

O modelo de evolução da linha de costa LTC: pressupostos, evolução, validação e aplicação

LTC shoreline evolution model: assumptions, evolution, validation and application

Márcia Lima^{@, 1}, Carlos Coelho¹

[@] Autor correspondente: marcia.lima@ua.pt

¹ Departamento de Engenharia Civil & RISCO, Universidade de Aveiro, 3810-193 Aveiro, Portugal.

RESUMO: A modelação numérica da evolução da posição da linha de costa assume um papel preponderante, não só na compreensão dos complexos fenómenos que envolvem a dinâmica das zonas costeiras, como no auxílio à gestão e planeamento costeiro. Existem diversos modelos numéricos para avaliar a possível evolução da linha de costa, sendo os mais utilizados e simples os modelos baseados na teoria de “uma linha” de Pelnard-Considère (1956). O modelo numérico LTC (*Long-Term Configuration*, Coelho, 2005), baseado na teoria de “uma linha”, foi desenvolvido com o objetivo de simular a médio e longo prazo a evolução da configuração da linha de costa, com base em diferentes cenários naturais e antropogénicos. O modelo foi desenvolvido em 2005, na Universidade de Aveiro, tendo sido, desde então, alvo de alterações e melhorias, não só na Universidade de Aveiro como na Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Desta forma, este trabalho pretende compilar toda a informação relevante relativa aos pressupostos considerados e correspondentemente validação, evolução e aplicação do modelo até à data, permitindo a sua utilização e compreensão por parte de utilizadores que já trabalhem com o modelo ou que o pretendam fazer.

Palavras-chave: modelo numérico, *Long-Term Configuration*, teoria de “uma linha”, posição da linha de costa, zona costeira.

ABSTRACT: The numerical modelling of the shoreline evolution is very important to understand the complexity of the processes related to the dynamic variability of sandy beaches and to support coastal zone planning and management. There are several numerical models to evaluate shoreline changes, however the simplest and most used models are based in the one-line theory (Pelnard-Considère, 1956). LTC (Long-Term Configuration) numerical model, developed by Coelho (2005), is based in oneline theory and simulates medium to long-term coastal configuration evolution, considering the evaluation of natural and anthropogenic scenarios. LTC was developed in 2005 at Aveiro University and since then it was modified and improved in collaboration with the Faculty of Engineering of the University of Porto. Thus, this work aims to assemble the existing information about LTC model, namely, the model assumptions and correspondent validations, the model evolution and its application so far. It is intended that this work allows the former and the new users to understand and to apply the model.

Keywords: numerical model, Long-Term Configuration, one-line theory, shoreline position, coastal zone.

1. INTRODUÇÃO

A modelação numérica da evolução da posição da linha de costa é indispensável, não só para compreender e prever a dinâmica dos sistemas costeiros, como para auxiliar uma efetiva tomada de decisões. De acordo com Hanson *et al.* (2003), não existe ainda um modelo universal para análise e previsão da evolução da costa na escala da dezena de anos. Os autores defendem que, dependendo da natureza do problema e dos objetivos do projeto, existe um número alargado de modelos com abordagens distintas e com pontos de vista específicos.

A evolução da morfologia costeira é o resultado da interação de processos físicos complexos que, na maior parte dos casos, não podem ser matematicamente representados de forma exata. As formulações numéricas são deterministas, baseadas em leis físicas conhecidas, ou semiempíricas, obtidas a partir de medições de campo ou em laboratório.

Os modelos analíticos de evolução da linha de costa são soluções fechadas da equação diferencial da conservação de massa, simplificada para o transporte de sedimentos sob condições de agitação marítima constantes no espaço e no tempo (Silva, 2010). O primeiro modelo deste tipo foi introduzido pela teoria de “uma linha” (Pelnard-Considère, 1956), que considera que o perfil de praia, limitado ao largo por uma profundidade de fecho para além da qual não existe movimento significativo dos fundos, se move paralelamente a si próprio.

Por outro lado, os modelos numéricos da evolução da linha de costa são uma generalização dos modelos analíticos, simulando a evolução da linha de costa para diferentes configurações de praia, podendo incluir diversos tipos de estruturas costeiras e condições de fronteira, sob ação da agitação marítima variável no espaço e no tempo (Silva, 2010).

Os modelos mais utilizados e simples para prever a evolução da posição da linha de costa são baseados na técnica de “uma linha”, que assume que o perfil de fundo se mantém constante mas pode ser deslocado na direção perpendicular à costa, como resultado dos fenómenos de erosão ou acreção. Os modelos de múltiplas linhas foram desenvolvidos para descrever o movimento das batimétricas a determinadas profundidades, de forma análoga aos modelos de uma linha. Apesar do detalhe adicional, estes modelos não obtiveram sucesso devido à dificuldade de relacionar de forma realista o transporte transversal e a distribuição do transporte longitudinal. Estes modelos requerem mais calibração e não resultam numa melhoria significativa dos resultados (Hanson *et al.*, 2003).

Segundo Vicente e Clímaco (2003), o funcionamento dos modelos numéricos unidimensionais baseia-se no cálculo

do transporte de sedimentos ao longo do litoral, efetuado a partir das características das ondas na rebentação e na aplicação da equação de conservação de massa dos 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 entram e a abandonam, num certo intervalo de tempo e admitindo-se que o perfil transversal no seu avanço ou recuo se desloca paralelamente a si próprio, sem alteração de forma.

Admite-se que a variação da topo-hidrografia no tempo é devida unicamente aos gradientes longitudinais do transporte sedimentar. Assim, o balanço dos volumes de sedimentos em transporte numa secção elementar do sector costeiro (Figura 1 - Esquema de definição de um modelo de 1-linha (Gravens *et al.*, 1991).) é traduzido

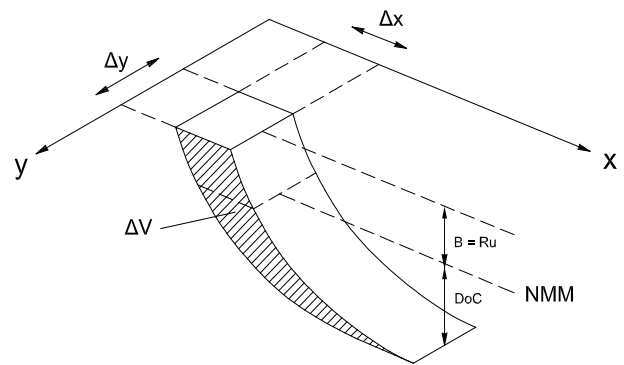


Figura 1 - Esquema de definição de um modelo de 1-linha (Gravens *et al.*, 1991).

$$\frac{\partial V}{\partial t} = \left(\frac{\partial Q}{\partial y} + q_x \right) \quad (1)$$

pela equação de conservação de massa, Equação 1 (Silva, 2010).

onde V representa o volume de sedimentos contido na secção de largura infinitesimal ∂y , Q a taxa de transporte longitudinal de sedimentos, q_x eventuais fornecimentos exteriores de sedimentos (fontes aluvionares, por exemplo) por unidade de largura de praia e t o tempo.

A conservação de massa ao longo de um comprimento infinitesimal da linha de costa expressa através da equação da conservação de massa (Equação 1), admitindo que

$$\frac{\partial x}{\partial t} = - \frac{1}{DoC + R_u} \left(\frac{\partial Q}{\partial y} - q_x \right) \quad (2)$$

o perfil se move paralelamente a si próprio (Figura 1 - Esquema de definição de um modelo de 1-linha (Gravens et al., 1991).), pode ser expressa segundo:

onde DoC representa a profundidade de fecho, R_u o limite de espraiamento máximo da onda e Q a taxa de transporte longitudinal de sedimentos. De referir que, segundo, Silva (2010), na expressão anterior foi considerado o parâmetro R_u , apesar de na formulação original ser admitida a altura da berma da praia (B), uma vez que ambos podem definir o limite do perfil ativo, respetivamente, de acordo com Hanson (1989) e Smith (2003).

Os modelos de configuração da linha de costa pretendem auxiliar o projeto da posição futura da zona litoral. Para efeitos de aplicação a casos reais e no mercado aberto a consultores existem diversos modelos que pretendem simular a evolução da linha de costa. O GENESIS (Hanson e Kraus, 1989), o LTC (Coelho, 2005), o LITMOD (Vicente e Clímaco, 2003), o LITPACK (DHI, 2009), o ONELINE (Dabees e Kamphuis, 1998) e o UNIBEST (Deltares, 2016), são alguns exemplos de modelos numéricos, baseados na teoria de uma linha.

O modelo numérico LTC, desenvolvido em Coelho (2005), é um modelo de simulação a médio e longo prazo, e foi desenvolvido com base nos pressupostos dos modelos existentes, apresentando no entanto algumas particularidades com o intuito de colmatar lacunas e melhorar a aproximação dos resultados à realidade.

Desde o seu desenvolvimento em 2005, que o modelo LTC tem vindo a ser aplicado em diversos estudos e trabalhos, tendo alguns dos quais motivado alterações e melhorias no algoritmo. Desta forma, o presente trabalho tem como objetivo descrever não só a versão inicial do modelo, como reunir toda a informação existente relativamente às alterações introduzidas no modelo e a aplicações baseadas no mesmo.

2. DESCRIÇÃO DO MODELO NUMÉRICO LTC

O modelo LTC admite o estabelecimento de cenários naturais e antropogénicos, permitindo a sua avaliação a médio e longo prazo, podendo também ser utilizado como ferramenta complementar na análise de situações de vulnerabilidade e risco à ação do mar e na escolha de soluções de engenharia para controlo da erosão (Coelho, 2005).

O LTC foi concebido para aplicação a praias arenosas, onde o principal processo que controla a evolução da linha de costa é o transporte longitudinal de sedimentos. Este depende das condições de agitação marítima, do nível da água do mar, da existência de fontes/sumidouros

de sedimentos, das características sedimentares e morfológicas da praia, das estruturas de defesa costeira existentes e das condições de fronteira da área de estudo. Pode ser entendido como uma combinação de um modelo de evolução de linha de costa clássico de “uma linha” (Hanson e Kraus, 1989) com um modelo de evolução de perfil transversal. O modelo LTC pode ser aplicado para projeção da posição da linha de costa em horizontes temporais de médio e longo-termo (10, 20, 50 anos), em trechos costeiros com dimensão variável, num limite máximo de duas ou três dezenas de quilómetros.

O modelo assume que cada onda atua individualmente durante um determinado período de tempo, o passo de tempo computacional, procedendo à sua transformação desde o largo até à rebentação. Para cada onda é estimado o transporte sólido longitudinal induzido, fazendo-se um balanço sedimentar, em cada trecho elementar da praia, através da equação de conservação de massa, e avaliando qual o volume de sedimentos em erosão ou acreção. O volume calculado é distribuído pelo perfil transversal ativo, definido entre o limite de espraiamento máximo da onda (R_u) e a profundidade de fecho (DoC). Verifica-se uma subida (acreção) ou descida (erosão) uniforme de todos os pontos do perfil ativo, sendo efetuadas correções a essas variações junto aos limites emerso e submerso do perfil (ver Figura 3, na secção 2.1.3). Nestes limites, a variação do perfil é controlada pelas inclinações mínimas, definidas pelo utilizador para o perfil submerso e para o perfil emerso, e pela estabilidade dos taludes criados, função do ângulo de repouso dos sedimentos. Esta técnica permite ao utilizador testar diversos parâmetros de controlo da distribuição sedimentar ao longo do perfil transversal e conseqüentemente da sua evolução ao longo do tempo (Coelho, 2005 e Coelho *et al.*, 2013).

2.1 Formulação Teórica

Neste subcapítulo expõem-se os principais conceitos teóricos que servem de base ao funcionamento do modelo LTC, nomeadamente os pressupostos relativos aos fenómenos de transformação da onda, transporte longitudinal de sedimentos (estimativa da taxa potencial de sedimentos transportados), balanço de massa e evolução do perfil transversal (alteração de cotas dos pontos da grelha que representam a área modelada), com base no trabalho de Coelho (2005).

2.1.1 Transformação da onda

As características ao largo de cada uma das ondas consideradas na simulação são conhecidas procedendo-se à sua transformação até à rebentação, considerando de forma simplificada os fenómenos da refração, difração (junto às estruturas costeiras) e empolamento (o LTC não

tem em conta os efeitos da reflexão). Para tal, admite-se que estas características são idênticas em toda a extensão longitudinal do sector costeiro modelado, e recorre-se à teoria linear da onda (Dean e Dalrymple, 1994). O procedimento utilizado consiste na estimativa da profundidade para a qual ocorre a rebentação, h_b , e dos parâmetros caracterizadores das ondas na rebentação, altura de onda (H_b) e direcção de incidência de onda na rebentação (θ_b), a partir dos parâmetros caracterizadores ao largo, altura de onda (H_0) e direcção de proveniência, ou rumo (θ_0). De referir que, o ângulo de incidência da onda traduz o ângulo definido entre a crista da onda e a linha de costa.

No pressuposto inicial de que a altura de onda na rebentação é aproximadamente igual à altura de onda ao

$$\gamma_b = \frac{H_b}{h_b} \quad (3)$$

largo, começa por calcular-se a profundidade para a qual ocorre a rebentação, h_b , através do critério do índice de profundidade de rebentação:

Este critério tem sido universalmente utilizado, sendo o seu valor mais comum $\gamma_b = 0,78$. A profundidade de rebentação estimada desta forma será idêntica em toda a extensão longitudinal do sector costeiro em estudo, mas a localização da linha de rebentação será variável em planta, em função da topo-hidrografia.

Admitindo que ao longo da propagação da onda as linhas

$$\frac{\sin \theta_b}{L_b} = \frac{\sin \theta_0}{L_0} \quad (4)$$

batimétricas são paralelas à linha de rebentação pode calcular-se o ângulo de incidência da onda na rebentação θ_b , através da *Lei de Snell*:

onde L_b representa o comprimento de onda na rebentação, L_0 o comprimento de onda ao largo e θ_0 o ângulo de incidência da onda ao largo (de acordo com Coelho, 2005, este ângulo está limitado a $\pm 42^\circ$ por questões de cálculo numérico, pelo que, quando estes limites são ultrapassados é feita uma correção à orientação da linha de costa).

Assumindo uma praia uniforme com uma batimetria paralela, a altura de onda na rebentação pode ser estimada através da Equação 5, onde K_r representa o coeficiente de refração e K_s o coeficiente de empolamento. O coeficiente de refração na rebentação depende da direcção de incidência de onda, ao largo e na rebentação, e pode

$$H_b = K_r K_s H_0 \quad (5)$$

$$K_r = \sqrt{\frac{\cos \theta_0}{\cos \theta_b}} \quad (6)$$

$$K_s = \frac{\cosh \frac{2\pi h_b}{L_b}}{\sqrt{\sinh \frac{2\pi h_b}{L_b} \cosh \frac{2\pi h_b}{L_b} + \frac{2\pi h_b}{L_b}}} \quad (7)$$

ser estimado pela Equação 6. Por sua vez, o coeficiente de empolamento depende da profundidade e do comprimento de onda na rebentação e pode ser estimado através da Equação 7.

O comprimento de onda na rebentação, L_b , é calculado através da Equação 8 e depende do valor do comprimento de onda ao largo, L_0 , obtido através da Equação 9. No

$$L_b = L_0 \tanh \frac{2\pi h_b}{L_b} \quad (8)$$

$$L_0 = \frac{gT^2}{2\pi} \quad (9)$$

$$T = 1,21H_0 + 6,92 \quad (10)$$

modelo LTC o período de onda ao largo (T) é obtido em função da altura de onda ao largo, através da Equação 10, baseada na análise dos registos de agitação na boia de Leixões, entre 1981 e 2003 (Coelho, 2005).

O método descrito para caracterizar a transformação da onda desde o largo até à zona de rebentação é bastante simples, resultando em alturas e direcções de incidência das ondas longitudinalmente variáveis, em função da orientação da linha de rebentação, cuja variação espacial é imposta pela topo-hidrografia.

Quando na sua propagação em direcção à costa, a onda encontra um obstáculo, como um esporão ou um quebramar, dá-se o fenómeno da difração, que consiste na transmissão lateral de energia e atenuação da altura de onda na direcção da frente de onda. Surge então um determinado padrão de alturas de onda na zona abrigada pelo obstáculo, que pode ser representado pelo quociente entre a altura de onda em cada ponto, $P(x, y)$, e a altura

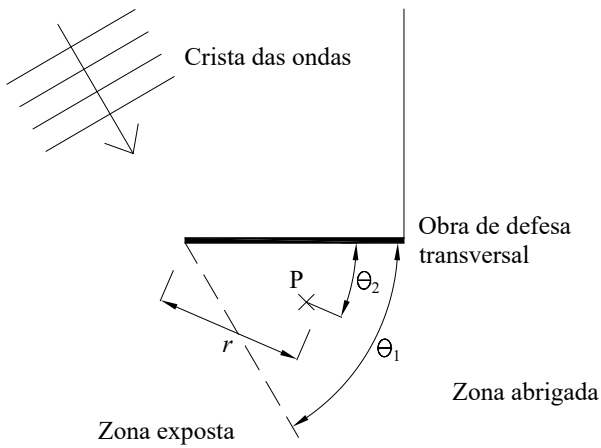


Figura 2 - Variáveis utilizadas na caracterização da difração, num ponto P, localizado na zona abrigada de uma obra de defesa transversal, esporão ou quebramar (Coelho, 2005).

de onda incidente, e que é habitualmente designado por coeficiente de difração, K_d , Figura 2 - Variáveis utilizadas na caracterização da difração, num ponto P, localizado na zona abrigada de uma obra de defesa transversal, esporão ou quebramar (Coelho, 2005)..

Na versão inicial do modelo LTC, Coelho (2005) incorporou um método para o cálculo do coeficiente de difração em regiões abrigadas por estruturas costeiras, baseando-se nos resultados do ábaco apresentado por Sorensen *et al.* (2003), para uma onda com uma direção de incidência que faz um ângulo de 60° com um quebramar semi-infinito. Após alguma análise o autor

$$K_d = C_1 + \left(\frac{e^{-\frac{2r}{L_i}} + 0,01 \frac{r}{L_i} + 0,2}{1,2} \right) C_2 \quad (11)$$

generalizou matematicamente o ábaco, para uma onda com um comprimento de onda incidente, L_i , com uma direção de incidência definida através do ângulo θ_1 , Figura 2, definindo o coeficiente de difração num ponto $P(x,y)$, que se encontra a uma distância r da extremidade do quebramar semi-infinito, segundo uma direção que faz um ângulo θ_2 com a direção do ponto de difração, pela seguinte equação:

$$H_b = K_d K_s K_r H_0 \quad (12)$$

onde, $C_1 = \left(1 - \frac{\theta_1 - \theta_2}{\theta_1} \right)^2$ e $C_2 = 1 - C_1$. Desta forma, a Equação 5 pode ser modificada de forma a incluir o efeito da difração na presença de estruturas costeiras (considerando $K_d = 1$ no caso de não existirem estruturas), sendo a altura de onda na rebentação obtida através da

$$Q = K \frac{\rho \sqrt{g / \gamma_b}}{16(\rho_s - \rho)(1-n)} H_{sb}^{5/2} \sin(2\theta_b) \quad (13)$$

$$Q = 2,27 H_{sb}^2 T_p^{1,5} m_b^{0,75} d_{50}^{-0,25} \sin^{0,6}(2\theta_b) \quad (14)$$

expressão seguinte:

2.1.2 Transporte longitudinal de sedimentos

O modelo LTC inclui duas formulações para a estimativa da taxa de transporte longitudinal de sedimentos: a fórmula CERC (1984), traduzida pela Equação 13, e uma fórmula desenvolvida por Kamphuis *et al.* (1986), com base num estudo em modelo físico com fundos móveis (Equação 14).

onde K representa um coeficiente empírico, ρ a massa volúmica da água, ρ_s a massa volúmica da areia, g a aceleração da gravidade, n a porosidade da areia, γ_b o índice de profundidade de rebentação, H_{sb} a altura de onda significativa na rebentação, θ_b o ângulo de incidência da onda na rebentação, T_p o período de pico do espectro da agitação marítima ao largo, m_b o declive de praia que causa a rebentação, e d_{50} o diâmetro mediano dos sedimentos.

O utilizador pode escolher uma das duas opções disponíveis para, a partir dos valores encontrados para as características da onda na rebentação, das propriedades da água e dos sedimentos e da topo-hidrografia, fazer uma estimativa da taxa potencial de transporte longitudinal, ao longo do sector costeiro modelado. A taxa de transporte sedimentar efetiva é em geral inferior à taxa potencial estimada, sendo limitada pela disponibilidade

$$\Delta V = (Q_i - Q_{i-1} + Q_{ext}) \Delta t = (\Delta Q + Q_{ext}) \Delta t \quad (15)$$

sedimentar ao longo do sector costeiro.

2.1.3 Balanço de massa e evolução do perfil transversal

Discretizando a equação da conservação de massa

(Equação 1) em intervalos de tempo Δt , a análise ao longo da linha de costa para trechos de comprimento Δy ,

$$\Delta z = \frac{\Delta V}{(\text{largura ativa})\Delta y} \quad (16)$$

permite relacionar a variação de volume com a variação no tempo dos caudais sólidos em transporte:

Considera-se que $Q_{ext} = q_{ext} \Delta y$ e que a variação do volume de areia (ΔV) no comprimento Δy é distribuída uniformemente em toda a largura ativa do perfil transversal, representando uma variação na cota dos pontos do perfil igual a Δz . Assim, a Equação 16 permite o cálculo da alteração no perfil transversal representativo do trecho Δy , por variação do volume de areia ΔV .

A variação do caudal sólido em transporte no comprimento Δy resulta da diferença entre os volumes que entram (Q_i) e que saem (Q_{i-1}) do trecho de comprimento Δy em cada intervalo de tempo Δt . Os volumes sólidos em transporte no intervalo Δt dependem essencialmente das características da onda na rebentação (altura e orientação) sendo calculados para cada comprimento de linha de costa Δy , de acordo com o critério definido pelo utilizador, recorrendo a uma das expressões propostas (Equação 13 ou 14).

$$R_u = 0,27(\tan \beta H_0 L_0)^{1/2} \quad (17)$$

$$DoC = 2,28H_0 - 68,5\left(\frac{H_0^2}{gT^2}\right) \quad (18)$$

$$DoC = 1,75H_0 - 57,9\left(\frac{H_0^2}{gT^2}\right) \quad (19)$$

Admite-se que a extensão do perfil para a qual há variação morfológica significativa corresponde à largura do perfil ativo de praia, limitado pelas posições em planta correspondentes ao limite de espraiamento máximo da onda (R_u) e à profundidade de fecho (DoC). O limite de espraiamento da onda é calculado no LTC através da formulação de Ruggiero *et al.* (1997), Equação 17, e para o cálculo da profundidade de fecho o modelo LTC tem disponíveis duas formulações, Hallermeier (1978) e Birkemeier (1985), respetivamente, Equação 18 e 19.

onde $\tan \beta$ representa o declive da face da praia (equivalente a m_b).

A Figura 3 representa uma das principais diferenças

entre o modelo LTC e os modelos de uma linha, em particular o GENESIS, onde qualquer ponto do perfil ativo é suficiente para caracterizar a alteração da posição da linha de costa (Δx). No modelo LTC procede-se à variação uniforme das cotas dos pontos situados no perfil ativo, no entanto, procede-se também ao ajuste do perfil ativo com as zonas adjacentes, tendo em conta os seguintes aspetos: em situação de acreção, quando o talude de cálculo tem uma inclinação superior ao ângulo de atrito que caracteriza as areias, é considerado o deslizamento das areias para zonas mais profundas. Na zona emersa, a acumulação de sedimentos prolonga a praia na horizontal, ou com um declive definido pelo utilizador. Em situações de erosão, para evitar a escavação continuada na zona da largura ativa, o volume que aprofundaria o perfil é na prática subtraído da zona mais alta do mesmo. Nesta zona, caso existam taludes de cálculo com inclinação superior ao ângulo de atrito das areias, dá-se também o deslizamento, com conseqüente correção das formas do perfil. O número de células adjacentes onde é feito o ajuste do perfil vai depender do ângulo do talude de cálculo (o ajuste é feito até que este seja inferior ao ângulo de atrito, na zona imersa, ou, na zona emersa, até que a praia se prolongue na horizontal ou segundo um ângulo definido pelo utilizador).

2.2 Estrutura computacional

O esquema da Figura 4 representa, de forma simplificada, a estrutura computacional do modelo LTC, desenvolvido em linguagem de programação *FORTRAN*. A topohidrografia deve ser fornecida no início da execução do modelo, sendo atualizada a cada passo de tempo computacional. É efetuada a propagação das ondas sobre a batimetria real, sendo estimadas as características da onda na rebentação. São calculadas as taxas de transporte sólido longitudinal no domínio computacional e o balanço dos volumes em transporte para cada trecho de costa, após o que é efetuada a atualização das cotas do fundo e calculada a nova topohidrografia.

Para facilitar alterações e potenciar alternativas em métodos de cálculo, o programa é composto por sub-rotinas relativamente diferenciadas e de pequena extensão, aumentando a simplicidade e compreensão de cada uma delas. O programa principal recorre a estas sub-rotinas ao longo do processo de cálculo automático. A interligação entre as diferentes sub-rotinas, bem como a descrição de cada uma delas, pode ser consultada em Coelho (2005).

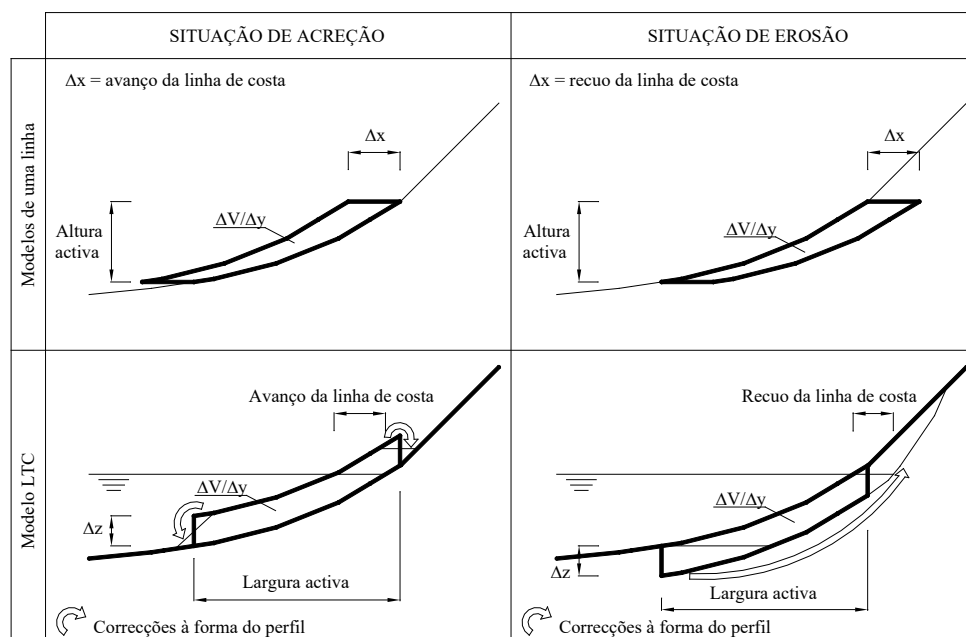


Figura 3 - Representação esquemática da formulação de base nos modelos de uma linha e no modelo LTC (Coelho, 2005).

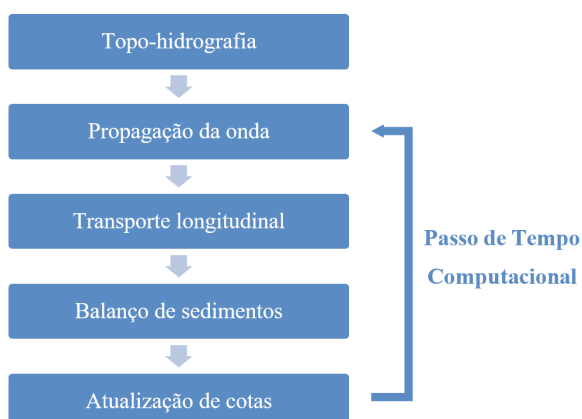


Figura 4 - Estrutura computacional do modelo LTC (baseado em Silva, 2010).

3. EVOLUÇÃO DO MODELO LTC

No sentido de colmatar as lacunas e limitações da versão inicial do modelo, algumas delas identificadas em Coelho (2005) e outras detetadas com a sua utilização, o modelo tem sido alvo de evolução, não só na Universidade de Aveiro, onde surgiu a versão inicial, como na Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Descrevem-se em seguida as duas versões existentes até à data, nomeadas de acordo com o autor e o ano de desenvolvimento.

3.1 Versão LTC-RS2010

Silva (2010) realizou uma série de testes genéricos, com o objetivo de demonstrar as potencialidades e limitações do modelo, bem como a sensibilidade do seu desempenho à variação dos muitos parâmetros intervenientes na sua formulação. A análise dos resultados destes testes permitiu uma otimização do desempenho do modelo, através de modificações pontuais do código. Descrevem-se em seguida, as alterações concretizadas por Silva (2010) que originaram a versão LTC-RS2010.

- Implementação de um método alternativo para o cálculo da difração: Silva (2010) incorporou no modelo LTC o método expedito de Kraus (1984), como alternativa ao existente para a estimativa dos coeficientes de difração junto a obstáculos. O modelo LTC passou assim a dispor de um método adicional para o cálculo da difração, devendo a seleção do método ser efetuada pelo utilizador.
- Definição de um critério de estabilidade numérica: Silva (2010) analisou a adequabilidade de um critério de estabilidade numérica (Kamphuis, 2000), implementando uma nova subrotina de cálculo que permite a escolha do passo de

$$\frac{Q}{(DoC + R_u)\theta_b} \frac{\Delta t}{\Delta y^2} < \frac{1}{2} \quad (20)$$

tempo que garante que o critério de estabilidade numérica é respeitado. O passo de tempo crítico é determinado em função das características da agitação marítima na rebentação, da altura do perfil ativo e da resolução da malha segundo a direção longitudinal (Equação 20). Com esta alteração, os resultados modificaram-se, observando-se a atenuação no tempo do efeito de recuo e variabilidade da posição da linha de costa ao longo do sector modelado (para mais detalhes, consultar Silva, 2010).

- Definição da profundidade de fecho: no caso de um clima de agitação marítima variado no tempo, para cada onda é estimada uma *DoC*. Silva (2010) implementou no modelo a possibilidade de se considerar uma *DoC* que permanece constante no decurso das simulações, estimada através da formulação original de Hallermeier (1978), para valores conhecidos da altura de onda significativa que é excedida 12 horas/ano, $H_{s,0.137}$, e do período de onda significativo médio.
- Controlo das obras de defesa transversais: a condição numérica que identifica a presença de estrutura de defesa foi modificada, para que se mantivesse o controlo da posição, mesmo quando o limite de espraçamento não se situa no ponto da grelha correspondente à cabeça do esporão.

3.1 Versão LTC-CC2012

Com o objetivo de melhorar o desempenho do modelo LTC e colmatar algumas das lacunas identificadas por Silva (2010), a versão LTC-RS2010 foi alvo de alterações originando assim a versão LTC-CC2012.

- Adição de duas novas metodologias de consideração da agitação marítima, passando a

ser possível a geração aleatória de uma sequência de ondas sistematicamente igual, representativa de um ano típico de agitação, com base nas percentagens de ocorrência em diferentes classes de altura de onda e de rumo de proveniência, e a leitura de uma série temporal específica (com base em registos), através do ficheiro “wave.dat”.

- Correção no cálculo de volumes: foi corrigido o cálculo dos volumes reais disponíveis para transporte numa situação genérica, em que num determinado instante de tempo o perfil estivesse a perder sedimentos simultaneamente para Norte e para Sul, sem ter capacidade de alimentar realmente esse transporte.
- Atenuação do efeito erosivo a sotamar de um esporão: foi introduzida a opção de atenuar o efeito erosivo na zona a sotamar dos esporões. Nestes casos, a profundidade de fecho avança no sentido das maiores profundidades, aumentando a largura do perfil ativo a sotamar do esporão, permitindo distribuir o défice sedimentar que tipicamente aí ocorre, por uma maior largura do perfil transversal, diminuindo por isso o impacto do efeito erosivo nessa zona.
- Verificação da variação das cotas do terreno: foi incorporada uma verificação das cotas do terreno, ao longo da direção longitudinal, para toda a largura ativa da área modelada. Esta verificação corresponde a um filtro que elimina grandes variações de cotas do terreno, ao longo da direção longitudinal à costa. A variação máxima é definida pelo utilizador através do valor introduzido para o ângulo de inclinação longitudinal do terreno.
- Controlo da evolução do perfil transversal: foi introduzida uma nova opção de controlo da

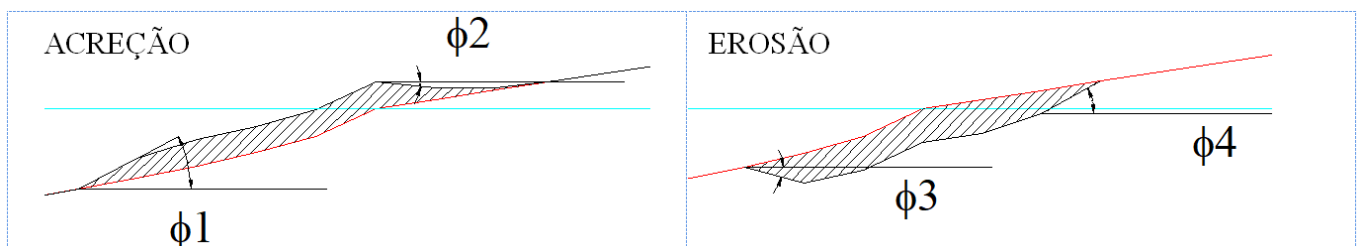


Figura 5 - Representação dos ângulos máximos do terreno com a horizontal, submersos e emersos, em situação de acreção e erosão.

evolução da forma do perfil transversal ao longo da simulação. Esta modalidade de controlo da evolução dos perfis transversais permite a existência de inclinações negativas ao longo do perfil transversal (Figura 5), o que permitirá uma mais fácil inclusão de uma opção futura para quebramares destacados. Foi também assegurado o controlo da evolução do perfil, em situações de dragagens (ou seja, operações de alimentação artificial de areias, introduzindo volumes negativos).

4. APLICAÇÃO DO LTC

O modelo LTC, desde o seu desenvolvimento, tem vindo a ser utilizado em diversos estudos e projetos, dando origem a inúmeras publicações, nomeadamente, artigos científicos e dissertações de mestrado e doutoramento (Figura 6 - Número de publicações onde se descrevem aplicações do modelo numérico LTC.). Desta forma, apresenta-se um levantamento de todos os trabalhos onde o modelo numérico LTC foi utilizado, no sentido de identificar o tipo de análises que já foram efetuadas e potenciais problemas detetados na sua aplicação. A comparação do desempenho do modelo com outros modelos numéricos de evolução da linha de costa, nomeadamente o GENESIS, e com resultados de modelação física à escala reduzida (realizados na Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto) já foi concretizada em alguns dos trabalhos descritos em seguida e valida os resultados obtidos com o modelo LTC.

Na generalidade dos trabalhos, o modelo LTC foi aplicado à costa noroeste portuguesa, na maioria das vezes, a sul do porto de Aveiro (trechos Barra - Costa Nova - Vagueira - Areão - Mira), em trabalhos desenvolvidos por Coelho *et al.* (2004, 2006b, 2006c, 2006d, 2009,

2010), Coelho e Veloso-Gomes (2005a, 2005b), Silva *et al.* (2007a, 2011), Carpinteiro (2009), Pereira (2010), Reis (2010), Rodrigues (2010), Alves (2012), Coelho e Pereira (2013), Pereira e Coelho (2013), Pereira *et al.* (2013), Baptista *et al.* (2014), Bertucco (2014), Dias *et al.* (2014), Guimarães (2014) e Guimarães *et al.* (2016). O modelo foi também aplicado à parte norte do distrito de Aveiro, nos trechos Esmoriz - Furadouro - S. Jacinto (Coelho e Pereira, 2013, Pereira *et al.*, 2013, Dias *et al.*, 2014 e Cruz, 2015) e à zona a sul do quebramar portuário da Figueira da Foz (Coelho *et al.*, 2006d). Os trabalhos desenvolvidos por Silva *et al.* (2007b), Almeida (2011) e Roebeling *et al.* (2011) foram aplicados a toda a costa noroeste portuguesa e os trabalhos de Coelho *et al.* (2006a, 2013), Oliveira (2012), Bertucco (2014), Rodeia (2014) e Guimarães *et al.* (2015) traduzem análises aplicadas a casos de estudo hipotéticos.

A classificação da vulnerabilidade de uma determinada zona e a construção de mapas de risco foram objetivos dos trabalhos desenvolvidos por Coelho e Veloso-Gomes (2005b), Coelho *et al.* (2006b e 2006c), Pereira (2010), Pereira e Coelho (2013) e Dias *et al.* (2014). As consequências na evolução da linha de costa provocadas pelas alterações climáticas, nomeadamente a subida do nível do mar e alterações da agitação marítima, foram alvo de estudo nos trabalhos desenvolvidos por Coelho *et al.* (2009), Pereira (2010), Coelho e Pereira (2013), Pereira e Coelho (2013) e Dias *et al.* (2014). Coelho *et al.* (2006d) recorreram ao modelo LTC para análise dos riscos da erosão acentuada que se verifica a sotamar dos quebramares portuários de Aveiro e da Figueira da Foz e Silva *et al.* (2007a) desenvolveram um estudo de previsão da evolução do comportamento do sistema praia-duna no litoral de Aveiro, uma vez que o acentuado recuo da linha de costa nesta zona faz antecipar a rutura do sistema dunar. Ainda no sentido de compreender as causas e o impacto da erosão acentuada que se verifica

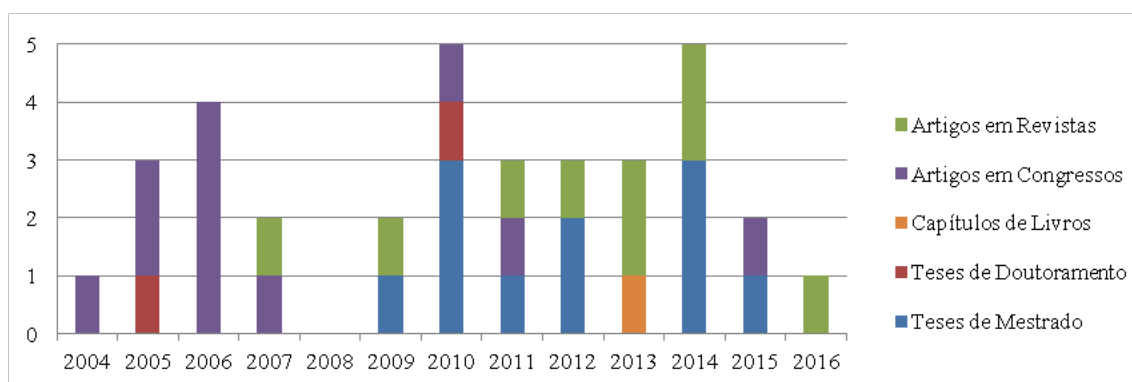


Figura 6 - Número de publicações onde se descrevem aplicações do modelo numérico LTC.

na costa noroeste portuguesa, Silva *et al.* (2007b) utilizaram o modelo LTC para sustentar a discussão entre a importância relativa das causas da erosão.

Coelho *et al.* (2006a) aplicaram o modelo a um caso de estudo hipotético, com o objetivo de simular cada uma das intervenções de defesa disponíveis pela modelação com o LTC: entrada de sedimentos no sistema através de um ponto fixo (simulando o efeito de um rio); alimentações artificiais de praia; esporões e campos de esporões; obras longitudinais aderentes; e o efeito combinado das opções anteriores. A aplicação do modelo LTC ao estudo de alimentações artificiais de praia foi também realizada nos trabalhos desenvolvidos por Carpinteiro (2009), Coelho *et al.* (2010) e Rodrigues (2010), que simulam a transposição de areias da praia de S. Jacinto para as praias localizadas a sul e estudam a gestão de sedimentos no trecho costeiro a sul do quebramar portuário.

Reis (2010), Almeida (2011), Roebeling *et al.* (2011), Alves (2012), Oliveira (2012) e Cruz (2015) desenvolveram análises de custo-benefício e análises económico-ambientais da implantação de obras de defesa costeira e utilizaram o modelo numérico LTC para quantificação das áreas de erosão e acreção ao longo do tempo (benefícios). Alves (2012) e Oliveira (2012) incidiram o estudo na análise de esporões, Cruz (2015) em obras longitudinais aderentes e Reis (2010) e Roebeling *et al.* (2011) analisaram, para além dos dois tipos de intervenção anteriores, alimentações artificiais de praia.

O modelo LTC foi também aplicado por vários autores para análise do impacto da construção de um esporão na hidrodinâmica e na evolução da linha de costa. Bertucco (2014) analisou o efeito da difração a sotamar de estruturas transversais na evolução da linha de costa e Rodeia (2014) analisou a evolução da linha de costa a barlar da estrutura. Ainda relativamente à análise de esporões, nos trabalhos desenvolvidos por Silva *et al.* (2011), Guimarães (2014) e Guimarães *et al.* (2016) os resultados da aplicação do modelo LTC foram comparados/validados com os resultados obtidos em modelo físico, com o objetivo de melhorar o desempenho do modelo numérico. Nos dois últimos trabalhos referidos, os resultados do modelo numérico foram ainda comparados com o modelo analítico de Pelnard-Considère (1956).

Pereira *et al.* (2013), Baptista *et al.* (2014), Bertucco (2014) e Dias *et al.* (2014) recorreram à utilização do modelo LTC em simultâneo como o modelo GENESIS, com o objetivo de comparar o desempenho de ambos os modelos e validar os resultados do modelo LTC. Ainda relativamente à comparação dos dois modelos, Coelho *et al.* (2013) analisaram a influência da definição da largura ativa. Os pressupostos de definição dos limites da largura

ativa diferem para ambos os modelos, desencadeando diferenças nos resultados e consequentemente na posição da linha de costa (Coelho *et al.*, 2013).

Nos trabalhos desenvolvidos por Bertucco (2014), Guimarães (2014), Cruz (2015) e Guimarães *et al.* (2015) foram ainda desenvolvidas análises de sensibilidade a determinados parâmetros do modelo LTC. No primeiro trabalho foram analisados o passo de cálculo temporal, a variação da largura do perfil ativo a sotamar e os ângulos de atrito dos sedimentos. Guimarães (2014) e Guimarães *et al.* (2015) analisaram a variação da largura do perfil ativo a sotamar, os ângulos de atrito dos sedimentos, a batimetria inicial e as fórmulas de cálculo do transporte sedimentar. Por último, em Cruz (2015), foram feitos testes de sensibilidade à variação da agitação marítima (constante e variável), ao parâmetro empírico e ao passo de cálculo temporal da simulação.

Outros trabalhos de aplicação do LTC tiveram por objetivo apresentar o modelo (Coelho *et al.*, 2004 e Coelho e Veloso-Gomes, 2005b) e a sua validação, comparando o desempenho com outros modelos e com dados de campo (Baptista *et al.*, 2014). Na avaliação de todos os trabalhos verifica-se a aplicação em horizontes temporais de simulação que variam entre os 10 e os 100 anos, em trechos costeiros com uma extensão máxima de 35 km (não sendo recomendável a simulação de trechos mais extensos).

Na abordagem feita aos trabalhos de aplicação do LTC foram detetados alguns problemas no funcionamento e identificadas sugestões de melhoria. Guimarães (2014) detetou problemas na utilização da nova opção de controlo da evolução do perfil transversal (versão LTC-CC2012) e Rodeia (2014) registou a ocorrência de instabilidades numéricas quando consideradas alturas de onda superiores a 6 metros nas simulações do caso de estudo. Coelho e Veloso-Gomes (2005a) sugerem melhorias no modelo ao nível da caracterização da granulometria das areias, da validade do pressuposto do cálculo da profundidade de fecho, da influência da variação da agitação marítima no cálculo do transporte sedimentar, na avaliação de forma mais precisa da inclinação da praia e do impacto de se considerar constante a distribuição transversal dos sedimentos em transporte.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O modelo numérico LTC apresenta já um vasto campo de aplicação e continua a permitir a incorporação de alterações e alternativas de cálculo, com vista ao melhoramento do seu desempenho. Por este motivo, pretendeu-se com este trabalho reunir toda a informação relativa ao modelo LTC desde o seu desenvolvimento, em 2005. Assim, foi descrito o modelo e apresentados

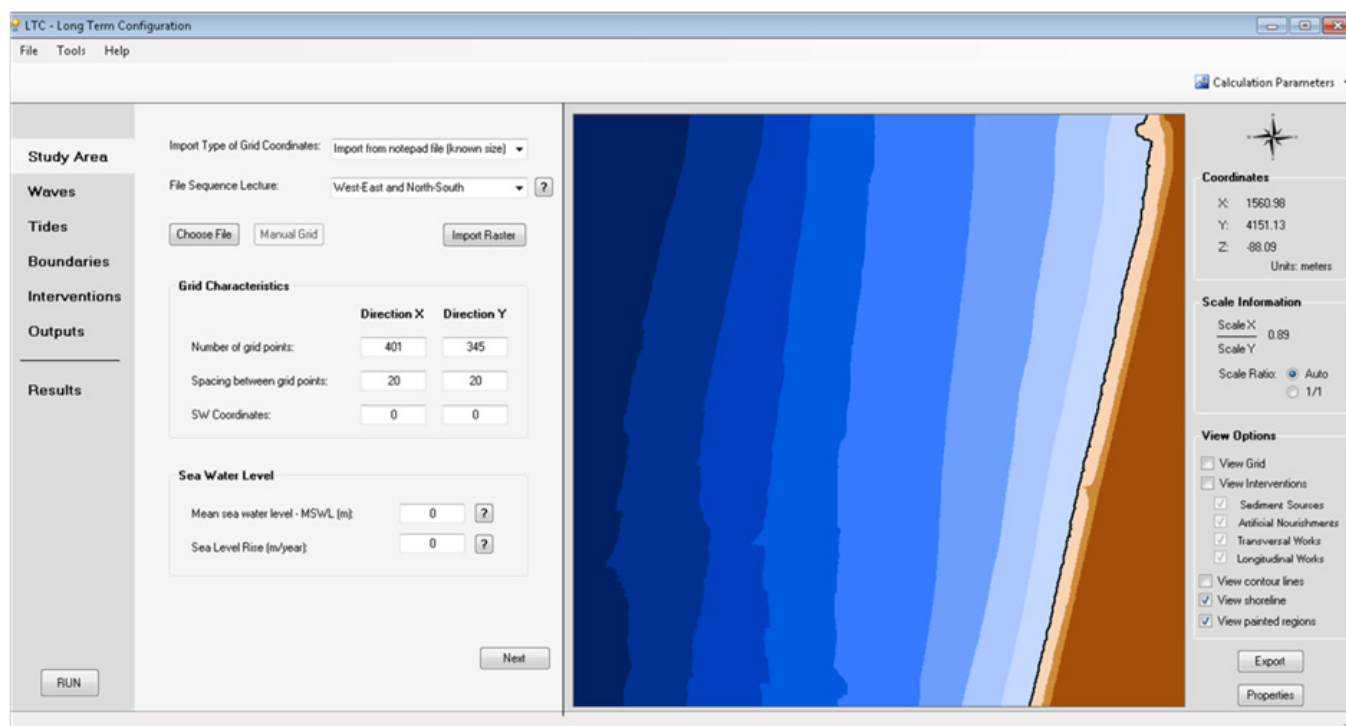


Figura 7 - Janela da interface gráfica em desenvolvimento para o modelo numérico LTC.

os pressupostos em que se baseia, foram enumeradas as alterações feitas na versão inicial, que resultaram na versão LTC-RS2010 e LTC-CC2012, e foi realizado um levantamento de todos os trabalhos onde foi aplicado o modelo, de forma a auxiliar os utilizadores na sua compreensão e aplicação.

De referir ainda que está em desenvolvimento uma interface gráfica para o modelo numérico LTC (Figura 7) e uma nova versão do algoritmo de evolução da linha de costa (versão LTC-ML2016), que pretendem facilitar a interação com o utilizador e melhorar o desempenho do modelo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Almeida, P. (2011). Análise económico-ambiental de alimentação artificial de praias. Dissertação de Mestrado, Universidade de Aveiro, Aveiro, Portugal, 84p.
- Alves, T. (2012). Análise económico-ambiental espacial de esporões no centro de Portugal. Dissertação de Mestrado, Universidade de Aveiro, Aveiro, Portugal, 119p.
- Baptista, P., Coelho, C., Pereira, C., Bernardes, C. e Veloso Gomes, F. (2014). Beach Morphology and Shoreline Evolution: Monitoring and Modeling Medium-Term Responses (Portuguese NW Coast Study Site). *Coastal Engineering Journal*, Elsevier, 84: 23-37.
- Bertucco, G. (2014). Modeling the Diffraction Effects of Coastal Structures in the Shoreline Evolution. Dissertação de Mestrado, Università Degli Studi Di Padova, Dipartimento di Ingegneria Civile, Padova, Itália, 125p.
- Birkemeier, W. A. (1985). Field Data on Seaward Limit of Profile Change. *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, 111:3, pp. 598-602.
- Carpinteiro, F. (2009). Transposição Artificial de Areias na Barra de Aveiro. Dissertação de Mestrado, Universidade de Aveiro, Aveiro, Portugal, 84p.
- CERC (1984). *Shore Protection Manual*. DC: U.S. Army Corps of Engineers, Coastal Engineering and Research Center, U.S. Government Printing Office.
- Coelho, C., Taveira-Pinto, F., Veloso-Gomes, F. e Pais-Barbosa, J. (2004). Coastal Evolution and Coastal Works in the southern part of Aveiro Lagoon Inlet, Portugal. *Proceedings of the 29th International Conference on Coastal Engineering*, Lisboa, Portugal, Vol. 4, pp. 3914-3926.
- Coelho, C. (2005). Riscos de Exposição de Frentes Urbanas para Diferentes Intervenções de Defesa Costeira. Dissertação de Doutoramento, Universidade de Aveiro, Aveiro, Portugal, 405p.
- Coelho, C. e Veloso-Gomes, F. (2005a). Um Modelo de Previsão de Evolução de Zonas Costeiras Arenosas, a Médio e Longo Termo. 4º Congresso Luso Moçambicano de Engenharia, Maputo, Moçambique, pp. 425-439.
- Coelho, C. e Veloso-Gomes, F. (2005b). Classificação de Vulnerabilidades e Riscos como Contributo no Planeamento das Zonas Costeiras. *Trabalhos do III Congresso sobre Planeamento e Gestão das Zonas Costeiras dos Países de Expressão Portuguesa*, Maputo, Moçambique.
- Coelho, C., Silva, R. e Veloso-Gomes, F. (2006a). Shoreline Evolution Model – A Tool to Compare Coastal Protection Measures. *Coastal Dynamics, Geomorphology and Protection*, 8th International Conference LITTORAL 2006 - Coastal Innovations and Initiatives, Gdansk, Polónia, pp. 115-123. ISBN 83 88617 82-6.

- Coelho, C., Silva, R., Veloso-Gomes, F. e Taveira-Pinto, F. (2006b). Avaliação de Riscos. Modelos de Previsão da Evolução da Configuração Costeira. Recursos Hídricos e Ambiente las Jornadas de Hidráulica, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, pp. 17-25. ISBN 978-989-95557-0-9.
- Coelho, C., Silva, R., Veloso-Gomes, F. e Taveira-Pinto, F. (2006c). A Vulnerability Analysis Approach for the Portuguese West Coast. Risk Analysis 2006 - Fifth International Conference on Computer Simulation in Risk Analysis and Hazard Mitigation, Malta, edited by V. Popov & C.A. Brebbia, Wessex Institute of Technology, UK, WIT Transactions on Ecology and the Environment, Vol. 91, pp. 251-262. ISBN 1-84564-172-8.
- Coelho, C., Veloso-Gomes, F. e Silva, R. (2006d). Shoreline Coastal Evolution Model: Two Portuguese Case Studies. Coastal Engineering 2006, Proceedings of the 30th International Conference on Coastal Engineering, San Diego, USA, Vol. 4, pp. 3430-3441. ISBN 978-981-270-992-9.
- Coelho, C., Silva, R., Veloso-Gomes, F. e Taveira-Pinto, F. (2009). Potential Effects of Climate Change on NW Portuguese Coastal Zones. ICES Journal of Marine Science 66:1497-1507.
- Coelho, C., Silva, R., Veloso-Gomes, F. e Rodrigues, L. (2010). Artificial nourishment and sand by-passing in the Aveiro inlet, Portugal - Numerical studies. Proceedings of the Coastal Engineering Conference.
- Coelho, C., Lima, M. e Veloso-Gomes, F. (2013). Relationship between cross-shore active profile and one-line shoreline evolution models performance. Journal of Coastal Research, SPEC. ISSUE 65, 2107-2112.
- Coelho, C. e Pereira, C. (2013). Previsão de Recuo da Linha de Costa. In: Dias, J. M. & Alves, F. L. (Eds), Risco de Cheias e Estratégias de Adaptação para a Zona Costeira e Lagunar da Ria de Aveiro, Universidade de Aveiro, CESAM - Centro de Estudos do Ambiente e do Mar, Aveiro, pp. 22-26.
- Cruz, T. S. (2015). Análise Custo-Benefício de Obras Longitudinais Aderentes. Dissertação de Mestrado, Universidade de Aveiro, Aveiro, Portugal, 160p.
- Dabees, M. A. e Kamphuis, J. W. (1998). ONELINE, A Numerical Model for Shoreline Change. In: 26th International Conference on Coastal Engineering, Copenhagen, Denmark, American Society of Civil Engineers, pp. 2668-2681.
- Dean, R. G. e Dalrymple, R. A. (1994). Water Wave Mechanics for Engineers and Scientists. Advanced Series on Ocean Engineering, Englewood Cliffs, New Jersey: World Scientific, ISBN 978-981-02-0421-1, 368p.
- Deltares (2016). Deltares. Enabling Delta Life. UNIBEST Software. <https://www.deltares.nl/en/software/unibest-cl/>. Última visualização a 30 de Maio de 2016.
- DHI (2009). An Integrated Modelling System for Littoral Processes and Coastline Kinetics. A Short Description and Tutorial. 14p.
- Dias, J. M., Lopes, C. L., Coelho, C., Pereira, C., Alves, F. L., Sousa, L. P., Antunes, I. C., Fernandes, M. L. e Philips, M. R. (2014). Influence of mean sea level rise on Ria de Aveiro littoral: adaptation strategies for flooding events and shoreline retreat. A.N. and Cooper In: Green, J.A.G. (eds.), Proceedings 13th International Coastal Symposium (Durban, South Africa), Journal of Coastal Research, Special Issue No. 70, pp. 320-325. ISSN 0749-0208.
- Gravens, M. B., Kraus, N. C. e Hanson, H. (1991). GENESIS: Generalized Model for Simulating Shoreline Change. Report 2, Workbook and System User's Manual, U. S. Army Corps of Engineer, 431p.
- Guimarães, A. (2014). Ensaio em Modelo Físico e Numérico do Impacto de um Esporão. Dissertação de Mestrado, Universidade de Aveiro, Aveiro, Portugal, 123p.
- Guimarães, A., Lima, M., Coelho, C., Silva, R. e Veloso-Gomes, F. (2015). Análise Paramétrica do Transporte Sedimentar a Barlamar de um Esporão: Impacto na Evolução da Linha de Costa. Trabalhos do VIII Congresso sobre Planeamento e Gestão das Zonas Costeiras dos Países de Expressão Portuguesa, 14 a 16 de Outubro, Aveiro, Portugal, 2A2_Artigo_033, 15p. ISBN 978-989-8509-13-0.
- Guimarães, A., Lima, M., Coelho, C., Silva, R. e Veloso-Gomes, F. (2016). Groin impacts on updrift morphology: Physical and numerical study. Coastal Engineering, 109, 63-75.
- Hallermeier, R. J. (1978). Uses for a Calculated Limit Depth to Beach Erosion. Proceedings, 16th Coastal Engineering Conference, American Society of Civil Engineers, pp.1493-1512.
- Hanson, H. (1989). GENESIS - A Generalized Shoreline Change Numerical Model. Journal of Coastal Research, 5(1), Charlottesville (Virginia), ISSN 0749-0208, pp. 1-27.
- Hanson, H. e Kraus, C. (1989). GENESIS: Generalized Model for Simulating Shoreline Change. Report 1, Technical Reference, Technical Report CERC-89-19, U. S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Coastal Engineering Research Center, Vicksburg, MS, 185p.
- Hanson, H., Aarninkhof, S., Capobianco, M., Jiménez, J. A., Larson, M., Nicholls, R. J., Plant, N. G., Southgate, H. N., Steetzel, H. J., Stive, M. J. F. e De Vriend, H. J. (2003). Modelling of Coastal Evolution on Yearly to Decadal Time Scales. Journal of Coastal Research, 19, 4, pp. 790-811.
- Kamphuis, J. K., Davies, M. H., Nairn, R. B. e Sayao, O. J. (1986). Calculation of Littoral Sand Transport Rate. Coastal Engineering, Nº 10, pp. 1-21.
- Kamphuis, J. W. (2000). Introduction to Coastal Engineering and Management. Advanced Series on Ocean Engineering, Singapore: World Scientific, 437p. ISBN 981-02-3830-4.
- Kraus, N. C. (1984). Estimate of Breaking Wave Height behind Structures. Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, 110:2, pp. 276-282.
- Oliveira, A. (2012). Discussão do custo e benefício das intervenções de defesa costeira. Dissertação de Mestrado, Universidade de Aveiro, Aveiro, Portugal, 91p.
- Pelnaud-Considère, R. (1956). Essai de Theorie de l'Evolution des Forms de Rivage en Plage de Sable et de Galets (in French). 4th Journees de l'Hydraulique, Les Energies de la Mer, Question III, Rapport No. 1, pp. 289-298.
- Pereira, C. (2010). Risco de Erosão para Diferentes Cenários de Evolução do Litoral de Aveiro. Dissertação de Mestrado, Universidade de Aveiro Aveiro, Portugal, 78p.
- Pereira, C. e Coelho, C. (2013). Mapping Erosion Risk Map under different Scenarios of Climate Change for Aveiro Coast, Portugal. Natural Hazards, Springer, DOI: 10.1007/s11069-013-0748-1.

- Pereira, C., Coelho, C., Ribeiro, A., Fortunato, A., Lopes, C. L. e Dias, J. M. (2013). Numerical modelling of shoreline evolution in the Aveiro coast, Portugal – climate change scenarios. England) Proceedings 12th International Coastal Symposium (Plymouth, Journal of Coastal Research, Special Issue No. 65, pp. 2161-2166, ISSN 0749-0208.
- Reis, E. (2010). Evolução da linha de costa e defesa das zonas costeiras – Análise custo/benefício. Dissertação de Mestrado, Universidade de Aveiro, Aveiro, Portugal, 105p.
- Rodeia, L. (2014). Impacto dos Esporões no Transporte Sedimentar - Formulações e Modelos. Dissertação de Mestrado, Universidade de Aveiro, Aveiro, Portugal, 80p.
- Rodrigues, L. (2010). Gestão de sedimentos na zona costeira - alimentações artificiais. Dissertação de Mestrado, Universidade de Aveiro, Aveiro, Portugal, 97p.
- Roebeling, P., Coelho, C. e Reis, E. (2011). Coastal erosion and coastal defense interventions: a costbenefit analysis. Journal of Coastal Research, SI 64 (Proceedings of the 11th International Coastal Symposium), Szczecin, Poland, pp. 1415-1419. ISSN 0749-0208.
- Ruggiero, P., Kaminsky, G. M., Komar, P. D. e McDougal, W. G. (1997). Extreme Waves and Coastal Erosion in the Pacific Northwest. Ocean Wave Measurement and Analysis, Proceedings of the 3rd International Symposium, Waves '97, pp. 947-961.
- Silva, R., Coelho, C., Taveira-Pinto, F. e Veloso-Gomes, F. (2007a). Coastline Numerical Evolution for Dune-Beach System Adaptation - Analysis in Aveiro Coastal Stretch, Portugal. Conferencia Internacional sobre Restauración y Gestión de las Dunas Costeras, Santander, Espanha, 3 a 5 Outubro 2007, pp. 100-106. ISBN: 978-84-8102-497-5.
- Silva, R., Coelho, C., Veloso-Gomes, F. e Taveira-Pinto, F. (2007b). Dynamic numerical simulation of medium term coastal evolution of the West Coast of Portugal. Journal of Coastal Research, SI 50 (Proceedings of the 9th International Coastal Symposium), 263 – 267, Gold Coast, Australia. ISSN 0749.0208.
- Silva, R. (2010). Avaliação Experimental e Numérica de Parâmetros Associados a Modelos de Evolução da Linha de Costa. Dissertação de Doutoramento, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 488p.
- Silva, R., Veloso-Gomes, F., Taveira-Pinto, F. e Coelho, C. (2011). 3D Movable Bed Model Results Integration in Shoreline Change Model. Seventh International Symposium on Coastal Engineering and Science of Coastal Sediment Processes - Coastal Sediments '11, Miami, Florida, USA, 2 a 6 de Maio, Eds. Rosati, J.D., Wang, P., Roberts, T.M, World Scientific Publishing. ISBN-13 978-981-4355-52-0.
- Smith, J. M. (2003). Surf Zone Hydrodynamics. In: Vincent, L. (editor), Coastal Engineering Manual, Part II, Coastal Hydrodynamics, Chapter II-4, Engineer Manual 1110-2-1100, U. S. Army Corps of Engineers, Washington, DC, 42p.
- Sorensen, R., Thompson, E. F., Briggs, M., Chasten, M. A. e Lillycrop, L. (2003). Harbour Hydrodynamics. In: Demirbilek, Z. (editor), Coastal Engineering Manual, Part II, Coastal Hydrodynamics, Chapter II-7, Engineer Manual 1110-2-1100, U. S. Army Corps of Engineers, Washington, DC, 98p.
- Vicente, C. M. e Clímaco, M. (2003). Evolução de Linhas de Costa. Desenvolvimento e Aplicação de um Modelo Numérico. Informação Técnica Hidráulica ITH 42, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, 167p.