



LABORATÓRIO NACIONAL
DE ENGENHARIA CIVIL

DEPARTAMENTO DE HIDRÁULICA E AMBIENTE
Núcleo de Estuários e Zonas Costeiras

Proc. 0604/11/16262

METODOLOGIA DE APLICAÇÃO DE UM MODELO DE EVOLUÇÃO DE LINHAS DE COSTA

Estudo integrado no Projecto Morfodinâmica de Praias do
Plano de Investigação Programada (PIP) do LNEC
para 2005-2008

Lisboa • Setembro de 2007

I&D HIDRÁULICA E AMBIENTE

RELATÓRIO 283/2007 – NEC

METODOLOGIA DE APLICAÇÃO DE UM MODELO DE EVOLUÇÃO DE LINHAS DE COSTA

Descreve-se a metodologia de exploração do modelo Litmod. Trata-se de um conjunto de procedimentos que foram sendo estruturados no decurso de diversas aplicações a casos reais. Esses procedimentos apresentam alguns aspectos originais e aplicam-se: na elaboração e esquematização dos dados; na avaliação da fiabilidade das simulações; na caracterização da dinâmica sedimentar; no diagnóstico dos problemas; e no estudo de intervenções de correcção e melhoramento.

METHODOLOGY OF EXPLORATION OF A NUMERICAL SHORELINE CHANGE MODEL

The methodology of exploration of the Litmod model is described. The set of procedures has been structured and developed through several applications to real cases. The procedures have some original aspects and are applied to: the elaboration and schematization of the data; the evaluation of the reliability of the simulations; the characterization of sediment dynamics; the diagnosis of the problems; and the study of corrective and improvement actions.

METODOLOGIA DE APLICAÇÃO DE UM MODELO DE EVOLUÇÃO DE LINHAS DE COSTA

ÍNDICE DO TEXTO

1. INTRODUÇÃO.....	1
2. MODELO LITMOD	2
3. METODOLOGIA DE EXPLORAÇÃO DO MODELO	3
3.1 Considerações Gerais	3
3.2 Representação dos Dados de Base	3
3.2.1 Agitação Marítima	3
3.2.2 Morfologia	7
3.2.3 Evolução	8
3.2.4 Sedimentos	9
3.2.5 Condições nos Limites	9
3.3 Calibração	10
3.4 Caracterização da Dinâmica Sedimentar e Identificação das Causas da Evolução	11
3.5 Simulação de Intervenções	12
4. CONSIDERAÇÕES FINAIS	13

ÍNDICE DE FIGURAS

- Fig. 1 - Série cronológica de agitação marítima ao largo do Porto Santo de 2002 (Capitão et al. , 2003).
- Fig. 2 - Regime anual de agitação marítima ao largo do Porto Santo (Vicente et al. 2005).
- Fig. 3 - Transposição do esporão. Profundidade de fecho e no extremo da obra.
- Fig. 4 - Praia do Porto Santo. Esquema de estabelecimento do modelo Litmod (Vicente et al., 2004).
- Fig. 5 - Caudal sólido litoral numa posição a meio da praia do Porto Santo (R5). Valores acumulados no período 1997-2002. Resultados do modelo Litmod (Vicente et al., 2005).
- Fig. 6 – Distribuição do transporte litoral num perfil central da praia do Porto Santo. Resultados do modelo Litmod (Vicente et al., 2005).

ÍNDICE DE QUADROS

- Quadro 1 – Exemplo da análise comparativa de soluções de melhoramento da praia do Porto Santo (Vicente et al., 2004)

METODOLOGIA DE APLICAÇÃO DE UM MODELO DE EVOLUÇÃO DE LINHAS DE COSTA

1. INTRODUÇÃO

O primeiro modelo de evolução de linhas de costa suficientemente completo, com possibilidade de aplicação ao estudo de casos práticos de dinâmica costeira, foi o Genesis. Trata-se de um modelo numérico unidimensional, elaborado na década de 80, cuja designação resulta de Generalized model for simulating shoreline change (Hanson, 1987).

Dado o progresso que esta nova forma de modelação representava, resolveu o sector de dinâmica costeira do LNEC desenvolver um modelo do mesmo tipo. A tarefa foi iniciada em 1990 (Vicente, 1991), tendo sido facilitada pela publicação detalhada pelo autor do Genesis das bases físicas e numéricas do seu programa.

Ficou o LNEC a dispor do modelo Litmod, de características e estrutura semelhante ao Genesis, o qual foi aplicado à resolução de diversos problemas concretos de engenharia costeira e beneficiou de sucessivos desenvolvimentos, determinados por exigências dessas aplicações.

O modelo 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; refacção de ondas de pequena amplitude sobre batimetria paralela, nas proximidades da rebentação; e difracção decorrente da formulação de Wiegel (1964) e Goda e al. (1978).

Apesar de não se ter optado por formulações mais complexas, o modelo evidenciou boas potencialidades como instrumento de apoio a estudos de dinâmica costeira, nomeadamente no diagnóstico de causas de desequilíbrios e na avaliação funcional de alternativas de reabilitação e melhoramento de praias. Destacam-se as seguintes vantagens da sua aplicação: capacidade de simular a interacção da dinâmica natural com obras costeiras e alimentação artificial; possibilidade de tratar trechos de grande comprimento, da ordem das dezenas de quilómetros, e testar evoluções de longo prazo, até algumas dezenas de anos; e flexibilidade de utilização, admitindo a adaptação dos módulos de cálculo às particularidades de cada situação concreta.

As bases físicas e numéricas do modelo e as suas principais aplicações foram já objecto de publicações com informação detalhada (Vicente, 1991; Vicente e Clímaco, 2003).

Nesta comunicação apresenta-se a metodologia de exploração do Litmod, conjunto de procedimentos que foram sendo estruturados no decurso das aplicações a casos reais. Estes apresentam alguns aspectos originais e aplicam-se: na elaboração e esquematização dos dados; na avaliação da fiabilidade das simulações; na caracterização da dinâmica sedimentar; no diagnóstico dos problemas; e no estudo de intervenções de correcção e melhoramento.

Um modelo de evolução de linhas de costa é um instrumento de grande utilidade na abordagem de diversos problemas: reabilitação de praias afectadas por surtos erosivos; alargamento e melhoramento de praias; criação de praias artificiais; previsão da evolução de trechos de costa em desequilíbrio; previsão dos efeitos de obras costeiras sobre o equilíbrio das praias; e análise de medidas mitigadoras de erosões.

2. MODELO LITMOD

Trata-se de um modelo numérico unidimensional em que a evolução da costa é representada pelas variações de posição da linha de água. O seu funcionamento baseia-se no cálculo do transporte litoral, efectuado a partir das características das ondas na rebentação, e na aplicação da equação da continuidade aos volumes de areia movimentados.

A variação da posição 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.

São elementos de base no cálculo dos caudais sólidos: as alturas, os períodos e os ângulos das ondas na rebentação. A posição da rebentação, e consequentemente os valores desses parâmetros, são afectados pela evolução da posição da linha de água, pelo que as características da onda na rebentação são objecto de um cálculo iterativo que tem em conta as profundidades que determinam a rebentação.

O modelo é aplicável a simulações da evolução de uma linha de costa, onde coexistam praias e trechos rochosos, em condições naturais ou com obras e intervenções de alimentação artificial. No caso de evoluções naturais, poderá permitir compreender a dinâmica e a configuração de uma costa sem obras mas onde possam existir fontes aluvionares, saliências rochosas ou ilhas, que produzam retenção de sedimentos ou efeitos de difracção, e prever alterações decorrentes das oscilações naturais da alimentação de areias ou das taxas de transporte. Pode também simular os ganhos e perdas aluvionares provenientes: de cursos de água que debitem para a costa; da erosão de falésias; e de actividades de extracção de areias. Pode ainda ter em conta os efeitos de diversos tipos de obras que afectam o equilíbrio de uma costa: molhes, esporões, defesas frontais e quebra-mares destacados. Pode tratar não só obras isoladas como combinações de vários tipos, associadas ou não a alimentação artificial.

3. METODOLOGIA DE EXPLORAÇÃO DO MODELO

3.1 Considerações Gerais

Nos artigos de divulgação da especialidade não se encontra informação significativa sobre os aspectos práticos de exploração dos modelos de evolução de linhas de costa.

No caso do Litmod, a metodologia de exploração foi sendo desenvolvida à medida que se iam efectuando sucessivas aplicações a casos reais. Essa metodologia compreende: a elaboração e esquematização dos dados, em particular de agitação marítima, morfologia, evolução da linha de costa, característica dos sedimentos e condições nos limites; a calibração do modelo através da comparação dos seus resultados com os dados de evolução morfológica; a selecção dos parâmetros de caracterização da dinâmica sedimentar; o diagnóstico dos desequilíbrios eventualmente existentes; e a simulação de alternativas de intervenção de engenharia costeira visando reabilitar ou melhorar a praia.

A apresentação dessa metodologia será ilustrada com elementos e resultados de uma recente aplicação do modelo à praia do Porto Santo (Madeira).

3.2 Representação dos Dados de Base

3.2.1 Agitação Marítima

Um aspecto fulcral na modelação da dinâmica costeira é a reprodução fiável dos fluxos longitudinais de areia. São elementos de base no cálculo dos caudais sólidos, as alturas, os períodos e os ângulos das ondas na rebentação. Estes parâmetros, que têm de ser fornecidos como dados de modelação, apresentam alguma complexidade de selecção e elaboração, devido ao seu carácter aleatório.

Para simular as movimentações sedimentares é necessário considerar um regime de agitação marítima que cubra um período de vários anos, de onde seja possível extrair médias anuais, padrões sazonais e oscilações inter-
anuais.

Numa primeira fase procura-se caracterizar a agitação marítima ao largo do trecho a simular. Essa caracterização pode ser efectuada de duas formas, em função dos dados disponíveis:

- No caso de os registos não apresentarem demasiadas lacunas elaboram-se séries cronológicas dos rumos, alturas significativas e períodos (Fig. 1). Como é necessária uma série cronológica completa, as falhas de registo podem ser preenchidas duma das seguintes formas: substituindo os dias em falta pelos registos disponíveis dos mesmos dias de um ano com características de agitação marítima próximas da média; usando para preenchimento de lacunas dados de modelos de *hindcast*, após um procedimento de aferição e correcção dos resultados do modelo por comparação com valores registados na natureza.

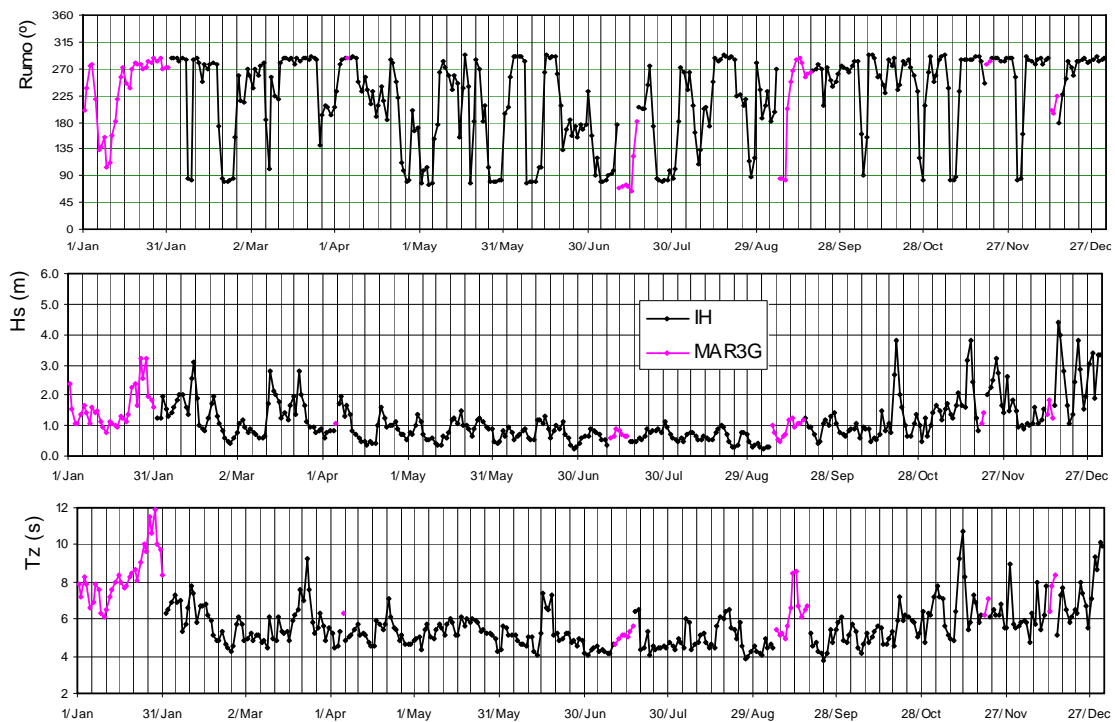


Figura 1 – Série cronológica de agitação marítima ao largo do Porto Santo de 2002 (Capitão et al., 2003).

(Registos do Instituto Hidrográfico com lacunas colmatadas com resultados do modelo de *hindcast* Mar3G do Instituto de Meteorologia.)

- Se as falhas de registo forem muito numerosas e extensas efectua-se a análise estatística das frequências de ocorrência ao largo dos rumos, alturas significativas e períodos da série, para definir o regime médio anual (Fig. 2). Elabora-se ainda, para cada um dos sectores de direcção, a distribuição conjunta de frequências de alturas significativas e períodos.

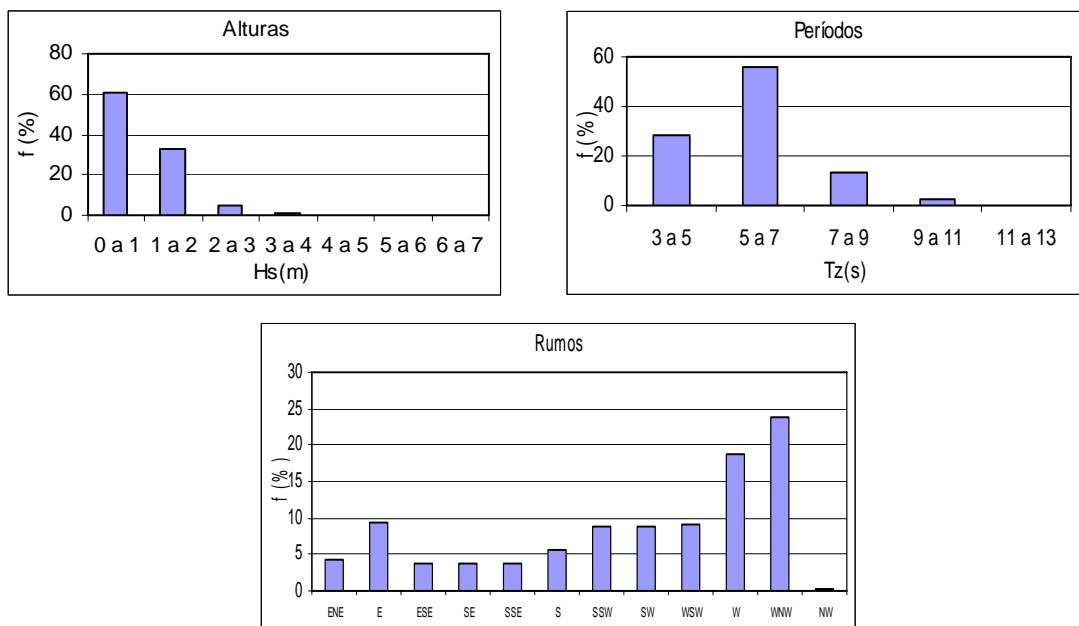


Fig. 2 – Regime anual de agitação marítima ao largo do Porto Santo (Vicente et al. 2005).

As ondas do largo sofrem alterações significativas de rumos e alturas, no seu percurso até à orla costeira, devido aos fenómenos de refacção, difracção, reflexão e empolamento. Esses efeitos determinam que uma onda com características uniformes ao largo possa apresentar variações sensíveis de rumo e de altura significativa numa batimétrica próxima da costa. São essas variações longitudinais que explicam as diferentes configurações de equilíbrio das praias.

Para uma boa simulação da dinâmica sedimentar e do equilíbrio morfológico de uma praia é indispensável a correcta reprodução das características das ondas que nela incidem e da variação dessas características ao longo do seu desenvolvimento.

Como os modelos de evolução de linhas de costa necessitam de dados de agitação marítima em pontos bastante próximos da orla costeira, é necessário transferir os dados representativos das ondas ao largo, já referidos, para uma **batimétrica de aproximação**. Esta deve situar-se em pequenas profundidades, apenas ligeiramente superiores às profundidades de fecho dos perfis de praia do trecho em estudo. A profundidade de fecho num determinado perfil corresponde à cota a partir da qual o transporte de areias é tão diminuto que não origina sensíveis variações morfológicas do perfil ao longo do ano.

Para definir as alterações dos parâmetros da agitação marítima entre o largo e a batimétrica de aproximação torna-se necessário efectuar um **estudo de propagação das ondas** entre essas duas zonas, através de modelos numéricos capazes de simular os fenómenos de refacção, difracção, reflexão e empolamento. É reproduzida a propagação de um conjunto de ondas individuais, normalmente numeroso, que cubra toda a gama de valores dos três parâmetros da agitação marítima (H, T, θ), existente nos dados. A título de exemplo, foram utilizados no estudo da praia do Porto Santo 11 rumos, 3 alturas e 3 períodos de onda, o que obrigou a 99 simulações. Apresentam-se na Fig. 3 os resultados gráficos da propagação de uma dessas simulações.

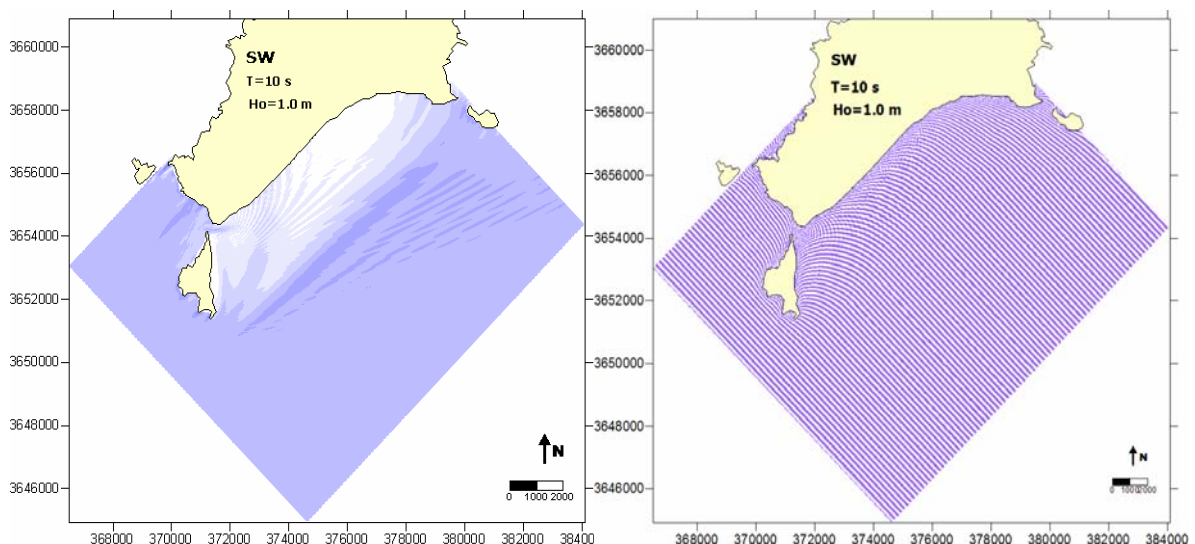


Figura 3 – Praia do Porto Santo. Variação de alturas e rumos na propagação da onda: =SW; $H=1$ m; e $T=10$ s (Fortes et al., 2003).

A partir do conjunto de resultados da modelação da propagação elaboram-se **tabelas de transferência** da agitação marítima entre o largo e a batimétrica de aproximação, abrangendo o contorno geral da praia.

Faz-se de seguida a aplicação destas tabelas às séries cronológicas do largo para obter as correspondentes séries locais, em pontos distribuídos ao longo da batimétrica de aproximação. O número de séries locais deverá ser função da maior ou menor variação das características das ondas ao longo da orla da praia, resultante da propagação. Nas aplicações efectuadas utilizaram-se 6 a 12 séries locais, sendo os valores dos parâmetros das ondas nas células intermédias interpolados pelo modelo de linha de costa.

Como os três parâmetros de cada onda da série cronológica só excepcionalmente coincidem com os das ondas cuja propagação se simulou, o procedimento de transferência é efectuado por uma rotina de cálculo numérico que executa uma interpolação tripla, apoiada nos dados da tabela.

No caso de se estar a trabalhar com um conjunto de ondas representativas do regime ao largo, situação decorrente da existência de grandes lacunas nos dados, procede-se da seguinte forma:

- Concentra-se a totalidade dos dados de agitação marítima ao largo num número limitado de rumos, elaborando-se para cada um deles as distribuições conjuntas de frequências de alturas e períodos.
- Organizam-se esses dados numa sequência aleatória de ondas individuais e transferem-se do largo para os diferentes pontos da batimétrica de aproximação, por interpolação apoiada nas funções de transferência, de forma igual à indicada no caso das séries cronológicas.

Para além do objectivo principal de funcionarem como dados para a aplicação do modelo, as séries locais permitem uma primeira interpretação global da morfologia de equilíbrio da praia.

3.2.2 Morfologia

Para o funcionamento do modelo Litmod é exigida informação sobre a morfologia da costa em planta e em perfil. As simulações fornecem as

evoluções da posição da linha de água ao longo do tempo. Embora não sejam simuladas alterações dos perfis de praia, os dados que os descrevem são necessários para rotinas de cálculo de distribuição do transporte sólido ao longo do perfil e para avaliação da intensidade das transposições de obstáculos transversais, constituídos por saliências naturais ou obras.

A **linha de base do modelo**, segmento de recta subdividida nas numerosas células de cálculo, deve ter uma orientação coincidente com o desenvolvimento principal da linha de água do trecho de costa em análise. A definição de uma **linha de água** no modelo é efectuada através da digitalização do seu contorno natural e interpolação, no centro de cada célula, do valor da ordenada relativa à linha de base (Fig. 4).

O comprimento das células deve ser estabelecido tendo em atenção os fenómenos a simular e eventuais problemas de estabilidade numérica. Quando está em causa apenas o transporte sólido litoral e os seus balanços, em praias de grande desenvolvimento, é adequado utilizar comprimentos de células relativamente grandes, da ordem dos 50 a 100 metros. No caso de ser necessário simular os efeitos da difracção induzida por uma saliência natural ou uma obra, esses comprimentos devem ser sensivelmente reduzidos, para valores da ordem de 5 a 10 metros. Eventuais instabilidades no funcionamento do modelo resolvem-se diminuindo o passo de cálculo. A experiência mostrou não ser necessário descer o passo de cálculo abaixo de 0,05 dias.

A definição completa da linha de água compreende ainda a informação sobre a natureza da costa em cada célula de forma a distinguir se ela faz parte de um trecho de praia arenosa, de costa rochosa, ou de praia com falésia erodível.

Como a configuração transversal da praia é um dado necessário, é introduzida a definição de um ou mais **perfis de praia**, obtida por digitalização num levantamento topo-hidrográfico.

Os dados da morfologia completam-se com a inclusão das **obras fixas** existentes: esporões, molhes, defesas frontais e quebra-mares destacados.

Estas são definidas pelo seu comprimento e indicação das células onde se localizam. No caso de se encontrarem em construção são ainda fornecidos a data de início e o ritmo de crescimento da obra.

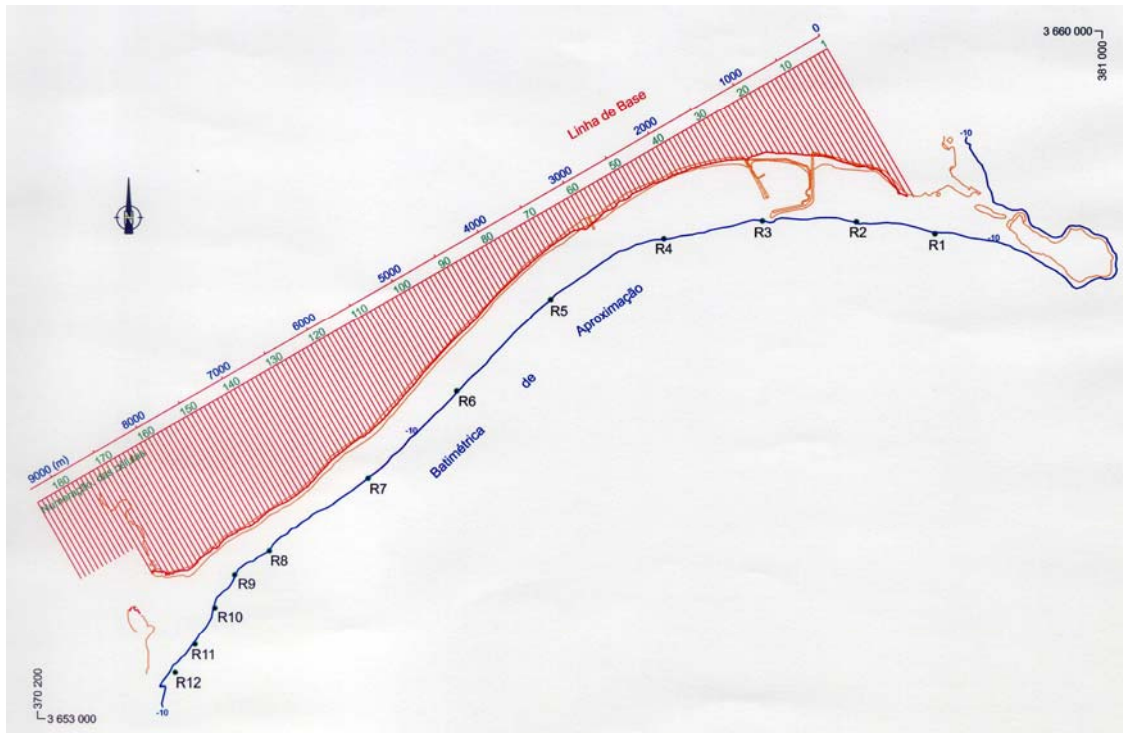


Fig. 4 – Praia do Porto Santo. Esquema de estabelecimento do modelo Litmod (Vicente et al., 2004).

3.2.3 Evolução

As praias são formações dinâmicas, em permanente movimentação sob acção das ondas. Nessa movimentação interessa caracterizar os padrões de evolução morfológica que seja possível identificar, pois é através da sua simulação que se pode aferir a capacidade do modelo para reproduzir com fidelidade os fenómenos em causa.

É normalmente possível identificar, a partir de levantamentos topo-hidrográficos e de linhas de água de diferentes datas, dados disponíveis em maior ou menor número, os seguintes tipos de **evoluções**:

- **Irreversíveis**, de longo prazo, devidas: a alteração dos fluxos de areia debitados para o trecho de costa pelos cursos de água que nele desaguam; a obras fixas, como molhes, esporões, quebra-mares e

defesas aderentes; a acções de alimentação artificial; e a extracção de areias nas praias.

- **Sazonais**, traduzidas por oscilações características da linha de água e dos perfis transversais, resultantes da existência de dois períodos ao longo do ano, Verão e Inverno marítimos, com sensíveis diferenças nos parâmetros da agitação marítima.
- **Inter-anuais**, caracterizadas por oscilações significativas da linha de água, com enchimento de um dos extremos da praia e emagrecimento do extremo oposto. Podem verificar-se devido à ocorrência de períodos de um ou mais anos em os regimes de agitação marítima se afastam sensivelmente dos valores médios anuais.

3.2.4 Sedimentos

O modelo necessita de dados que caracterizem a granulometria dos sedimentos e as perdas e ganhos aluvionares que ocorrem no trecho em estudo.

A informação sobre a granulometria dos sedimentos consiste na indicação do seu diâmetro mediano, o qual é utilizado em dois tipos de cálculos: no transporte sólido litoral, pois é um parâmetro que figura nalgumas fórmulas; e na profundidade de fecho, parâmetro que afecta a distribuição do transporte sólido litoral ao longo do perfil.

Nos balanços aluvionares célula a célula, que constituem a base de funcionamento do modelo, devem ser incluídos as perdas e os ganhos que eventualmente ocorram. As perdas poderão ser constituídas por extracção de areias, fugas irreversíveis para maiores profundidades e transporte eólico da parte emersa das praias para as dunas litorais. Os ganhos podem ser devidos ao afluxo aluvionar proveniente de: cursos de água que drenem para o trecho de costa; desagregação de falésias; transporte eólico a partir de dunas litorais; e alimentação artificial.

O modelo considera as fontes e sumidouros de sedimentos, através de um caudal de alimentação, definido em todas as células, o qual apresenta normalmente o valor zero. O seu valor só é diferente de zero, positivo ou

negativo, quando há afluxo ou desaparecimento de areias na célula, não dependentes do transporte litoral.

3.2.5 Condições nos Limites

O modelo contabiliza, nos balanços de transporte, os fluxos de areia nos limites de cada célula. Os correspondentes caudais sólidos são calculados por uma rotina que tem como dados os parâmetros da agitação marítima e a orientação local da linha de água. Esta orientação é definida pelas ordenadas da referida célula e da célula adjacente, razão pela qual não é possível calcular o transporte sólido litoral à esquerda da primeira célula $Q(0)$ e à direita da última $Q(n)$. Estes caudais têm por isso que ser introduzidos como dados quer directamente quer por expressões de cálculo, baseados nos valores dos caudais das células adjacentes.

No caso, bastante frequente, em que o trecho a simular constitui uma unidade sedimentar independente, isto é, sem trocas de sedimentos com os trechos adjacentes, a situação é bem definida e resolve-se tomando nos limites:

$$Q(0) = Q(n) = 0$$

Quando num ou nos dois limites, embora existindo fluxo sedimentar, se puder admitir que a linha de água local é estável, não sofrendo recuos ou avanços significativos, as condições nos limites serão:

$$Q(0) = Q(1) \quad \text{e} \quad Q(n) = Q(n - 1)$$

Nestas condições os caudais nas células 1 e n são iguais à esquerda e à direita o que implica um balanço nulo nessas células, em cada passo de cálculo, mantendo-se constantes as suas ordenadas.

Pode ainda ser necessário simular, nos limites, situações em que ocorram fluxos aluvionares associados a recuos e avanços da linha de água. Como os extremos do modelo se estabelecem suficientemente afastados da principal zona de evolução, é aceitável considerar que os avanços e recuos se processam de tal forma que a linha de água local se desloca paralelamente a si própria. Nestas circunstâncias, o avanço ou recuo das células extremas em cada passo de cálculo deve ser igual ao das células adjacentes, o que

corresponde a balanços iguais entre os caudais à esquerda e à direita nas células 1 e 2 e n e n - 1, o que se traduz por:

$$Q(0) = 2Q(1) - Q(2) \quad \text{e} \quad Q(n) = 2Q(n - 1) - Q(n - 2)$$

3.3 Calibração

Após a preparação do modelo, eventual adaptação ao caso em estudo, elaboração dos dados e definição das condições nos limites, é necessário efectuar a **calibração**.

Esta operação visa avaliar a capacidade que o modelo apresenta para reproduzir com fidelidade os fenómenos sedimentares, através de testes de simulação de evoluções morfológicas sofridas pelo trecho em estudo. Dentre as evoluções anteriormente referidas têm particular interesse na calibração as irreversíveis de longo prazo.

Verificam-se normalmente no início do processo de calibração algumas deficiências na reprodução das evoluções morfológicas. A menos de erros nos dados, ou na sua introdução no modelo, atribuem-se essas incorrecções à falta de rigor na definição do regime de agitação marítima ao largo e sua transferência para as proximidades da praia. Estas deficiências são normalmente corrigidas através da introdução de pequenas rotações dos rumos de alguns dos regimes locais.

Sempre que possível, o processo evolutivo de longo prazo deve ser simulado partindo de uma situação inicial de morfologia anterior à ocorrência dos desequilíbrios em estudo, de forma a serem abrangidas todas as fases da evolução.

3.4 Caracterização da Dinâmica Sedimentar e Identificação das Causas da Evolução

A calibração, ao simular os fenómenos sedimentares e a evolução do trecho de costa, disponibiliza os elementos necessários à caracterização da dinâmica sedimentar e à interpretação das origens dos desequilíbrios que eventualmente existam.

A **dinâmica sedimentar** quer para a situação presente quer para a situação anterior aos desequilíbrios pode ser caracterizada pelos padrões do transporte sólido litoral. São normalmente definidos, em vários pontos do trecho estudo: o saldo anual do transporte sólido litoral; as correspondentes parcelas de movimentação nos dois sentidos da praia; os caudais máximos diários; e a distribuição das intensidades de transporte nas diferentes profundidades do perfil. Apresentam-se nas Figs. 5 e 6 alguns resultados dessa análise no caso da praia do Porto Santo.

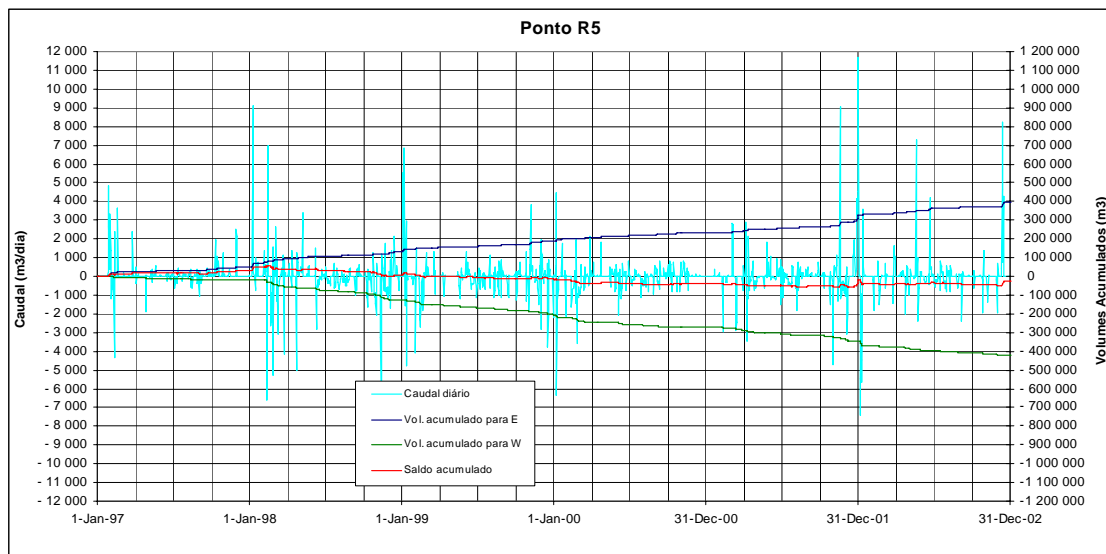


Fig. 5 - Caudal sólido litoral numa posição a meio da praia do Porto Santo (R5). Valores acumulados no período 1997-2002. Resultados do modelo Litmod (Vicente et al., 2005).

Os desequilíbrios que podem ocorrer num trecho de costa manifestam-se como evoluções irreversíveis, de longo prazo. As **causas da evolução** podem ser, como antes se referiu: a alteração dos fluxos de areia debitados para o trecho de costa pelos cursos de água que nele desaguam; a construção de obras fixas, como molhes, esporões, quebra-mares e defesas aderentes; as acções de alimentação artificial; e a extracção de areias nas praias.

As alterações de morfologia e de alimentação e perda de areias, devidas a obras costeiras, são traduzidas pelos dados fornecidos ao modelo na fase de calibração.

As simulações então efectuadas permitem analisar o efeito dos diferentes factores e avaliar a importância relativa do seu contributo para o desencadeamento e permanência do processo evolutivo.

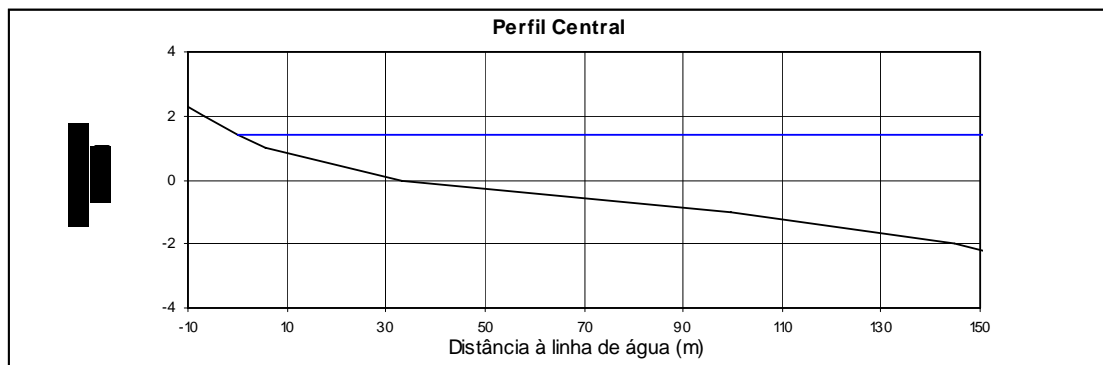
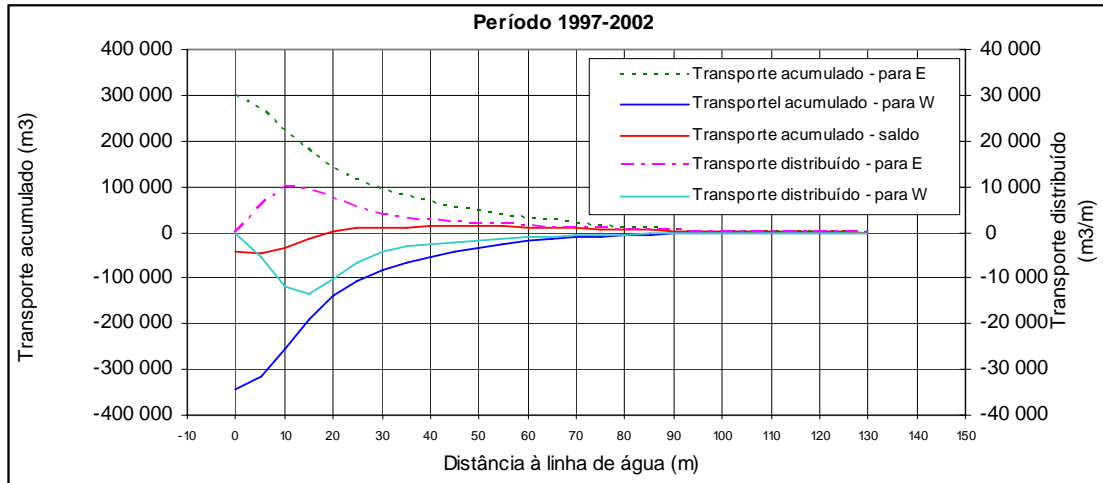


Fig. 6 - Distribuição do transporte litoral num perfil central da praia do Porto Santo. Resultados do modelo Litmod (Vicente et al., 2005).

3.5 Simulação de Intervenções

A caracterização da dinâmica sedimentar e a avaliação das causas de desequilíbrios eventualmente existentes, fornecem a informação necessária para o estabelecimento de alternativas de intervenção destinadas a alcançar os objectivos propostos pelo estudo. Estas alternativas são usualmente constituídas por alimentação artificial, a qual pode ser complementada com obras fixas.

O modelo pode ainda dar uma contribuição importante para a selecção da alternativa mais adequada. Para esse efeito é simulada cada uma dessas alternativas e efectuada uma análise comparativa do seu funcionamento, de forma a revelar a que apresenta maior eficácia. No caso da praia do Porto Santo estudaram-se quatro alternativas de alimentação artificial, correspondentes a volumes de enchimento compreendidos entre 500 000 e 1 000 000 m³, tendo sido avaliados os correspondentes alargamentos da praia. As intervenções incidiram no trecho Este, na frente marítima de Vila Baleira, e abrangeram uma extensão de 1,5 km (Quadro 1).

Quadro 1 – Exemplo da análise comparativa de soluções de melhoramento da praia do Porto Santo (Vicente et al., 2004).

Local	SITUAÇÕES DE ALARGAMENTO DA PRAIA APÓS O INÍCIO DO ENCHIMENTO (m)											
	Alternativa 1			Alternativa 2			Alternativa 3			Alternativa 4		
	(500 000 m ³)			(750 000 m ³)			(1 000 000 m ³)			(550 000 m ³ com esporão)		
	6 meses	10 anos	22 anos	6 meses	10 anos	22 anos	6 meses	10 anos	22 anos	6 meses	10 anos	22 anos
Extremo W da zona de alimentação	34	16	9	50	27	18	67	37	28	35	17	12
Ponte-Cais	36	24	14	54	39	26	72	54	38	37	27	27
450 m a E da Ponte-Cais	36	27	21	54	42	33	72	56	44	38	37	35
Extremo E da zona de alimentação	34	22	26	51	33	36	67	43	47	45	33	34
Média	35	22	18	52	35	28	70	48	39	39	29	27

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O desenvolvimento dos modelos numéricos morfo-sedimentares e a sua utilização na resolução de problemas reais de engenharia costeira têm tido, na última década, um apreciável progresso.

A utilidade destes modelos depende não só da sua capacidade de simulação matemática dos processos físicos envolvidos nos problemas de engenharia costeira, mas também da metodologia usada na sua aplicação a casos reais.



Fig. 7 – Melhoria da praia de Porto Santo. Alternativa 2 (Vicente et al., 2004).

Essa metodologia de exploração compreende: a elaboração e esquematização dos dados, em particular de agitação marítima, morfologia, evolução da linha de costa, característica dos sedimentos e condições nos limites; a calibração do modelo através da comparação dos seus resultados com os dados de evolução morfológica; a selecção dos parâmetros de caracterização da dinâmica sedimentar; o diagnóstico dos desequilíbrios eventualmente existentes; e a simulação de alternativas de intervenção de engenharia costeira visando reabilitar ou melhorar a praia.

Nos artigos de divulgação da especialidade não se encontra informação significativa sobre os aspectos práticos de exploração dos modelos de evolução de linhas de costa, razão que motivou esta apresentação da metodologia usada nas aplicações do modelo Litmod. No caso deste modelo a metodologia de exploração foi sendo desenvolvida gradualmente, à medida das exigências dos diferentes casos de estudo.

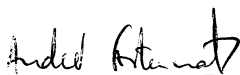
Na evolução ocorrida há a destacar a caracterização da agitação marítima que passou de uma descrição estatística para o uso de registos de longas séries cronológicas, sempre que estes estão disponíveis. Consegue-se, desta

forma, um maior realismo na representação das condições de actuação das ondas sobre a praia e na simulação das evoluções da linha de água. Este procedimento permite o aprofundamento dessas simulações de forma a contemplar novos aspectos, decorrentes da variabilidade sazonal e inter-anual da agitação marítima e da incidência de temporais.

Lisboa, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Setembro de 2007.

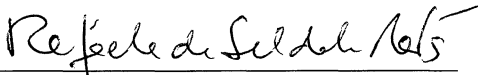
VISTOS

O Chefe do Núcleo de
Estuários e Zonas Costeiras



André B. Fortunato

A Directora do Departamento de
Hidráulica e Ambiente

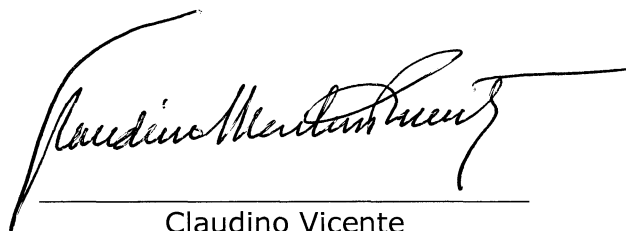


Rafaela de Saldanha Matos

AUTORIAS



Manuel Clímaco
Engº Civil, Inv. Principal



Claudino Vicente
Engº Civil, Inv. Coordenador

BIBLIOGRAFIA

- Birkemeier, W. (1985) - *Field Data on Seaward Limit of Profile Changes*. Journal of Waterways Ports, Coastal and Ocean Engineering, Vol. II, nº 3, p. 598-602. ASCE.
- Capitão, R.; Fortes, C. J.; Coli, A. (2003) - *Manutenção e Melhoramento da Praia do Porto Santo. Relatório 1: Caracterização e Propagação da Agitação Marítima. Volume 1: Regimes de Agitação Marítima*. Rel. 237/03, Agosto, LNEC, Lisboa.
- Clímaco, M.; Oliveira, F. B.; Vicente, C. (2005) - *Manutenção e Melhoramento da Praia do Porto Santo*. Comunicação apresentada ao III Congresso sobre Planeamento e Gestão das Zonas Costeiras dos Países de Expressão Portuguesa., Outubro, Maputo, Moçambique.
- Coastal Engineering Research Center CERC (1984) - *Shore Protection Manual*. U. S. Army Engineer Waterways Experiment Station. Vicksburg.
- Fortes, C. J.; Neves, M. G. (2003) - *Manutenção e Melhoramento da Praia do Porto Santo. Relatório 1: Caracterização e Propagação da Agitação Marítima. Volume 2: Cálculos de Refracção-Difracção com o Modelo Numérico REFDFI*. Rel. 237/03, Agosto, LNEC, Lisboa.
- Goda, Y.; Takayama, T.; Suzuki, Y.; 1978 - *Diffraction Diagrams for Directional Random Waves*. 16th Conference on Coastal Engineering, Hamburgo.
- Hallermeier, R. (1978) - *Uses for a Calculated Limit Depth to Beach Erosion*. Coastal Engineering. Hamburg, Germany. ASCE.
- Hanson, H. (1987) - *Genesis - A Generalized Shoreline Change Numerical Model for Engineering Use*. Lund University, Institute of Science and Technology. Sweden.
- Oliveira, e. M.; Fortunato, A. B.; Fortes, J.; Silva, I. G.; Vicente, C.; Clímaco, M. (1999) - *Protecção do Forte do Bugio contra a Acção de Ondas e Correntes*. Em: "Os Estuários de Portugal e os Planos de Bacia Hidrográfica". Associação EUROCOAST – PORTUGAL, Porto.
- Oliveira, F. B.; Clímaco, M.; Freire, P. S. (2002) - *Rehabilitation of Hac-Sá Beach (Macau). Phase 1- Volume 2: Characterization of the Sediment Dynamics and the Erosion Causes*. LNEC report 286/02. Portugal. Lisbon.
- Oliveira, F. B.; Clímaco, M. (2002) - *Rehabilitation of Hac-Sá Beach (Macau). Phase 2: Alternative Solutions for Beach Restoration*. LNEC report 331/02. Portugal. Lisbon.

- Vicente, C. (1991) - *Aperfeiçoamento de Métodos de Modelação Matemática e Física Aplicáveis a Problemas de Dinâmica Costeira*. LNEC, Lisboa.
- Vicente, C.; Clímaco, M. (1997) - *Protecção do Forte do Bugio. Estudos de hidrodinâmica e Sedimentologia. Estabilidade do Enchimento Artificial de Protecção*. Rel. 70/97 NET, LNEC. Lisboa.
- 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.
- Vicente, C.; Clímaco, M.; Oliveira, F. B. (2000) - *Lagoa Rodrigo de Freitas e Praias de Leblon, Ipanema e Arpoador: Solução Integrada de Reabilitação Ambiental. Relatório 3: Caracterização da Situação Actual. Volume 1: Dinâmica Costeira*. Rel.158/00 NET, LNEC, Lisboa, Mai 2000.
- Vicente, C.; Clímaco, M.; Oliveira, F. (2001) - *Lagoa Rodrigo de Freitas e Praias de Leblon, Ipanema e Arpoador. Solução Integrada de Reabilitação Ambiental. Relatório 7: Estudo de Pormenor da Solução Seleccionada. Volume 1: Dinâmica Costeira*. Rel. 08/01 - NET, LNEC, Lisboa, Jan 2001.
- Vicente, C.; Clímaco, M.; Oliveira, F. B. (2001) - *Estabilização da Marginal de Buarcos. Análise das Intervenções Complementares de Protecção*. Rel. 64/01 - NET, LNEC, Lisboa, Abr 2001.
- Vicente, C.; Clímaco, M. (2002) - *Marina do Lugar de Baixo (Ilha da Madeira). Estudo de Viabilidade da Nova Praia*. Rel. 116/02 - NET, LNEC, Lisboa, Mai 2002.
- Vicente, C.; Clímaco, M. (2003) - *Evolução de Linhas de Costa. Desenvolvimento e Aplicação de Um Modelo Numérico*. ICT-ITH 42. LNEC, Lisboa.
- Vicente, C.; Clímaco, M.; Oliveira, F.S.B.F. (2004) - *Manutenção e Melhoramento da Praia do Porto Santo. Relatório 3: Alternativas de Intervenção*. Rel. 320/04, Dezembro, LNEC, Lisboa.
- Wiegel, R.; 1964 - *Oceanographical Engineering*.

