudais de transposição de um esporão de 100 m. Série cronológica de 90-95.

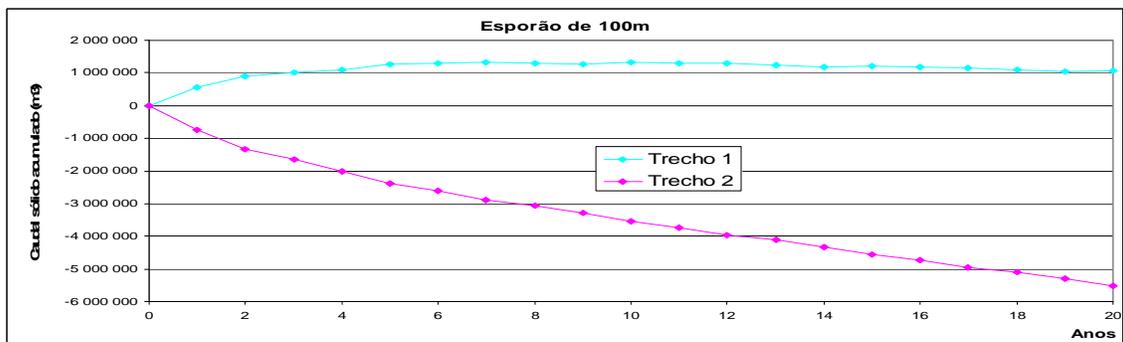


Figura 7 - Balanço de transportes nos trechos 1 e 2. Série cronológica de 90-95.

O modelo de evolução de linhas de costa permite ainda prever alterações morfológicas particulares devidas a situações extremas de agitação marítima e a variações inter-anuais.

Para avaliar os **efeitos dos grandes temporais** começou-se por seleccionar na série cronológica de 1995 a 1999 os dois temporais com maiores transportes para sul e para norte (Figura 8).

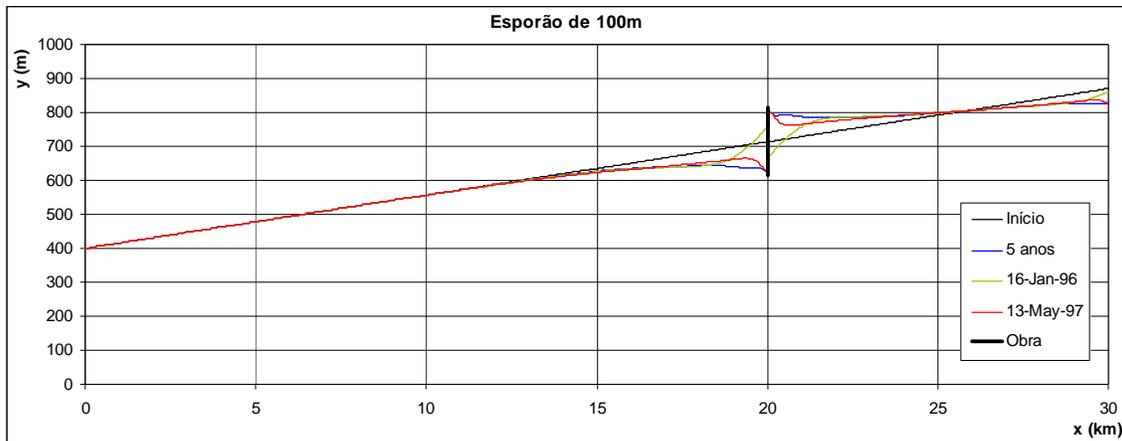


Figura 8 - Simulação do efeito de temporais. Série cronológica de 90-99.

Verifica-se que o temporal com fortes transportes para sul não afectaria significativamente a implantação da linha de água, uma vez que a predominância de transporte para sul é a situação normal. Pelo contrário, o temporal que deslocou grande volume de areias para norte induziria uma acentuada alteração da praia junto do esporão, com forte avanço da linha de água a sotamar e recuo a barlamar.

4.5 Simulação com um campo de esporões

A ampliação de mais 7 km para sul, da zona a proteger, poderia conseguir-se através do aumento de comprimento do esporão, solução pouco adequada sob o ponto de vista económico e funcional. Um aumento significativo de comprimento levaria a sua extremidade para profundidades elevadas, obrigando a grande aumento do volume e robustez da obra. As erosões a sul seriam também amplificadas dado o importante acréscimo da capacidade de retenção do esporão.

Considerou-se aconselhável o recurso a um campo de 3 esporões, tendo-se reproduzido o período de 20 anos, com as condições de simulação anteriormente referidas.

Apresentam-se nas Figuras 9 a 11 resultados de simulação com o modelo Litmod, os quais evidenciam os seguintes aspectos:

- A acumulação a norte do Esporão 1 e a erosão a sul do Esporão 3 processam-se de forma idêntica ao verificado para o caso do esporão isolado.
- A zona de erosão a sul do Esporão 3, atinge agora o km 0, limite sul do trecho.
- As duas células compreendidas entre os esporões sofrem uma sensível reorientação da linha de água.
- A transposição dos esporões ocorre quase exclusivamente no sentido de norte para sul, com máximos diários da ordem de 45 000 m³.
- Os volumes de acumulação a norte do Esporão 1, na Célula 1, na Célula 2, e de erosão a sul do Esporão 3, para o período de 20 anos, seriam de 10⁶m³, 2,2 x 10⁶m³ e 1,4 x 10⁶m³ e -9 x 10⁶m³, respectivamente. O resultante saldo de erosão no período de 20 anos seria de -4,4 x 10⁶m³, o que está de acordo com o défice aluvionar do trecho analisado, que como foi referido se eleva a 0,22 x 10⁶ m³/ano.

Avaliaram-se também os **efeitos dos grandes temporais** com os dados anteriormente referidos. Fez-se actuar cada um destes temporais sobre a situação morfológica de estabilidade extraída da simulação do período de 1990 a 1995 (Figura 10).

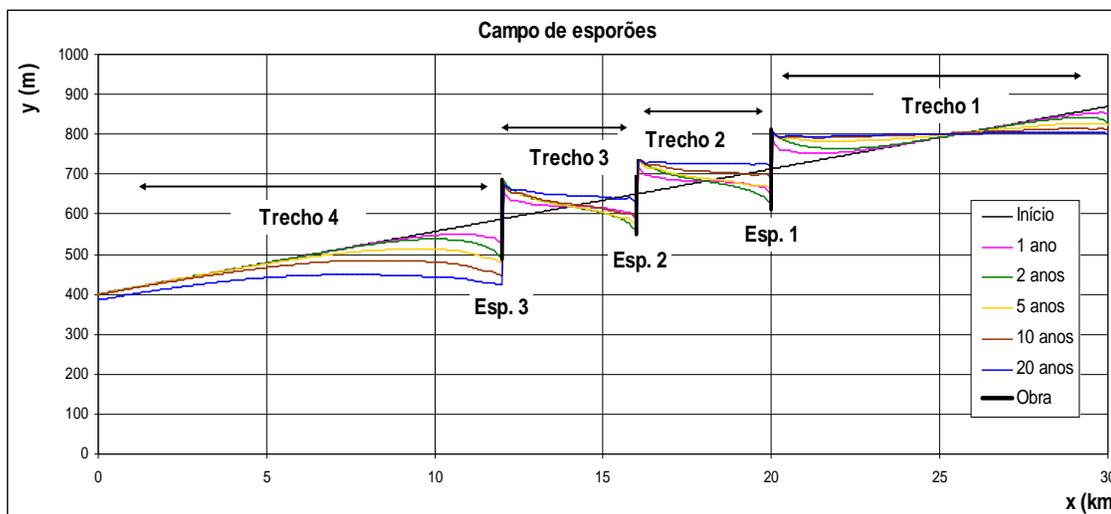


Figura 9 – Efeito de um campo de esporões.

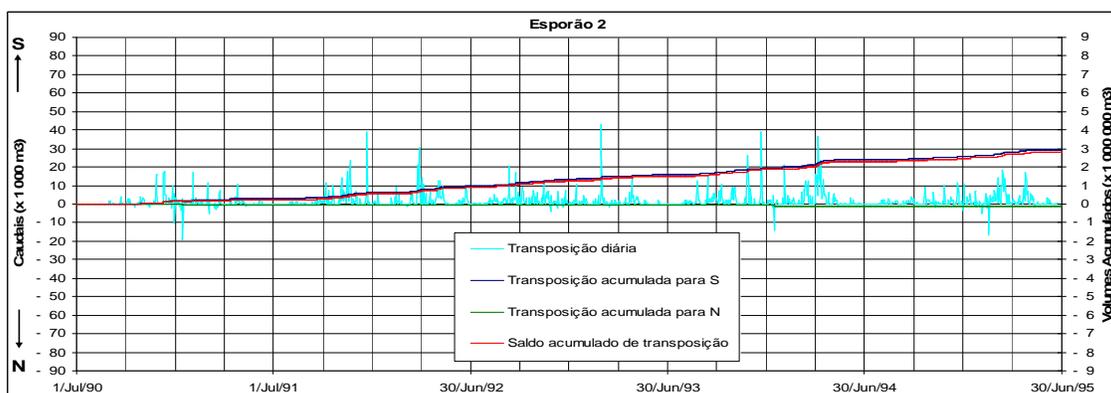


Figura 10- Transposição do esporão 2. Série cronológica de 90-95.

Da simulação efectuada destacam-se os seguintes aspectos:

- O temporal com fortes transportes para sul não afectaria significativamente a implantação da linha de água, uma vez que a predominância deste sentido de transporte é a situação normal.
- O temporal que deslocou grande volume de areias para norte induziria uma acentuada alteração da praia, na zona de influência dos 3 esporões. Verificar-se-ia um forte avanço da linha de água a sotamar e um recuo a barlamar de cada uma dessas obras, o que originaria uma acentuada reorientação para sul da linha de água nas duas células.

4.6 Enchimento da praia da Figueira da Foz

O exemplo que se acaba de apresentar é um caso teórico, destinado a demonstrar a metodologia preconizada para o dimensionamento hidráulico de esporões. Não permite, por essa razão, aferir da acuidade de reprodução pelo modelo dos efeitos de retenção e transposição destas obras e da evolução da linha de água que lhes está associada.

Tem interesse, por isso, considerar os resultados da simulação do caso real do enchimento da praia da Figueira da Foz para evidenciar a capacidade de resposta do modelo. O alargamento desta praia, ocorrido na segunda metade do século passado, deveu-se à retenção das areias pelo molhe norte da embocadura do Mondego, o qual se pode assimilar a um esporão de grande comprimento.

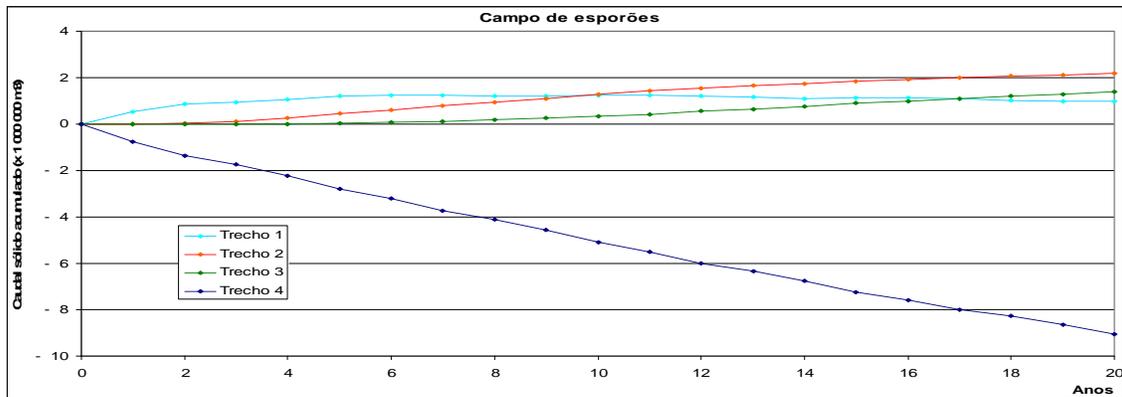


Figura 11– Balanço de transportes nos trechos 1 a 4. Série cronológica de 90-95.

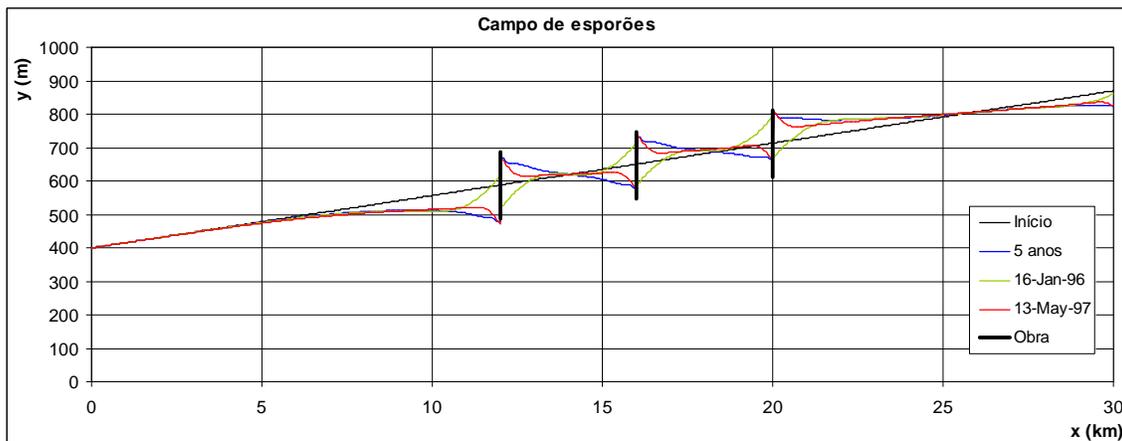


Figura 12- Simulação do efeito de temporais. Campo de esporões. Série cronológica de 90-99.

Disponham-se, neste caso, de dados muito pormenorizados de monitorização da evolução da linha de água, entre 1963 e 1990, que cobriam todo o período de enchimento da praia, resultante da construção do molhe de 700 m que a limita a sul (VICENTE e CLÍMACO, 1998). Os mecanismos de acumulação e transposição das areias usados na programação do modelo permitiram efectuar a simulação dessa evolução e verificar a concordância dos seus resultados com os dados de monitorização de que se dispunha (Figura 13).

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Verifica-se que a aplicação de modelos de evolução de linhas de costa introduz algum progresso no dimensionamento de esporões isolados e campos de esporões.

Destacam-se, nesta metodologia, os seguintes aspectos:

- É necessário dispor de longas séries cronológicas reais da agitação marítima que incide na praia. Estas são obtidas a partir da aplicação de modelos numéricos de propagação às correspondentes séries de registo dos parâmetros das ondas, normalmente disponíveis para o largo.
- Simula-se, numa primeira fase, com estes dados de agitação marítima e ainda sem esporões, a dinâmica do trecho de costa a proteger. Consegue-se obter, desta forma, uma melhor compreensão do fenómeno erosivo e a quantificação dos fluxos de areia, défice aluvionar e taxas de recuo. Esta fase permite a calibração do modelo o qual poderá ser ajustado para reproduzir correctamente o processo de erosão.

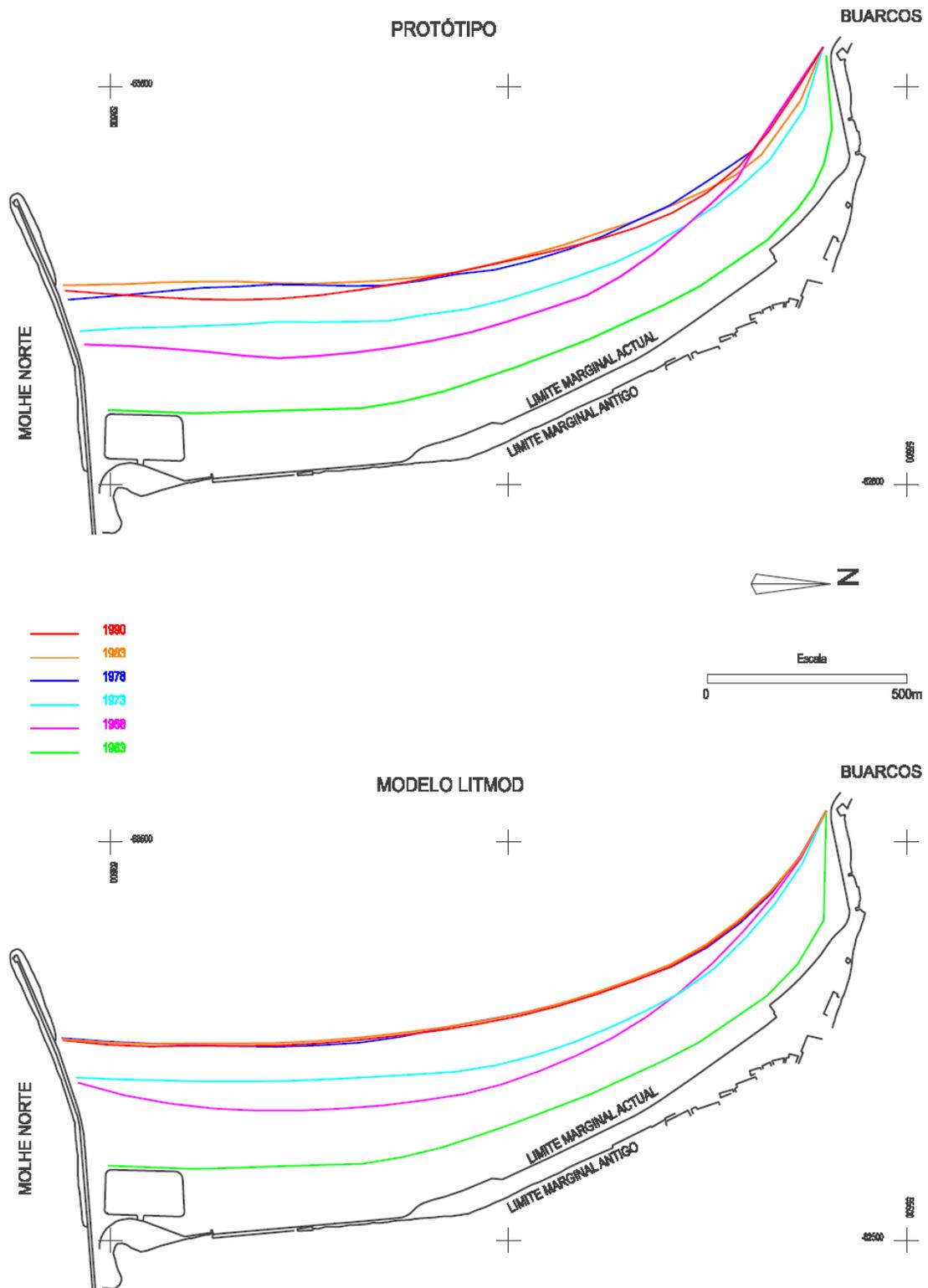


Figura 13 - Simulação do enchimento da praia da Figueira da Foz.

- A simulação é repetida com introdução dos esporões, analisando-se alternativas de localização, número e comprimento, de forma a otimizar a intervenção. Esta simulação permite ainda efectuar uma previsão da evolução e estabilização da linha de água após a construção das obras.
- Podem ainda ser efectuadas simulações complementares, para previsão de variações morfológicas decorrentes de temporais intensos e da natural variabilidade inter-anual da agitação marítima.

BIBLIOGRAFIA

BIRKEMEIER, W. (1985). "Field Data on Seaward Limit of Profile Changes". *Journal of Waterways Ports, Coastal and Ocean Engineering*, Vol. II, nº 3, ASCE (USA), pp. 598-602.

BRAMPTON, A.; MOTYKA, J. (1983). "The effectiveness of Groynes", in *Shoreline Protection*, ICE, London (UK).

CEHIDRO (1988). "Carta de Risco do Litoral", *Instituto da Água*, Lisboa (Portugal).

COELHO, C. D. (2005). "Riscos de Exposição de Frentes Urbanas para Diferentes Intervenções de Defesa Costeira", *Dissertação, Universidade de Aveiro* (Portugal).

GODA, Y.; TAKAYAMA, T.; SZUKI, Y. (1978). "Diffraction Diagrams for Directional Random Waves", in *16th Conference on Coastal Engineering*, Hamburgo (Alemanha).

HANSON, H. (1987). "Genesis - A Generalized Shoreline Change Numerical Model for Engineering Use", *Lund University, Institute of Science and Technology*, Sweden.

TEIXEIRA, S. B. (1994). "Dinâmica Morfossedimentar da Ria de Aveiro (Portugal)", *Universidade de Lisboa*, (Portugal).

VICENTE, C. (1991). "Aperfeiçoamento de Métodos de Modelação Matemática e Física Aplicáveis a Problemas de Dinâmica Costeira", *LNEC*, Lisboa (Portugal).

VICENTE, C.; CLÍMACO, M. (2003). "Evolução de Linhas de Costa. Desenvolvimento e Aplicação de um Modelo Numérico", *ITH 42, LNEC*, Lisboa (Portugal).

VICENTE, C.; CLÍMACO, M. (1998). "Análise da Dinâmica Costeira do Trecho. Cabo Mondego - Estuário do Mondego. Erosões em Buarcos". *Rel. 88/98 - NET. LNEC*. Lisboa, (Portugal).

WIEGEL, R. (1964). *Oceanographical Engineering*.