

**UNIVERSIDADE TÉCNICA DE LISBOA
INSTITUTO SUPERIOR TÉCNICO**

Modelação do Transporte de Sedimentos em Ambientes Costeiros

Trabalho Final de Curso da Licenciatura em Engenharia do Ambiente

(DOCUMENTO PROVISÓRIO)

Miguel Costa do Carmo
nº 46173

Orientador

Prof. Ramiro Neves, Depto. de Eng.ª Mecânica, IST

Co-orientador

Dr. Eng.º Adélio Silva, Hidromod

Lisboa, Abril de 2005

Resumo

A qualidade de quatro fórmulas desenvolvidas para o cálculo de taxas de transporte longitudinal de sedimentos não coesivos foi avaliada, tendo por objectivo a sua implementação no sistema de modelos MOHID. As fórmulas propostas por Bijker (1968), por Bailard (1981,1984), por Van Rijn (1984,1993) e por Dibajnia-Watanabe (1992), foram seleccionadas de um vasto leque devido à qualidade referenciada na literatura e ao uso comum em estudos de engenharia. O estudo das fórmulas centrou-se na comparação das resposta de cada fórmula à variação de parâmetros importantes no transporte de sedimentos, na verificação das previsões através de dados laboratoriais, e na comparação de resultados produzidos pelo modelo.

Pretendia-se assim, fornecer ao modelo de transporte de areias, novas fórmulas preditivas que representassem os avanços feitos na investigação em dinâmica sedimentar e aumentassem o leque de previsões disponíveis ao utilizador do modelo.

O sistema de modelos, que combina, mediante um processo iterativo e assumindo condições quasi-estacionárias, um modelo de ondas (STWAVE) e um modelo de circulação hidrodinâmica (MOHID) acoplado a um sub-modelo de transporte de sedimentos não-coesivos (módulo SAND), é descrito neste trabalho. Mais testes de validação são necessários.

Concluiu-se que as fórmulas de transporte possuem uma gama estrita de aplicabilidade, e que portanto a disponibilidade de várias fórmulas alternativas para o cálculo do transporte é uma mais-valia para o modelo. Por outro lado, constata-se que devido à complexidade do fenómeno, a modelação hidromorfológica não permite ainda a quantificação exacta dos volumes de transporte. Todavia, a avaliação qualitativa tem-se mostrado suficiente para o conhecimento dos sistemas e dos tipos de resposta a esperar na sequência de determinada acção.

Agradecimentos

Queria agradecer em primeiro lugar ao Professor Ramiro Neves, na qualidade de orientador, por me ter possibilitado a execução deste trabalho.

Gostaria também de agradecer ao Dr. Eng.º Adélio Silva, da HIDROMOD, que tornou o trabalho possível pelo seu interesse e conhecimento neste domínio, bem como pelo esboço de linhas de orientação.

A todas as pessoas que compõe a MARETEC e a HIDROMOD, agradeço a contínua ajuda e esclarecimentos, sem os quais não me teria sido possível realizar o trabalho. Em especial agradeço ao Luís e ao Frank pela ajuda imprescindível na compreensão dos meandros do MOHID.

Queria ainda agradecer ao *Corto Maltese*, pelo seu apoio incondicional nas noites de insónia, bem como às personagens sofredoras de Dostoievski, que ajudaram à relativização dos meus males.

Por fim agradeço a toda a minha gente, que na proximidade souberam como me motivar e alegrar.

Índice

RESUMO	2
AGRADECIMENTOS	3
ÍNDICE	4
1. INTRODUÇÃO	6
1.1 ENQUADRAMENTO	6
1.2 OBJECTIVOS	7
1.3 DESCRIÇÃO DO TRABALHO	7
2. FÓRMULAS PARA O TRANSPORTE DE AREIAS EM AMBIENTES COSTEIROS	8
2.1 AS FÓRMULAS ESTUDADAS	8
Fórmula híbrida de Bijker-Battachraya (1968,###)	8
Fórmula de Van Rijn (1984, 1993)	10
Fórmula de Bailard (1981,1984)	12
Fórmula de Dibajnia (1992)	13
2.2 PARÂMETROS FÍSICOS IMPORTANTES PARA O CÁLCULO DO TRANSPORTE	15
2.3 O COMPORTAMENTO DAS FÓRMULAS DE TRANSPORTE DE SEDIMENTOS	16
Diâmetros médios	16
Altura de onda	18
Corrente estacionária	19
2.4 CONCLUSÕES PARCIAIS	20
3. MODELAÇÃO DO TRANSPORTE DE SEDIMENTOS	22
3.1 CONDIÇÕES FRONTEIRA	23
3.2 O MODELO DE TRANSPORTE DE AREIAS - MÓDULO SAND	24
3.3 O MODELO DE ONDAS – STWAVE	25
3.3.1 <i>Utilização do modelo</i>	26
3.3.2 <i>Implementação do cálculo dos espectros da onda no STWAVE</i>	27
3.4 RESULTADOS	27
3.4.1 <i>Comparação de perfis transversais</i>	28
Caso 1	28
Caso 2	30
Comparação de tempos de cálculo	32
3.4.2 <i>Praias com obstáculos</i>	32
Obstáculo Longitudinal	32
Obstáculo Transversal	34
3.4.3 <i>Lagoa de Óbidos</i>	35
3.4.4 <i>Conclusões parciais</i>	37
4. CONCLUSÕES FINAIS	38
ANEXO I. - DESCRIÇÃO DO MODELO HIDRODINÂMICO	39
ANEXO II. - DESCRIÇÃO DE DUAS FÓRMULAS DE TRANSPORTE DE AREIAS DO MÓDULO SAND	40
Ackers-White (1973)	40
Meyer-Peter & Muller (1948)	41
ANEXO III. - DESCRIÇÃO DO MODELO DE ONDAS	43
Refração e Empolamento (shoaling)	44

Difracção	45
Altura da onda na zona de rebentação.....	46
Gradientes das tensões de radiação.....	46
ANEXO IV. - FÓRMULA CERC (1984) E KAMPHUIS (1986)	48
ANEXO V. - FENÓMENOS DE TRANSPORTE LONGITUDINAL.....	49
BIBLIOGRAFIA.....	50

1. Introdução

1.1 Enquadramento

Os ecossistemas litorais portugueses apresentam um elevado grau de alteração do seu equilíbrio, com consequências claras na perda do seu valor natural, social e económico. Em termos morfológicos, os desequilíbrios expressam-se pela alteração dos balanços de equilíbrio entre a erosão e a deposição. Assim, são inúmeras as situações ao longo da costa, por um lado, de assoreamento de rias e outros planos de água, e por outro lado, de redução drástica dos areais das praias.

No sentido de compreender e intervir sobre os desequilíbrios na morfologia, mas também de prevenir novos desequilíbrios quando se projectam obras costeiras, a previsão e simulação do transporte de areias torna-se de importância fundamental nas acções de planeamento e protecção da orla costeira. Os modelos matemáticos de transporte de areias representam assim uma ferramenta importante no estudo deste sistema, contribuindo decisivamente para uma melhor compreensão da evolução morfológica dos fundos e dos fenómenos envolvidos. Nas potenciais aplicações de um modelo de transporte de areias encontram-se o estudo de fenómenos de erosão/deposição em redor de estruturas costeiras; a monitorização de estuários, em particular das aberturas de mar; e estudos costeiros em geral.

A dinâmica dos sedimentos em ambientes costeiros é controlada pelo escoamento gerado na acção combinada de ondas, marés e vento. Os sedimentos são continuamente erodidos, transportados e depositados, originando uma permanente evolução do fundo em todas as escalas espaciais e temporais.

A complexidade da simulação do transporte de sedimentos resulta do vasto número de processos envolvidos no forçamento do escoamento (ondas, marés, caudais de rios, vento), assim como da quantidade de fenómenos presentes na interacção entre o escoamento e os sedimentos (arrastamento, ressuspensão/deposição), e especialmente da interacção, não-linear, entre processos com escalas de tempo e de espaço muito diferentes (Silva *et al*, 1997). Deste modo, visto que a simulação de todos os processos naturais é impossível devido à falta de conhecimento profundo desses processos e de recursos computacionais, é necessário desenvolver simplificações, que passam fundamentalmente pela discretização espacial e temporal, pela parametrização de processos e por assumir diversos pressupostos físicos e numéricos (Winter, 2004).

A MARETEC¹ e a HIDROMOD², na sequência de diversas aplicações conjuntas em zonas costeiras e em embocaduras de estuários, têm vindo a desenvolver uma sistema integrado para o estudo da hidromorfologia, combinando através de um processo iterativo, modelos de ondas, de correntes e de transporte de sedimentos.

A figura seguinte esquematiza a zona costeira indicando a terminologia adoptada neste trabalho.

¹ Centro de investigação interdisciplinar do IST sob a coordenação do Prof. Ramiro Neves, dedicado à modelação de ambientes marinhos.

² HIDROMOD, Modelação em Engenharia, Lda - desenvolve e aplica software técnico em áreas científicas e de engenharia relacionadas com Mecânica dos Fluidos.

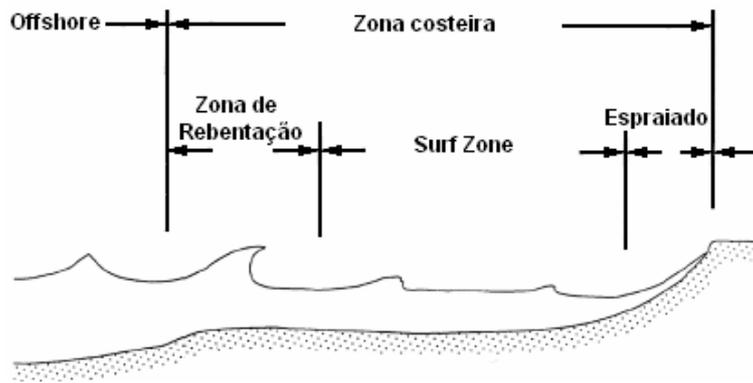


Ilustração 1 – Terminologia da zona costeira.

1.2 Objectivos

O objectivo do presente trabalho é a aquisição de conhecimentos relacionados com os processos de hidrodinâmica e transporte na zona costeira. Como corolário do trabalho pretende-se que sejam adquiridos conceitos básicos de modelação destes processos em zonas sujeitas à acção combinada de ondas e correntes, bem como um conhecimento geral dos benefícios e limitações deste tipo de abordagens para a compreensão dos referidos processos.

Em paralelo, pretende-se que ocorra um levantamento do estado da arte nestes domínios que permita como mínimo dominar correctamente os conceitos práticos e teóricos que estão na base das abordagens seguidas.

Em termos concretos, este trabalho definiu como principal objectivo fornecer ao modelo de transporte de areias, novas fórmulas preditivas, que por um lado representassem os avanços feitos na investigação em dinâmica sedimentar e por outro aumentasse o leque de previsões disponíveis ao utilizador do modelo. É ainda apresentada a descrição do sistema de modelos e das opções subjacentes ao seu acoplamento, acompanhada dum conjunto de aplicações com fins de verificação.

1.3 Descrição do Trabalho

Este relatório é constituído por três partes, sendo a primeira dedicada ao estudo comparativo de fórmulas de transporte de areias em ambientes costeiros, que resulta do levantamento do *estado da arte* neste domínio. Deste capítulo do trabalho surge um conjunto de parametrizações a implementar no modelo de transporte. No capítulo seguinte efectua-se a descrição de um sistema de modelos para a simulação do trânsito sedimentar em ambientes sujeitos à acção combinada de ondas e marés. Por fim, no último capítulo efectua-se um balanço do trabalho, onde se apresentam as considerações finais e propostas de trabalho futuro.

2. Fórmulas Para o Transporte de Areias em Ambientes Costeiros

A partir da análise do estado actual de desenvolvimento de fórmulas de transporte de sedimentos não coesivos (areias), foram seleccionadas quatro formulações bem conhecidas e que expressam diferentes abordagens do problema, bem como diferentes etapas de investigação nesta área. Assim, pretende-se neste capítulo efectuar uma avaliação comparativa das fórmulas propostas por Bailard (1981,1984), por Van Rijn (1984,1993), por Dibajnia-Watanabe (1992), e uma fórmula híbrida Bijker-Battchraya (1968;###). Todas as fórmulas avaliadas foram desenvolvidas para ambientes costeiros e portanto consideram o efeito combinado de ondas e correntes. Uma das limitações das fórmulas de transporte resulta do facto dos seus autores as terem comparado e ajustado com apenas um certo tipo de dados (Camenen et al, 2001).

As fórmulas foram implementadas numa programa simples originalmente desenvolvido na HIDROMOD, *TestFormulas*, e que permite comparar as taxas de transporte previstas por cada uma das expressões, fixando todos os parâmetros relativos às ondas, escoamento e sedimentos. Deste modo, as diferenças registadas no comportamento das diferentes previsões relacionam-se directamente com a forma como estas descrevem a dinâmica de transporte. Neste sentido optou-se por comparar a dependência das fórmulas em relação aos parâmetros fundamentais do transporte de sedimentos. Esta abordagem fornece um melhor entendimento da física do transporte.

2.1 As fórmulas estudadas

Como se referiu atrás, as fórmulas estudadas abordam de maneiras diferentes o transporte de sedimentos. As fórmulas de Bijker-Battchraya (daqui em diante Bijker) e de Van Rijn calculam o transporte total dividindo-o em transporte junto ao fundo e transporte em suspensão, em que a direcção do fluxo de sedimentos corresponde invariavelmente à direcção da corrente. As parametrizações para o transporte no fundo derivam de um método usado para o transporte fluvial posteriormente adaptado a ambientes costeiros. Bailard deduz uma expressão a partir da formulação energética de Bagnold (1966), que assume que o trabalho realizado no transporte de sedimentos é proporcional à energia dissipada pelo escoamento. Esta expressão considera ainda o vector da velocidade instantânea que resulta da interacção entre as ondas e as correntes. A fórmula de Dibajnia-Watanabe (daqui em diante Dibajnia) calcula o transporte total e surge da análise da velocidade instantânea devido às ondas e correntes e do movimento induzido de sedimentos. Todas as fórmulas supõem que os sedimentos são não coesivos.

Os artigos de Camenen *et al* (2003) e Bayram *et al* (2001) constituíram a bibliografia de base a este capítulo.

Fórmula híbrida de Bijker-Battachraya (1968;###)

Esta expressão divide o transporte em transporte no fundo e em suspensão. Para o cálculo do transporte no fundo usou-se a fórmula proposta por Bijker (1968) - uma das primeiras fórmulas a considerar o efeito conjunto de ondas e correntes - de uso vulgarizado entre engenheiros europeus, que modifica a fórmula de Kalinske-Frijlink (Frijlink, 1952), todavia para o transporte em suspensão, substituiu-se o cálculo integral proposto por Bijker por uma expressão algébrica, de cálculo numérico rápido, fornecida por Battachraya-Tow (###). O Transporte total é obtido pela soma do transporte no fundo e em suspensão.

Deste modo, a taxa de transporte no fundo, q_b , é dada pela expressão seguinte,

$$q_b = Ad \frac{U}{C} \sqrt{g} \exp\left(\frac{-0.27(\rho_s - \rho)gd}{\mu\tau_{cw}}\right) \quad [m^2.s^{-1}] \quad \text{Eq. 1.}$$

onde A é um coeficiente empírico (1.0 para ondas que não rebentam e 5.0 para o caso contrário), d o diâmetro médio das partículas (d_{50}), U a média temporal da velocidade da corrente, C o coeficiente de Chézy com base na rugosidade dada por k_{sc} – rugosidade devido à corrente, g a aceleração gravítica, ρ_s e ρ as densidades da areia e da água, respectivamente, μ um parâmetro relativo aos *ripples* (pequenas dunas de areia) e τ_{cw} a tensão de corte no fundo devido à interacção entre correntes e ondas. A primeira parte da expressão refere-se ao transporte efectivo, enquanto que a segunda (o expoente) refere-se à mobilização dos sedimentos. O μ , que indica a influência da forma da rugosidade do fundo no transporte, é calculado através das seguintes expressões,

$$\mu = \left(\frac{C}{C_{90}}\right)^{1.5} \quad \text{Eq. 2.}$$

$$C = 18 \log_{10}\left(\frac{12h}{k_{sc}}\right) \quad \text{Eq. 3.}$$

onde C_{90} é o coeficiente de Chézy para uma rugosidade dada por d_{90} - diâmetro das partículas excedido apenas por 10% destas em peso, e h a altura da coluna de água. A tensão de corte combinada, τ_{cw} , segundo Bijker, é dado por:

$$\tau_{cw} = \tau_c \left(1 + \frac{1}{2} \left(\xi \frac{U_{bw}}{U}\right)\right) \quad \text{Eq. 4.}$$

em que U_{bw} corresponde à velocidade orbital máxima no fundo provocada pelas ondas, τ_c à tensão de corte no fundo provocada pela corrente e ξ corresponde a um coeficiente entre os factores de atrito:

$$\tau_c = 0.5 \rho f_c U^2 \quad \text{Eq. 5.}$$

$$\xi = \sqrt{\frac{f_w}{f_c}} \quad \text{Eq. 6.}$$

O f_w e f_c são os coeficientes de atrito devido às ondas e à corrente, respectivamente. O f_w é definido na secção 2.2, pois é comum a várias expressões.

$$f_c = \frac{8g}{c^2} = \frac{0.24}{\left(\log_{10}\left(\frac{12h}{k_{sc}}\right)\right)^2} \quad \text{Eq. 7.}$$

O transporte em suspensão proposto por Battacharya-Tow, é uma expressão simples que depende do transporte de fundo, q_b , calculado anteriormente,

$$q_s = q_b \frac{k_s}{k_b} \quad \text{Eq. 8.}$$

em que k_s e k_b são calculados por uma rotina constituída por polinómios obtidos empiricamente e que se baseiam em dois parâmetros de carácter físico, expressa pelas seguintes equações:

$$A = h/k_{sc} \quad \text{Eq. 9.}$$

$$Z_{wc} = \frac{w_s}{k \sqrt{\frac{\tau_{cw}}{\rho}}} \quad \text{Eq. 10.}$$

$$B_1 = 1.05 \frac{Z_{wc}^{0.96}}{A^{0.013 Z_{wc}}}; \quad B_2 = 1 - B_1$$

$$k_b = \frac{1 - B_1 0.1667^{B_2}}{B_2} \quad \text{Eq. 11.}$$

$$k_s = \frac{0.415 [B_2 (A^{B_2} \log_{10}(30.2A) - 3.4078419) + 1 - A^{B_2}]}{B_2^2}$$

O Z_{wc} é um parâmetro de suspensão, que reflecte o quociente entre as forças gravíticas (descendentes) e as forças, no sentido ascendente, que actuam sobre uma partícula; e k é igual a 0.384.

Fórmula de Van Rijn (1984, 1993)

Nos textos de Van Rijn encontra-se uma descrição detalhada da sua formulação para o cálculo do transporte no fundo e em suspensão. Para o transporte de fundo, o autor adaptou a abordagem de Bagnold (1966), assumindo que o movimento dos sedimentos no fundo é devido fundamentalmente aos saltos das partículas provocados pelas forças hidrodinâmicas e gravíticas. No presente texto apresenta-se uma síntese relativa às expressões de cálculo utilizadas. A taxa de transporte no fundo, q_b , é dada por,

$$q_b = 0.25d \sqrt{\frac{\tau'_c}{\rho}} T^{1.5} D_*^{-0.3} \quad [m^2 .s^{-1}] \quad \text{Eq. 12.}$$

onde τ'_c é a tensão de corte efectiva no fundo devido à corrente, T um parâmetro de suspensão que expressa a mobilidade das partículas em relação ao estado crítico de início do movimento, e D_* o diâmetro adimensional para os sedimentos. O τ'_c é calculado através de um método desenvolvido por Van Rijn, onde

$$\tau'_c = \tau_{ca} \mu_c \alpha_w \quad \text{Eq. 13.}$$

com τ_{ca} dado pelas expressões seguintes onde k_a é a rugosidade aparente,

$$\tau_{ca} = 0.125 \rho f_{ca} U^2 \quad \text{Eq. 14.}$$

$$f_{ca} = \frac{0.24}{\left(\log_{10} \left(\frac{12h}{k_a} \right) \right)^2} \quad \text{Eq. 15.}$$

$$k_a = k_{sc} \exp \left(0.75 \frac{U_{bw}}{U} \right) \quad \text{Eq. 16.}$$

e μ_c é um factor de forma para as correntes igual a,

$$\mu_c = \frac{f'_c}{f_c} = \left(\frac{\log_{10} \left(\frac{12h}{k_{sc}} \right)}{\log_{10} \left(\frac{12h}{3d_{90}} \right)} \right)^2 \quad \text{Eq. 17.}$$

com f'_c e f_c representando os coeficientes de atrito efectivo (*skin friction*) e total, respectivamente, e α_w é um coeficiente devido à presença de ondas dado por,

$$\alpha_w = \begin{cases} \left(\frac{\log_{10} \left(\frac{12h}{k_{sc}} \right)}{\log_{10} \left(\frac{12h}{3d_{90}} \right)} \right)^2, & \text{se } \delta_s > k_{sc}/10 \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases} \quad \text{Eq. 18.}$$

em que δ_s é a espessura da camada limite calculada por,

$$\delta_s = 0.216 A_{bw} \left(\frac{A_{bw}}{k_{sw}} \right)^{-0.25} \quad \text{Eq. 19.}$$

onde A_{bw} é a amplitude da oscilação das partículas de água junto ao fundo. O D^* é dado por,

$$D_* = d \left(\frac{(s-1)g}{\nu^2} \right)^{1/3} \quad \text{Eq. 20.}$$

onde s ($=\rho_s/\rho$) é a densidade relativa e ν a viscosidade cinemática da água. O parâmetro T é expresso da seguinte forma,

$$T = \max \left(0.0001, \frac{\theta'_{cw} - \theta_{cr}}{\theta_{cr}} \right) \quad \text{Eq. 21.}$$

em que θ_{cr} é o parâmetro crítico de Shields para o início do movimento e θ'_{cw} é o parâmetro de Shields para a tensão de corte efectiva no fundo devido à acção combinada de ondas e correntes dado por,

$$\theta'_{cw} = \frac{\tau'_{cw}}{(\rho s - \rho)gd} \quad \text{Eq. 22.}$$

$$\tau'_{cw} = \tau'_c + \tau'_w \quad \text{Eq. 23.}$$

com a tensão de corte efectiva no fundo devido às ondas, τ'_w , expressa por,

$$\tau'_w = (0.25 \rho f_w U_{bw}^2) \mu_w \quad \text{Eq. 24.}$$

$$\mu_w = 0.6 / D_* \quad \text{Eq. 25.}$$

onde μ_w é um factor de forma para as ondas. O θ_{cr} é expresso por troços em função do D_* ,

$$\theta_{cr} = \begin{cases} 0.24D_*^{-1}, & 1 < D_* \leq 4 \\ 0.14D_*^{-0.64}, & 4 < D_* \leq 10 \\ 0.04D_*^{-0.1}, & 10 < D_* \leq 20 \\ 0.013D_*^{0.29}, & 20 < D_* \leq 150 \\ 0.055, & D_* > 150 \end{cases} \quad \text{Eq. 26.}$$

O transporte em suspensão, q_s , de Van Rijn é determinado pela integração na vertical da coluna de água do produto da velocidade e concentração, desde o limite superior da camada de fundo ($z=a$) até à superfície livre,

$$q_s = \int_a^h u(z)c(z) dz \quad [m^2.s^{-1}] \quad \text{Eq. 27.}$$

O perfil de concentrações é obtido pela resolução da equação da concentração sobre a vertical, conhecendo a concentração para $z=a$, c_a .

$$\frac{dc}{dz} = -\frac{(1-c)^5 c W_s}{\varepsilon_{scw}} \quad \text{Eq. 28.}$$

$$ca = c(z) \Big|_{z=a} = 0.015 \frac{d T^{1.5}}{a D_*^{0.3}} \quad \text{Eq. 29.}$$

em que $c(z)$ é a concentração em volume (média temporal) para a altura z , $(1-c)^5$ corresponde à atenuação da velocidade de queda devido a elevadas concentrações, e ε_{scw} é o coeficiente de mistura para o caso da interacção ondas-correntes. O nível de referência, $z=a$, o perfil de velocidades, $u(z)$, e o ε_{scw} foram implementados seguindo as equações de Van Rijn (1993). O transporte total corresponde à soma dos dois tipos de transporte calculados anteriormente.

Fórmula de Bailard (1981,1984)

Bailard desenvolve uma fórmula para o escoamento derivado da interacção onda-corrente, a partir do modelo introduzido por Bagnold. Esta fórmula de transporte faz também a divisão entre os dois tipos convencionais de transporte: no fundo e em suspensão. Todavia no presente estudo utilizou-se um modelo desenvolvido para o transporte total, que pressupõe a predominância de uma corrente longitudinal fraca e despreza os efeitos do declive. Assim, para uma média local no tempo, a taxa de transporte longitudinal de sedimentos é dada por (Bailard, 1984),

$$q_t = \frac{0.5 \rho_f w}{(\rho_s - \rho)g} \left(U_{BW}^3 \frac{e_b}{\tan \gamma} \left(\frac{\delta_v}{2} + \delta_v^3 \right) + U_{bw}^4 \frac{e_s}{W_s} (\delta_v u^*) \right) \quad [m^2.s^{-1}] \quad \text{Eq. 30.}$$

onde $\varepsilon_b=0.1$ e $\varepsilon_s=0.02$ são factores de eficiência para o transporte no fundo e em suspensão respectivamente, neste trabalho considerados constantes. Refira-se que alguns estudos mostram que estes factores estão relacionados com a tensão de corte e o diâmetro das partículas e portanto são variáveis (Bayram *et al*, 2001). O parâmetro $\tan \gamma$ é um factor de atrito dinâmico, tipicamente $\tan \gamma = 0.63$, e

$$\delta_v = \frac{U}{U_{bw}}; \quad u^* = \frac{\{U'_t\}^3}{U_{bw}} \quad \text{Eq. 31.}$$

O U'_t expressa o vector da velocidade instantânea junto ao fundo (interacção onda-corrente) e a média durante o período da onda, T_w , da norma do vector da velocidade ao cubo, é calculada de acordo com as seguintes expressões,

$$\{U'_t\}^3 = \frac{\int_0^{T_w} |U'_t|^3 dt}{T_w} \quad \text{Eq. 32.}$$

$$U'_t = U' + U'_{bw} \sin\left(\frac{2\pi t}{T_w}\right) \quad \text{Eq. 33.}$$

Fórmula de Dibajnia (1992)

A fórmula para o cálculo da taxa de transporte total de areias proposta por Dibajnia apresenta semelhanças com o modelo de Bailard na medida que considera igualmente a variação da velocidade instantânea do fluido ao longo do período da onda. Mais precisamente, esta fórmula quebra o cálculo do transporte em dois semi-ciclos do período da onda. Durante o primeiro semi-ciclo os sedimentos deslocam-se no sentido da onda, por acção da velocidade instantânea que representa a sobreposição da corrente e das velocidades orbitais durante a crista da onda; e no segundo semi-ciclo o fluxo de sedimentos tem sentido oposto, pois a velocidade orbital durante a cava da onda supera a velocidade da corrente (Ilustração 2). Perante esta conceptualização do transporte, conclui-se que para situações em que a velocidade da corrente supera, por exemplo, a velocidade máxima na cava, o modelo de transporte fica reduzido a apenas um dos ciclos.

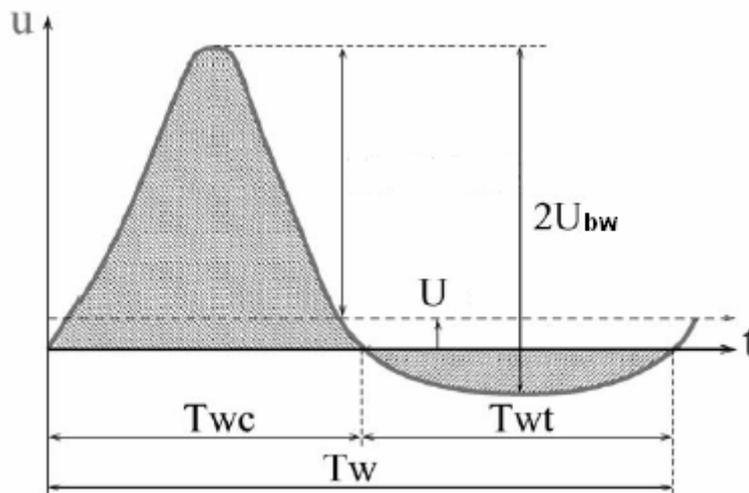


Ilustração 2 - perfil genérico da velocidade instantânea do escoamento junto ao fundo durante o período de onda (onda não-linear). Repare-se que o segundo semi-ciclo inicia-se apenas quando a velocidade orbital supera a da corrente.

Este modelo considera ainda o fenómeno de retardamento na resposta dos sedimentos às variações do escoamento oscilatório, tipicamente designado por *phase-lag* e que pode descrever-se do seguinte modo: após um semi-ciclo terminar uma fracção do material mobilizado mantêm-se em suspensão, sendo transportado no sentido oposto durante o semi-ciclo seguinte.

De acordo com este modelo o fluxo vectorial de sedimentos é dado por,

$$q'_s = 0.0015W_s d \frac{\Gamma'}{\Gamma} \Gamma^{0.55} \quad [m^2 .s^{-1}] \quad \text{Eq. 34.}$$

que corresponde numa forma não vectorial, desde que se considere as ondas e correntes colineares e o transporte total com o mesmo sentido da corrente, por:

$$q'_s = 0.0015W_s d\Gamma^{0.55} \quad \text{Eq. 35.}$$

onde,

$$\Gamma = \frac{T_{wc}u_{wc}(\Omega_c^3 + \Omega'_c{}^3) - T_{wt}u_{wt}(\Omega_t^3 + \Omega'_t{}^3)}{(u_{wc} + u_{wt})T_w} \quad \text{Eq. 36.}$$

em que T_{wc} e T_{wt} são os períodos dos semi-ciclos do escoamento, de acordo com a esquematização da Figura 1; Ω_c e Ω_t a quantidade de areia mobilizada e depositada durante o período T_{wc} e T_{wt} , respectivamente; Ω'_c e Ω'_t a quantidade de areia que se mantêm em suspensão após o semi-ciclo da crista e da cava, respectivamente; e u_{wc} e u_{wt} , as velocidades quadráticas expressas por,

$$u_{wj}^2 = \frac{2}{T_{wj}} \int_t^{t+T_{wj}} U_t^2 dt \quad \text{Eq. 37.}$$

onde o índice j pode ser c ou t , e U_t é velocidade instantânea já definida em Bailard. As quantidades Ω_j e Ω'_j foram calculadas através das seguintes expressões,

$$\Omega_j = \begin{cases} \omega_j \frac{2W_s T_{wj}}{d} & , se w_j \leq w_{cr} \\ \frac{2W_s T_{wj}}{d} & , se w_j \geq w_{cr} \end{cases} \quad \text{Eq. 38.}$$

$$\Omega'_j = \begin{cases} 0 & , se w_j \leq w_{cr} \\ (\omega_j - 1) \frac{2W_s T_{wj}}{d} & , se w_j \geq w_{cr} \end{cases}$$

em que ω_j é um parâmetro relativo ao *phase-lag* e w_{cr} é um factor crítico relativo as formas do fundo expressos da seguinte forma,

$$\omega_j = \frac{u_{wj}^2}{2(s-1)gW_s T_{wj}} \quad \text{Eq. 39.}$$

$$\Omega_j = \begin{cases} 0.3 & , \psi_{cw(\max)} \leq 0.2 \\ 1 - 0.97 \left(1 - \left(\frac{\psi_{cw(\max)} - 0.2}{0.4} \right)^2 \right)^{0.5} & , 0.2 < \psi_{cw(\max)} \leq 0.6 \\ 1 & , \psi_{cw(\max)} > 0.6 \end{cases} \quad \text{Eq. 40.}$$

O $\psi_{cw(\max)}$ representa o parâmetro de Shields máximo, devido à interacção de ondas e correntes determinado pelas expressões seguintes, de acordo com Ahmed (2003).

$$\psi_w = \frac{f_w U_{\max}^2}{2(s-1)gd} \quad \text{Eq. 41.}$$

$$U_{\max} = \max(U, U_{bw}) \quad \text{Eq. 42.}$$

Por fim os períodos T_{wc} e T_{wt} foram obtidos resolvendo a equação $U_t=0$.

2.2 Parâmetros físicos importantes para o cálculo do transporte

No conjunto de fórmulas estudadas há um leque de parâmetros físicos que se repetem e que portanto deverão ser calculados de igual forma de modo que as diferenças nas previsões resultem apenas das diferentes formulações do transporte.

Para a determinação da velocidade orbital máxima no fundo, U_{bw} , utiliza-se a rotina proposta por Van Rijn (1993), expressa em seguida, e que tem como parâmetros a altura significativa da onda, H_s , o período das onda, T_w , e a altura da coluna de água, h .

$$\begin{aligned}
 Y &= \frac{4.02h}{T_w^2} \\
 Pol &= 1 + Y(0.666 + Y(0.355 + Y(0.161 + Y(0.0632 + Y(0.0218 + 0.00654Y)))) \\
 k &= \frac{\sqrt{Y^2 + \frac{Y}{Pol}}}{h} \\
 A_{bw} &= \frac{H_s}{2 \sinh(kh)} \\
 U_{bw} &= \frac{2\pi A_{bw}}{T_w}
 \end{aligned} \tag{Eq. 43.}$$

onde Y e Pol são duas variáveis utilizadas no cálculo do número de onda, k ($=2\pi/\text{comprimento de onda}$), e A_{bw} é a amplitude da oscilação das partículas de água junto ao fundo.

O factor de atrito devido às ondas, f_w , é determinado a partir da fórmula proposta por Swart, obtida pela aferição da fórmula proposta por Jonsson (Liu, 2001).

$$f_w = \exp\left(-6.0 + 5.2\left(\frac{A_{bw}}{K_{sw}}\right)^{-0.19}\right) \tag{Eq. 44.}$$

A velocidade de queda, w_s , é expressa por troços função do diâmetro das partículas,

$$W_s = \begin{cases} \frac{(s-1)gd_s^2}{18\nu} & , \quad 1 < d_s < 100\mu m \\ \frac{10\nu}{d_s} \left(\sqrt{1 + \frac{0.01(s-1)gd_s^3}{\nu^2}} - 1 \right) & , \quad 100 \leq d_s < 1000\mu m \\ 1.1\sqrt{(s-1)gd_s} & , \quad d_s \geq 1000\mu m \end{cases} \tag{Eq. 45.}$$

onde d_s é o diâmetro representativo, $d_s=0.9d$. Considera-se ainda as seguintes constantes físicas: a densidade média dos sedimentos, $\rho_s = 2650\text{kg.m}^{-3}$, da água, $\rho = 1000\text{kg.m}^{-3}$, a viscosidade cinemática da água, $\nu = 10^{-6}\text{m}^2\text{s}^{-1}$ e a aceleração gravítica, $g = 9.81\text{m.s}^{-2}$.

2.3 O comportamento das fórmulas de transporte de sedimentos

A comparação do comportamento das fórmulas dependente dos principais parâmetros do transporte de sedimentos possibilita, por um lado, uma melhor compreensão da física do transporte e, por outro lado, o conhecimento dos limites de aplicação de cada uma das formulações. Estudou-se assim, separadamente, a influência do diâmetro médio das areias, da altura significativa de onda e da corrente estacionária, tendo como referência o conjunto de dados laboratoriais utilizados em Camenen *et al* (2003). É um conjunto pouco extenso, mas que permite comparar resultados em termos das ordens de grandeza obtidas e das tendências gerais do comportamento.

Segundo Camenen *et al* (2003), todas as fórmulas fornecem resultados aproximadamente equivalentes quando comparadas com uma grande quantidade de dados, todavia quando comparadas em relação a um único parâmetro, o comportamento entre fórmulas pode diferir bastante. Os autores referem ainda, que no geral estas fórmulas são calibradas para uma gama de valores dos parâmetros estrita, o que origina previsões erradas fora do intervalo estudado.

Para fins de comparação, as ondas foram descritas como sinusoidais, facto que tem apenas consequências nas fórmulas de Bailard e de Dibajnia, pois estas consideram o perfil da velocidade instantânea orbital. As fórmulas de Bijker e de Van Rijn introduzem o efeito das ondas no transporte através de um parâmetro: a velocidade orbital máxima no fundo. O uso de um perfil de segunda ordem para a velocidade da onda (onda não-sinusoidal) permite uma descrição das ondas perto da praia mais consistente com a realidade e com melhores resultados relativos ao transporte (Camenen *et al*, 2003). Em consequência, os mesmos autores salientam a forte limitação das fórmulas de Van Rijn e Bijker por não permitirem considerar a ocorrência de ondas assimétricas, características dos ambientes costeiros junto à praia, em particular na zona de rebentação.

Nesta avaliação, por simplificação, optou-se por considerar as rugosidades devido à corrente e às ondas constantes, apesar de não o serem. Aliás, segundo Bayram *et al* (2001), a rugosidade do fundo, que é incluída no transporte através dos coeficientes de atrito devido à corrente e às ondas, é um parâmetro decisivo que marcadamente influencia a taxa de transporte de sedimentos, especialmente para o transporte no fundo.

Por fim, somente o caso particular em que ondas e correntes têm a mesma direcção foi estudado. Esta opção deve-se ao facto das formulações de Bijker e Van Rijn considerarem um factor angular que se mantêm constante para ângulos entre os 0° e os 90°.

Diâmetros médios

Os resultados para três situações distintas de escoamento costeiro, combinando diferentes velocidades de corrente, alturas de onda e profundidades, serviram de base ao estudo da influência da variação do diâmetro médio dos sedimentos no comportamento das fórmulas. A gama de diâmetros estudada, engloba os valores típicos das areias, variando entre um limite inferior, abaixo do qual os efeitos coesivos ganham significado ($d \geq 0.06\text{mm}$) e um limite superior cerca de 1.5mm.

O diâmetro médio dos sedimentos aparece nas fórmulas, fundamentalmente, através dos coeficientes de atrito f_c e f_w e da velocidade de queda, W_s , que são funções crescentes do diâmetro. Assim, com o aumento do diâmetro das areias o transporte em suspensão reduz-se, devido ao aumento da velocidade de queda, contudo o transporte no fundo aumenta, pois as

tensões de corte no fundo aumentam com o aumento dos coeficientes de atrito. Não obstante o parâmetro de Shields é uma função decrescente do diâmetro e portanto, para um determinado escoamento, deverá existir um diâmetro crítico a partir do qual o fluxo de sedimentos é nulo (Camenen *et al*, 2001).

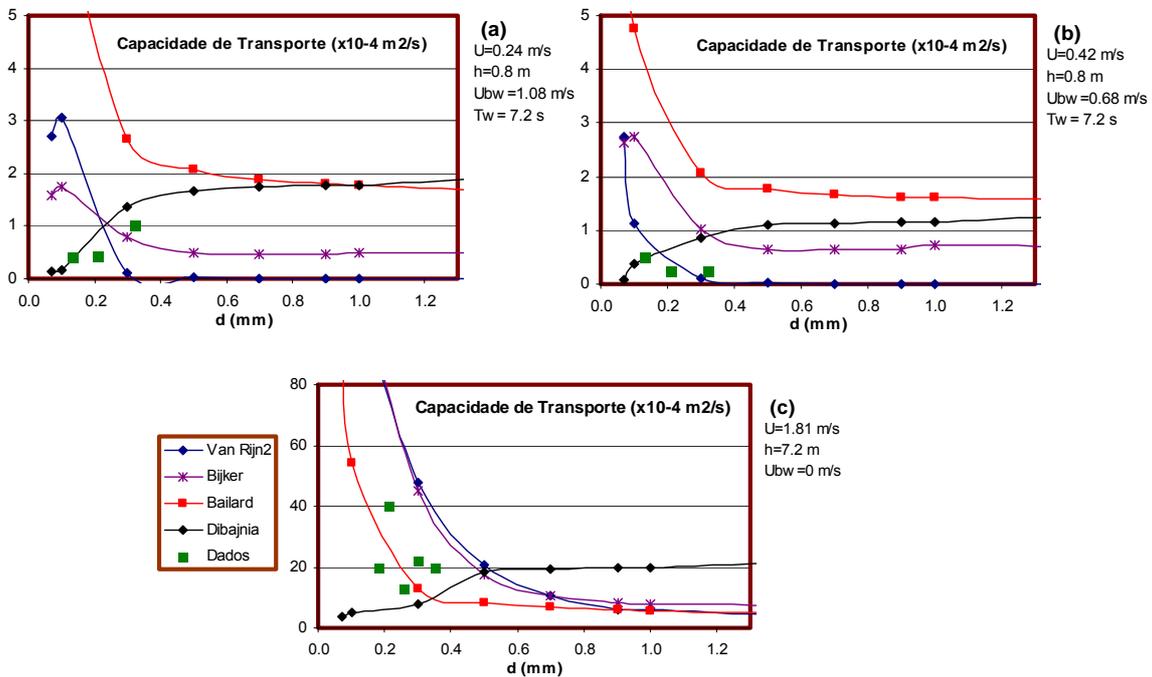


Gráfico 1 – Influência do diâmetro dos sedimentos na taxa de transporte para um caso em que as ondas prevalecem (a), para uma caso com ondas e correntes (b) e para um caso com apenas corrente (c).

Na situação em que a velocidade orbital das ondas prevalece sobre a corrente (Gráfico 1a) todas as fórmulas prevêm taxas semelhantes às taxas medidas experimentalmente, com excepção de Bailard. Pode-se observar que Van Rijn, Bijker, e Bailard descrevem um comportamento semelhante, prevendo taxas inversamente proporcionais ao diâmetro. A fórmula de Dibajnia apresenta o comportamento mais concordante com a tendência dos dados, que se resume no aumento do transporte com aumento do diâmetro, e contrário ao comportamento das restantes formulações. Esta situação poderá ser entendida recorrendo aos efeitos de *phase-lag*: as areias finas estão mais sujeitas às inversões no escoamento oscilatório. Repare-se também, que para diâmetros superiores a 0.7mm todas as fórmulas estabilizam num patamar, Van Rijn e Bijker prevendo taxas nulas ou muito reduzidas, e Bailard e Dibajnia fornecendo valores na ordem dos $2.0 \text{ m}^2/\text{s}$. Este facto pode dever-se à forma incipiente com que as primeiras introduzem as ondas no transporte. A expressão de Van Rijn indica transporte aproximadamente nulo para diâmetros superiores a 0.3mm, situação que dificilmente se verificará na realidade, tendo em conta os dados disponíveis e as condições de escoamentos. De modo geral esta diferença entre as respostas das fórmulas, verifica-se também nas outras situações de escoamento.

Em relação à situação com ondas e correntes (Gráfico 1b) regista-se, grosso modo, comportamentos semelhantes aos referidos para o anterior, salientando-se, no entanto, que as medidas disponíveis parecem indicar um decréscimo do transporte com o aumento do diâmetro, o que torna a previsão de Van Rijn a melhor ajustada.

Nos Gráficos 1a e 1b observam-se pequenos picos iniciais nas previsões de Van Rijn e Bijker para diâmetro igual 0.1mm. Este comportamento pode ser explicado através da equação por troços da velocidade de queda da partículas (Eq. 45), onde observa-se que para diâmetros

médios inferiores a 0.9mm esta velocidade é calculada por uma expressão que perto da descontinuidade fornece valores superiores para a velocidade, o que por conseguinte reduz o transporte.

Para o caso sem ondas (Gráfico 1c), as fórmulas estudadas mantêm um comportamento relativo semelhante ao observado atrás, verificando-se novamente uma oposição entre o comportamento descrito por Dibajnia e as restantes previsões. Para tamanhos de grão superiores a 0.4mm as diferenças entre previsões não são significativas, porém para tamanhos inferiores as taxas previstas podem diferir em várias ordens de grandeza, tornando-se necessário entender qual a fórmula mais ajustada. Os dados disponíveis não são claros a indicar uma tendência, contudo permitem concluir que para a gama de valores respectiva às medidas a fórmula de Bailard apresenta o melhor ajuste.

Para grandes diâmetros ($d > 1\text{mm}$), o transporte é função principalmente dos coeficientes de atrito e do parâmetro de Shields. Somente a fórmula de Van Rijn entra em conta com o parâmetro crítico de Shields, que indica que o fluxo deverá ser nulo a partir de um determinado diâmetro crítico. Deste modo, à excepção de Van Rijn, todas as fórmulas prevêem transporte de sedimentos aproximadamente independente do diâmetro. Isto pode ser constatado, por exemplo, no caso c, onde o transporte para diâmetros muito elevados ($d \approx 0.01\text{m}$), fora da gama representada nos gráficos, observa-se que apenas a fórmula de Van Rijn prevê transporte nulo de sedimentos.

Altura de onda

A análise da influência da altura de onda no comportamento das fórmulas, desenvolveu-se por comparação das previsões para três diâmetros de grão diferentes, mantendo a velocidade da corrente constante. A gama de alturas estudada varia entre $H_s = 0\text{m}$ (inexistência de ondas) e $H_s = 2\text{m}$, para um período de onda constante, igual a 7.2s. Na Tabela 1 estabelece-se a correspondência entre as alturas de onda e as velocidades orbitais das ondas no fundo calculadas para o período de onda referido.

Hs (m)	0.12	0.23	0.35	0.47	0.58	0.7	0.82	0.93	1.05	1.17	2.0
Uw (m/s)	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0	1.2	1.4	1.6	1.8	2.0	3.43

Tabela 1 – Correspondência entre as alturas de onda e as velocidades orbitais no fundo.

As ondas afectam o transporte, principalmente, através da mobilização dos sedimentos por acção do escoamento oscilatório. Deste modo, quanto maior a altura da onda, maior o fluxo de sedimentos (Camenen *et al*, 2001). Isto é verificado nos três casos, em particular para a situação $d = 0.21\text{mm}$, onde se observa que todas as fórmulas, bem como os dados, descrevem um aumento do transporte com o aumento da altura de onda, divergindo porém, rapidamente, para ondas de altura superior a 0.6m. A fórmula de Van Rijn parece mostrar o melhor ajuste, mas seria necessário mais dados para uma apreciação mais conclusiva.

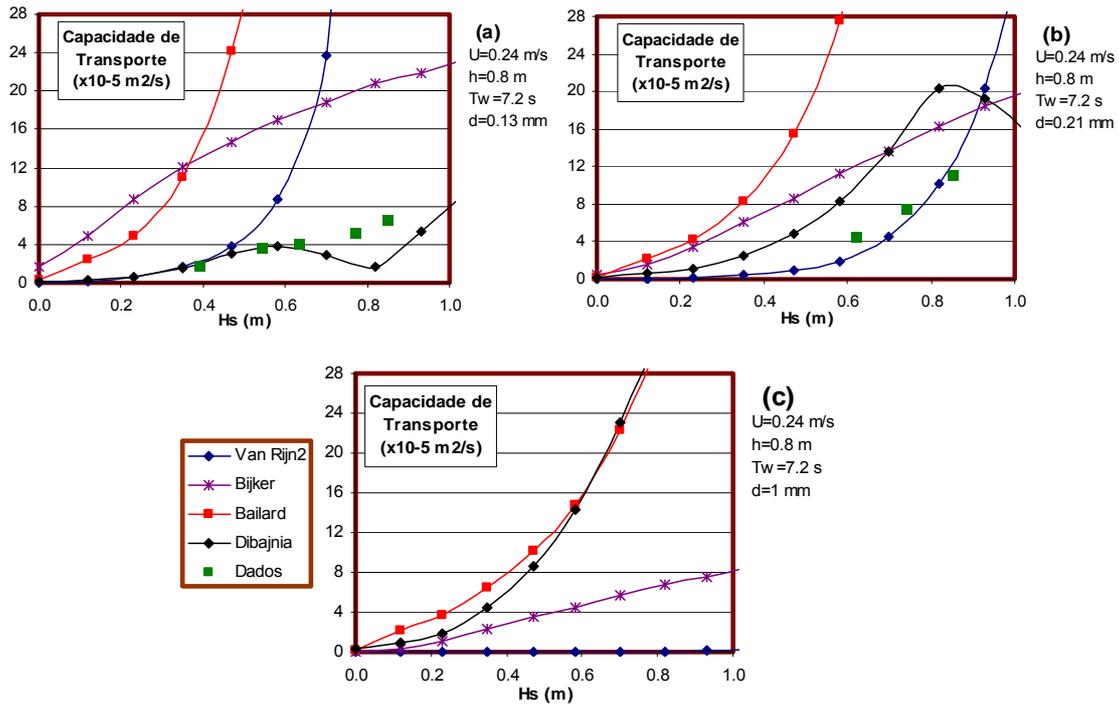


Gráfico 2 - Influência da altura de onda na taxa de transporte para três diâmetros de grão diferentes, e mantendo a velocidade da corrente constante.

Os dados experimentais presentes nos gráficos (Camenen *et al*, 2003) indicam um fluxo de sedimentos para $d = 0.13\text{mm}$ inferior ao fluxo para $d = 0.21\text{mm}$, com $U = 0.24\text{m/s}$ e valores de U_w superiores a $1.0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (Camenen *et al*, 2001). Este fenómeno indica claramente a presença de efeitos de *phase-lag*, o que é corroborado pelo facto da fórmula de Dibajnia, única que inclui estes efeitos na formulação, apresentar um ajuste de excelente qualidade às medidas para $d = 0.13\text{mm}$. As restantes fórmulas sobrestimam a taxa de transporte. É de notar porém, que a formulação de Dibajnia parece exagerar os efeitos de *phase-lag* como se pode observar no Gráfico 1. Novamente se verifica que as fórmulas divergem significativamente para $H_s > 0.6\text{m}$.

Efectuou-se previsões para a situação com $d = 1.0\text{mm}$, apesar não existirem dados para comparação, pois considera-se de interesse analisar a variabilidade entre as fórmulas para sedimentos de grandes diâmetros. Constatam-se diferenças enormes entre os resultados a partir de ondas pequenas ($H_s = 0.6\text{m}$). A fórmula de Van Rijn fornece fluxos nulos para ondas inferiores a 0.90m . A fórmula de Bijker mantém o comportamento aproximadamente linear presente nos casos anteriores. Por fim, as fórmulas de Dibajnia e de Bailard convergem para resultados muito próximos e de comportamento marcadamente exponencial.

Corrente estacionária

Nesta secção estudou-se o efeito da variação da velocidade da corrente para três diâmetros diferentes combinados com duas situações de onda. A gama de velocidades oscila entre a ausência de correntes e $U = 2.0 \text{ m/s}$.

A velocidade da corrente é um dos principais parâmetros no transporte de sedimentos. Os primeiros estudos dedicados ao transporte remontam a várias décadas atrás (Du Boys, 1879; Einstein, 1950), e foram desenvolvidos para o transporte em rios, onde a velocidade média do escoamento assume um papel preponderante. Estes autores propuseram formulações fortemente dependentes do parâmetro de Shields devido à corrente. Até a actualidade muitos

trabalhos de investigação foram desenvolvidos para o caso fluvial, e contudo as previsões da taxa de transporte continuam a apresentar uma forte dispersão (Camenen *et al*, 2001).

As últimas considerações podem ser comprovadas pela análise do Gráfico 3b, que corresponde ao caso sem ondas. As fórmulas revelam um aumento rápido do transporte para com o aumento da corrente, constatando-se que para valores desta superiores a 1.0m/s as previsões podem diferir até uma ordem de grandeza. A expressão de Bailard apresenta o melhor ajuste aos dados disponíveis. Para os outros dois casos, Gráficos 3a e 3c, a dispersão nos resultados é consideravelmente maior.

Relativamente a influência da corrente, Al Salem (1993) sugere que o fluxo de sedimentos é proporcional à potência de três do momento da velocidade ($q_s = a.U^3$)

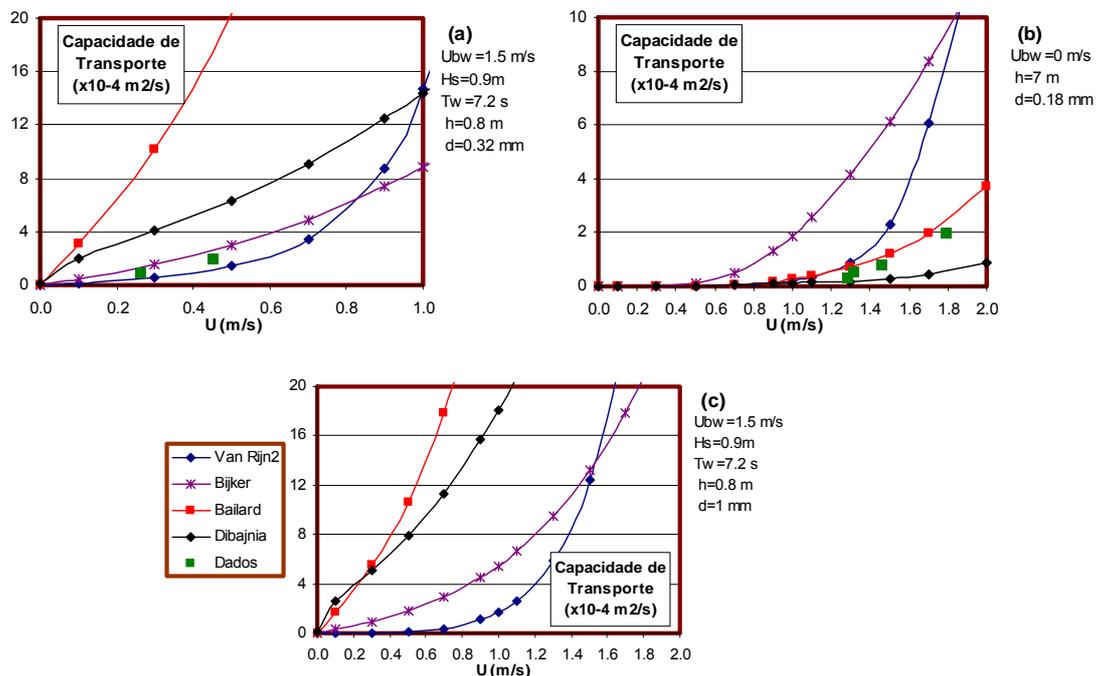


Gráfico 3 - Influência da velocidade da corrente na taxa de transporte para três diâmetros de grão diferentes, para duas situações de onda.

2.4 Conclusões parciais.

A análise efectuada para os diâmetros, permite compreender de que forma o transporte de sedimentos responde à variação dos diâmetros das areias. Conclui-se que todas as fórmulas são muito sensíveis na gama de diâmetros entre 0.06 e 0.5mm, mas que para tamanhos maiores o transporte é aproximadamente independente deste parâmetro. Os dados disponíveis são relativos ao primeiro intervalo referido, e permitem para cada caso estudado perceber qual a fórmula com melhor ajuste, visto que nenhuma sobressai em qualidade para todos os casos analisados. Na segunda gama de diâmetros, perante a ausência de dados comparativos nada se pode concluir relativamente à qualidade das fórmulas, todavia refira-se que a expressão de Van Rijn é a única que considera fluxo de sedimentos nulo para um determinado valor crítico de diâmetro, como referido anteriormente.

Pode-se ainda concluir, que para situações em que as ondas prevalecem sobre a corrente e os sedimentos são facilmente colocados em suspensão (diâmetros pequenos), a fórmula de Dabajnia é a mais aconselhada por considerar os efeitos de *phase-lag*, que lhe permitem

modelar melhor o transporte. Em termos gerais nenhuma das fórmulas se destaca marcadamente, sendo necessário recorrer aos vários casos para perceber qual a expressão melhor ajustada.

Relativamente à acção das ondas no transporte constata-se uma dispersão nas previsões superior à registada para os diâmetros. Tal dever-se-á provavelmente aos diferentes modos que cada fórmula utiliza para introduzir aquele factor no transporte, fruto de diferentes abordagens e fases de desenvolvimento do problema. Na análise realizada destacam-se, em qualidade de ajuste aos dados, as expressões de Van Rijn e de Dibajnia. Repare-se que uma formulação mais complexa e descritiva do fenómeno das ondas não implica necessariamente melhores previsões do transporte, como pode-se constatar pelo facto da fórmula de Van Rijn apresentar óptimos ajustes e a fórmula de Bijker responder satisfatoriamente.

Novamente a expressão de Dibajnia ajusta-se com elevada qualidade em situações onde os efeitos de *phase-lag* parecem ter importância.

De modo geral, a previsão de Bailard expressa taxas de transporte superiores às outras previsões e aos dados e as fórmulas de Van Rijn e Dibajnia prevêem razoavelmente o transporte. Todavia nenhuma das fórmulas se destaca significativamente em termos de ajuste aos dados. O estudo comparativo de Bayram *et al* (2001) conclui que a fórmula de Van Rijn apresenta globalmente a melhor qualidade e a de Camenen *et al* (2003) destaca a de Dibajnia.

Para além das conclusões gerais, que se possam retirar sobre a qualidade das fórmulas a partir da análise dos gráficos, a grande mais valia deste estudo reside em possibilitar a escolha da melhor fórmula para determinada aplicação concreta. Em termos ilustrativos, se necessito prever taxas de transporte numa praia com diâmetros médios de cerca de 1mm, não devo usar a fórmula Van Rijn pouco sensível nesta gama, nem a de Dibajnia que estima um aumento suave do transporte com o diâmetro.

Por fim, numa perspectiva centrada em melhorar as parametrizações do transporte, deveria-se desenvolver a descrição não-linear das ondas, fenómeno de importância nos sistemas costeiros. Neste sentido revelam-se úteis os perfis de segunda ordem da velocidade da onda, bem como a teoria cnoidal. Por outro lado a rugosidade no fundo aparenta ser um parâmetro importante no transporte, especialmente no transporte no fundo, e portanto a implementação de uma rotina para o seu cálculo em substituição da definição como valor constante poderia revelar-se proveitosa na previsão do transporte.

3. Modelação do Transporte de Sedimentos

Os modelos hidromorfológicos agrupam-se em diferentes tipos, que surgem genericamente de duas conceptualizações distintas: modelos empíricos, onde se estabelecem relações empíricas entre a geometria da costa e parâmetros físicos; e modelos dinâmicos que se baseiam em formulações matemáticas dos processos físicos mais relevantes. Os últimos poderão ser modelos da linha de costa, para uma descrição a larga escala do comportamento longitudinal; modelos do perfil de praia, que simulam o transporte transversal à costa; ou modelos de área costeira, onde ambas as dimensões horizontais estão presentes (Winter, 2004). O presente capítulo descreve um sistema de modelos com a tipologia referida em último lugar, que é geralmente a usada para as escalas de tempo e espaço da engenharia.

Este sistema está vocacionado para o estudo do trânsito sedimentar e têm vindo a ser desenvolvido conjuntamente pela MARETEC e HIDROMOD na sequência de diversas aplicações em zonas costeiras e embocaduras de estuários.

O sistema combina, mediante um processo iterativo e assumindo condições quasi-estacionárias, um modelo de ondas (STWAVE) e um modelo de circulação hidrodinâmica (MOHID) acoplado a um sub-modelo de transporte de sedimentos não-coesivos (módulo SAND), permitindo determinar os campos de correntes associados à acção conjunta da agitação e correntes locais e prever a evolução da batimetria e suas implicações sobre a circulação. O pressuposto de quasi-estacionariedade é um importante aspecto na modelação numérica hidromorfológica pois permite que se efectue a separação dos processos em módulos diferentes computados sequencialmente, assumindo-se que as escalas típicas das ondas, das marés e da morfologia são significativamente diferentes (Winter, 2004).

Na figura 1 estão esquematizados os fluxos de informação resultantes do procedimento iterativo entre os modelos e indicados os dados de entrada a fornecer pelo utilizador.

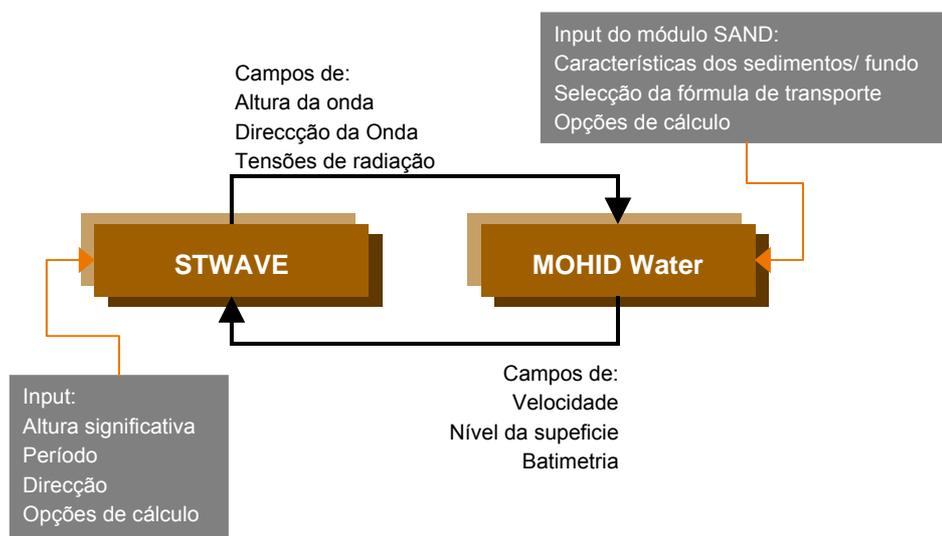


Figura 1 – Procedimento iterativo entre o MOHID Water e o modelo de ondas, STWAVE.

Recorreu-se, como referido, para a simulação da circulação e do transporte ao sistema integrado de modelos matemáticos, MOHID, desenvolvido pelo centro de investigação MARETEC. Este sistema tem por base um modelo hidrodinâmico, descrito no Anexo I, que de

modo genérico resolve as equações que descrevem os processos hidrodinâmicos e de transporte relevantes, sobre uma malha de cálculo que discretiza o domínio de interesse e para um determinado intervalo de tempo e passo de cálculo (Δt). O forçamento é imposto por condições específicas definidas nas fronteiras abertas do modelo.

O MOHID está implementado em FORTRAN 95 seguindo uma filosofia de programação orientada por objectos. Esta abordagem permite a adição fácil de novos módulos, simplificando assim a introdução de novos processos. O campo de aplicações do modelo inclui a simulação da hidrodinâmica, de processos de transporte, da dinâmica de sedimentos e estudos de qualidade de água em vários estuários e sistemas costeiros. Uma descrição pormenorizada da estrutura e do desenvolvimento do modelo pode ser consultada em Leitão (2002). Nas secções 3.2 e 3.3 procede-se à descrição do sub-modelo de transporte de areias (módulo SAND) e do modelo de ondas (STWAVE), respectivamente.

A verificação do sistema é realizada simulando casos esquemáticos ideais com solução conhecida da engenharia costeira. A capacidade do sistema para lidar com casos reais é ilustrada através da sua aplicação ao sistema costeiro da Lagoa de Óbidos. Deste modo, os resultados obtidos são relativos à fase de verificação e o sistema de modelos deverá posteriormente ser validado com dados de campo.

A calibração e validação do sistema de modelos, bem como a análise das dinâmicas morfológicas em sistemas costeiros, deve estar apoiada em dados de campo adequados. Os dados para a calibração deverão pelo menos incluir as características dos sedimentos – à superfície e em profundidade – e fluxos em condições típicas e extremas. A validação deverá ser feita recorrendo a evoluções temporais da batimetria. Na ausência deste último conjunto de dados os resultados do modelo deverão ser utilizados em termos apenas qualitativos.

3.1 Condições Fronteira

A utilização de um modelo matemático requer que sejam conferidas condições fronteira apropriadas. A simulação do transporte de areias no MOHID necessita que se definam condições fronteira que controlem a circulação hidrodinâmica e a evolução dos fundos. Estas classificam-se em fronteiras verticais ou horizontais e em abertas ou fechadas, e correspondem fisicamente à superfície livre da massa de água, aos fundos arenosos e às fronteiras laterais que contactam com o mar ou com terra (Leitão, 2002).

Em relação às fronteiras verticais, considerou-se que os fluxos de massa (sedimentos e água) e de quantidade de movimento (vento) na superfície livre são nulos, o que torna esta fronteira fechada. A fronteira inferior, os fundos, deixam de ser uma fronteira fechada, e passaram a estar sujeitos a alterações na coordenada vertical (batimetria) controladas pelo sub-modelo de transporte de areias integrado no MOHID, Módulo SAND, descrito na secção seguinte.

As fronteiras horizontais fechadas podem dividir-se em fixas ou móveis, sendo as primeiras usadas na definição da fronteira lateral com terra e as segundas utilizadas na definição das zonas intertidais, sujeitas a fenómenos de cobertura e descobertura periódicos. De todos os tipos de fronteira a que levanta maiores desafios é a fronteira horizontal aberta, que conecta o modelo com outras massa de água. A experiência acumulada tem mostrado que não existe uma solução universal e que em cada caso é necessário testar diferentes soluções. Para a simulação em praias artificiais, optou-se por utilizar a condição de fronteira cíclica segundo a direcção paralela à linha de praia. Esta condição impõe continuidade entre as fronteiras opostas segundo a direcção referida, supondo portanto um domínio infinito na direcção longitudinal à praia. Para a simulação do sistema costeiro da Lagoa de Óbidos, utilizou-se a condição radiativa híbrida de Flather, que corresponde a radiar a solução na fronteira relativamente a uma solução exterior (Leitão, 2002).

3.2 O modelo de transporte de areias - Módulo SAND.

O módulo de transporte de areias, *SAND*, é constituído por um conjunto de rotinas que permitem determinar a evolução dos fundos em estuários e zonas costeiras sujeitas à acção singular de ondas ou correntes ou à acção combinada de ambas, utilizando uma abordagem euleriana.

Para uma dada batimetria, tipo de sedimentos, campos de correntes e ondas este módulo calcula a capacidade de transporte sobre uma malha ortogonal que cubra a zona de interesse. As taxas de erosão/deposição em cada ponto da malha são então estimadas, permitindo obter ainda os valores integrais dos volumes de erosão e deposição e a consequente evolução dos fundos.

As correntes podem ser induzidas pelas marés, pelas ondas ou vento, bem como pela acção combinada de todos os factores. Assume-se que os sedimentos são não-coesivos (areias), podendo considerar-se diferentes diâmetros sobre a área do modelo. A restrição principal do módulo reside na definição do diâmetro enquanto propriedade da célula. Assim, quando uma partícula se move para uma célula adjacente o seu diâmetro passa a ser aquele definido para essa célula. Este constrangimento pode ser superado se em substituição de um diâmetro, for considerada uma curva granulométrica para cada célula.

O módulo está concebido de modo a funcionar como uma rotina do modelo hidrodinâmico – MOHID Water e encontra-se intrincado na estrutura deste como se pode observar na figura seguinte (Figura 2). O ficheiro de entrada introduz as características dos sedimentos e a espessura da camada de areia entre o fundo e a rocha.

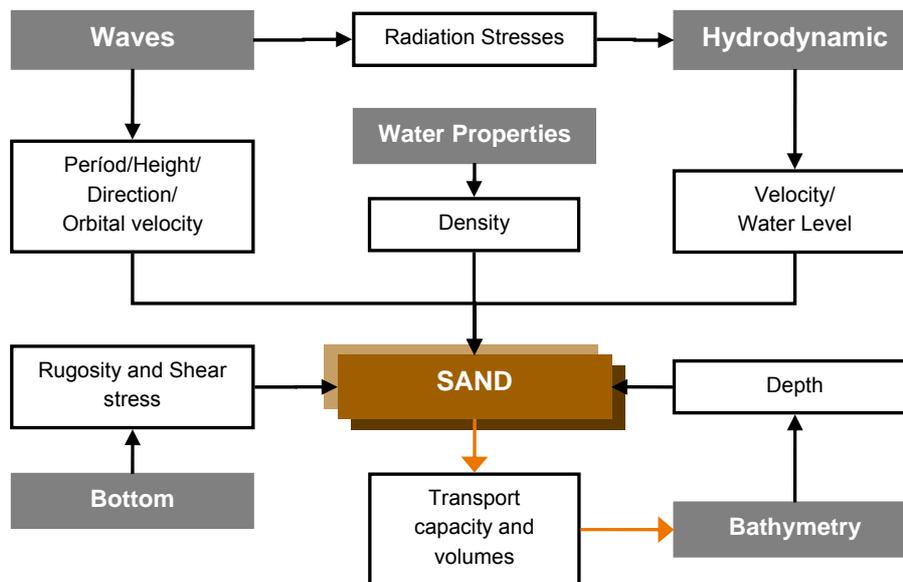


Figura 2 – Fluxo de informação entre o módulo Sand e outros módulos.

Para o cálculo da capacidade de transporte foram codificadas rotinas alternativas que permitem ao utilizador escolher entre diferentes fórmulas preditivas do transporte. Numa fase prévia a este trabalho, o módulo SAND, dispunha de três fórmulas alternativas para o cálculo do transporte de areias descritas no Anexo II: duas expressões para o caso de transporte forçado unicamente por correntes, Meyer-Peter & Muller (1948) e Ackers-White (1973); e uma expressão para situações com forçamento derivado da acção combinada de ondas e correntes, Van Rijn (1984,1993).

Neste trabalho, procedeu-se à implementação de novas fórmulas partindo da análise efectuada no capítulo 2: fórmula de Bailard (1981,1984), de Dibajnia-Watanabe (1992,1995), de Bijker-Battchraya (1968;###) e uma nova rotina para a expressão de Van Rijn (1984,1993). Todas estas são expressões desenvolvidas para ambientes costeiros onde portanto a dinâmica de transporte é controlada por ondas e correntes. Por conseguinte, o módulo passa a dispor de cinco expressões vocacionadas para ambientes costeiros e outras duas para ambientes fluviais e estuarinos.

A evolução da profundidade em cada ponto da malha é descrita pela equação da continuidade, resolvida através de um algoritmo de diferenças finitas,

$$\frac{\partial z}{\partial t} + \frac{\partial T_x}{\partial x} + \frac{\partial T_y}{\partial y} = 0 \quad \text{Eq. 46.}$$

onde:

- x, y - coordenadas horizontais;
- z - profundidade;
- T_x - transporte na direcção x ;
- T_y - transporte na direcção y .

3.3 O modelo de ondas – STWAVE.

Para obter o forçamento devido às ondas, recorreu-se à versão 3.0 do modelo STWAVE (*steady-state spectral wave model*), desenvolvido pelo *Coastal and Hydraulics Laboratory (US Army Corps of Engineers, 2001)*, que consiste num modelo de estado estacionário baseado na equação de balanço da acção da onda, implementado numa abordagem de diferenças finitas. O modelo foi disponibilizado pelo Eng.º Adélio Silva (HIDROMOD).

A utilização de um modelo que transforma a ondas junto à costa, tem por objectivo a descrição quantitativa das alterações que se verificam nos parâmetros da onda e fornecer a modelos externos de circulação o forçamento devido às ondas. De modo geral verifica-se que na zona de rebentação, as correntes devido às ondas constituem o forçamento predominante no transporte de sedimentos. Em águas profundas o campo das ondas é sensivelmente homogéneo à escala de quilómetros, porém junto à costa as ondas são fortemente influenciadas por variações na batimetria, no nível da água e nas correntes, o que origina variações significativas nos parâmetros à escala das dezenas de metros. Este modelo está portanto vocacionado principalmente para a propagação e crescimento de ondas em ambientes costeiros.

O modelo matemático, que encontra-se descrito no Anexo III, apresenta um conjunto de pressupostos que podem ser sintetizados nos seguintes pontos:

- o declive dos fundos é suave e por conseguinte a reflexão da onda é desprezável;
- os parâmetros da onda são homogéneos em toda a fronteira de mar;
- as ondas, correntes e ventos considerados no modelo atingiram o estado estacionário;
- a onda não apresenta assimetrias;
- as são correntes uniformes na coluna de água;
- o efeito do atrito do fundo na dissipação da energia da onda é desprezável.
- a tensão de radiação é calculada com base na teoria linear da ondas.

3.3.1 Utilização do modelo

O STWAVE opera numa malha quadrangular e num referencial local com o eixo dos xx orientado na direcção transversal à linha da praia. A orientação deste eixo (± 87.5 graus) define o semi-plano que é representado no modelo. O eixo do yy deverá ser alinhado sensivelmente na direcção dos contornos da batimetria (Ilustração 3).

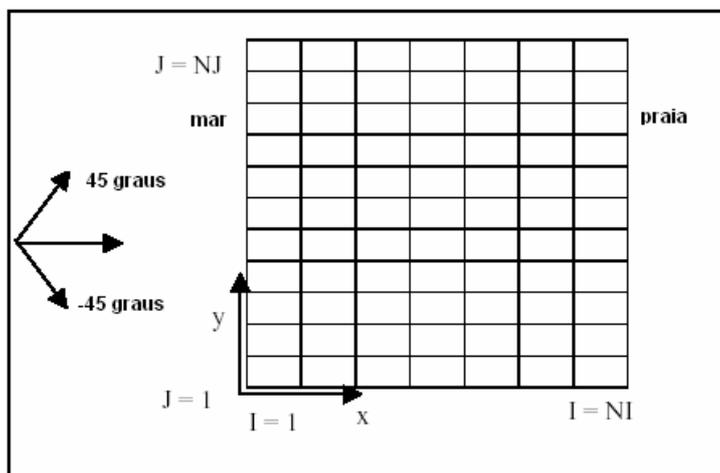


Ilustração 3 – Esquema da malha no STWAVE.

Os dados de entrada do modelo são as características da onda na fronteira, a batimetria dos fundos, e opcionalmente campos de correntes e características do escoamento eólico. A simulação da propagação da ondulação no domínio gera os campos que descrevem a altura significativa da onda, a direcção da onda e os gradientes da tensão de radiação nas duas componentes horizontais em todo o domínio. Esta informação constitui os dados de entrada no MOHID relativos ao forçamento das ondas. A Figura 3 esquematiza os fluxos de informação à entrada e saída do STWAVE.

Os resultados obtidos em cada simulação podem ser armazenados na forma de ficheiros ASCII (ficheiros de texto), ou alternativamente na forma matricial, em ficheiros HDF (*Hierarchical Data Format*) em que os valores de uma propriedade correspondentes a um determinado instante para todo o domínio podem ser representados graficamente em campos de vectores (e.g. tensões de radiação), em isolinhas ou mediante gradações de cores (e.g. altura da onda).

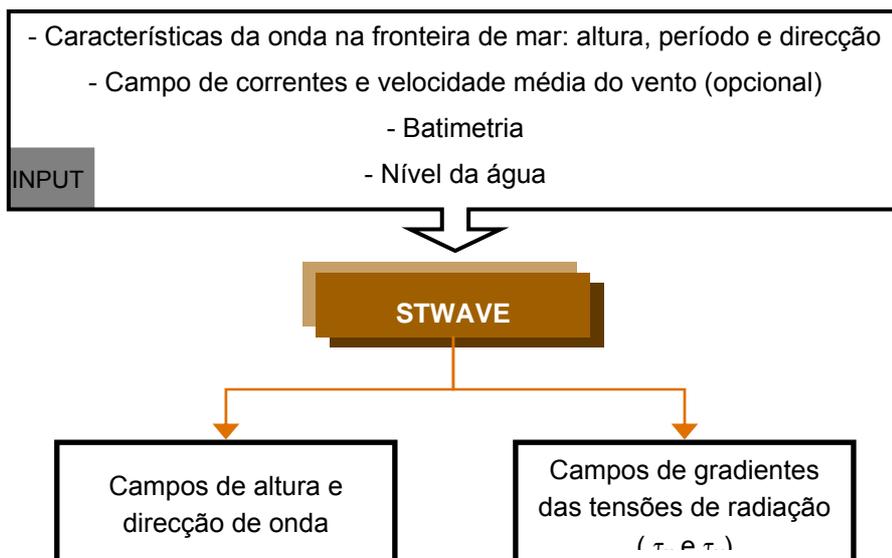


Figura 3 – Fluxo informativo à entrada e saída do STWAVE.

3.3.2 Implementação do cálculo dos espectros da onda no STWAVE

O espectro da onda incidente, especificado como a densidade energética função da frequência e direcção, é introduzido na versão 3.0 do STWAVE através do ficheiro entrada dos parâmetros no modelo. Para tal é necessário gerar previamente o espectro que caracteriza a onda em estudo, mediante rotinas desenvolvidas para o efeito e codificadas no executável *GeraSpectrum.exe* disponibilizado pela Hidromod. No sentido de simplificar o procedimento de utilização do modelo de ondas, introduziu-se o código do *GeraSpectrum* no STWAVE. Deste modo simplificou-se ficheiro *input* do STWAVE e reduziu-se o número passos no procedimento de utilização do modelo.

3.4 Resultados.

Numa perspectiva de verificação do funcionamento do modelo, em particular das fórmulas de transporte introduzidas, agora numa perspectiva hidromorfológica, realizaram-se algumas aplicações simples. Deste modo, os resultados obtidos são relativos à fase de verificação e devem ser validados com dados de campo.

Em primeiro lugar simulou-se o transporte de sedimentos numa praia ideal linear, sem obstáculos, utilizando as cinco formulações que consideram o efeito combinado de ondas e marés. Estas aplicações permitiram, novamente, um estudo comparativo das fórmulas de transporte relativo aos perfis transversais de transporte e de modificação dos fundos, ao transporte longitudinal total e aos custos de cálculo de cada rotina. Em seguida realizaram-se simulações em duas praias ideais lineares com obstáculos: transversal e longitudinal à linha de costa. Pretende-se nestes casos ilustrar comportamentos típicos do escoamento e da evolução da morfologia dos fundos. Por último simulou-se o sistema costeiro da Lagoa de Óbidos, que permite observar o modelo em funcionamento num domínio maior e num ambiente costeiro real, naturalmente mais complexo.

Refira-se que uma praia artificial pode atingir uma morfologia de equilíbrio se, por exemplo, num tanque de ondas em laboratório, a altura e o período de onda forem mantidos constantes, porém numa praia natural, a variabilidade das características das ondas e marés dá origem a um equilíbrio ilusório para o qual a praia tende, sem nunca contudo alcançar. Desta forma, a melhor maneira de compreender as alterações na morfologia das praias é através de uma

abordagem de quasi-equilíbrio e da forma como este é determinado pelas ondas, marés e sedimentos. Assim, um conhecimento profundo da praia está dependente do conhecimento dos processos de transporte e da capacidade para modelar as alterações na morfologia através desse conhecimento. (Komar, 1998).

3.4.1 Comparação de perfis transversais.

Procura-se neste ponto comparar os perfis de capacidade de transporte e os perfis de alteração dos fundos numa secção transversal à praia. Os primeiros indicam a distribuição do transporte transversalmente e os segundos informam sobre a distribuição das zonas de deposição e erosão. Obtiveram-se perfis para cada uma das cinco fórmulas em estudo. Recorre-se também aos resultados de transporte longitudinal total para melhor compreender a qualidade das várias previsões. Os resultados obtidos referem-se a duas situações de escoamento e sedimentos com as características expressas na tabela 2, sobre uma batimetria artificial em plano inclinado com declive cerca de 8%. Utilizou-se uma fronteira cíclica segundo a direcção longitudinal.

Tabela 2 – Características do dois casos de estudo.

	Caso 1	Caso 2
Hs (onda)	3.5 m	1.5 m
Direcção (onda)	60° com a normal à praia	60° com a normal à praia
Maré	sem maré	com maré
D₅₀	2.0 mm	0.13mm
Período simulado	10 dias	1 dia

Caso 1

Na Figura 4, observa-se o campo de velocidades relativo a este caso, originado pelo forçamento referido atrás, sobre um fundo colorido que expressa a propagação da altura significativa de onda no domínio. Verifica-se o empolamento da onda à medida que a profundidade reduz-se gradualmente, até atingir uma altura máxima e iniciar a rebentação. Nesta zona ocorrem as velocidades maiores, com valores aproximados de 2.0 m/s.

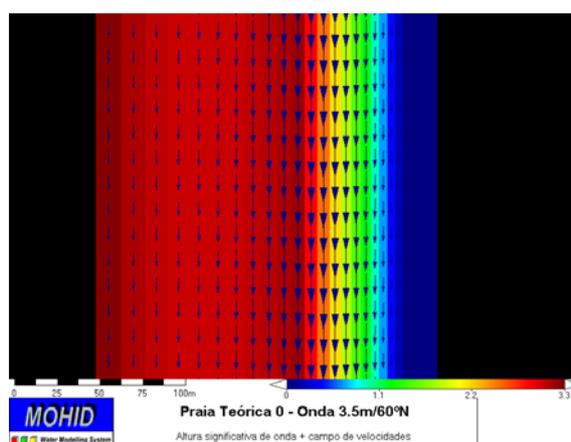


Figura 4 - Campo de velocidades (vectores) sobre altura significativa de onda para o Caso 1.

Os perfis da capacidade de transporte apresentam um comportamento semelhante entre todas as fórmulas, à excepção de Dibajnia (Gráfico 4), com o transporte de areias ocorrendo essencialmente numa faixa de 50 metros, que tem como eixo a linha de rebentação. Não obstante, também Dibajnia prevê capacidades de transporte máximas na zona de rebentação. Os integrais destes perfis fornecem volumes totais de transporte longitudinal que podem ser

contrastados com os resultados da fórmula CERC (1984) e da fórmula proposta por Kamphuis (1986). Estas são expressões algébricas simples e de uso comum, que permitem obter resultados indicativos da ordem de grandeza esperada (Anexo IV). Como se pode observar na tabela seguinte, a variabilidade nos volumes de transporte calculados é pequena, sempre inferior a uma ordem de grandeza.

Tabela 3 – Volumes totais de transporte longitudinal para o Caso 1.

Volumes Totais (dm ³ /s)	Van Rijn1	Van Rijn2	Bijker	Bailard	Dibajnia	CERC	Kamphuis
	65	23	57	64	136	73	14

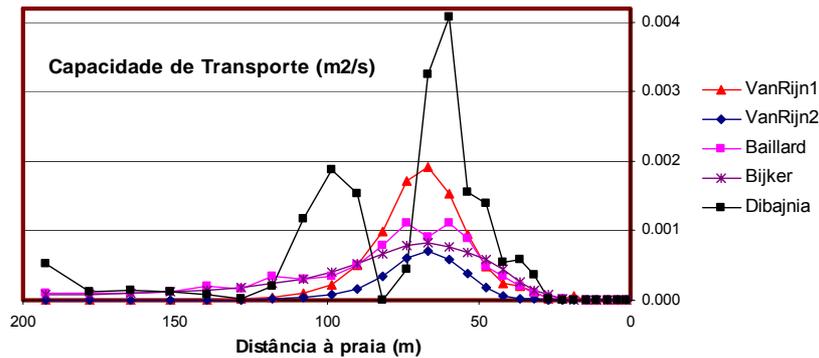


Gráfico 4 - Perfil da capacidade de transporte para o Caso 1.

Apesar da relativa concordância presente nos resultados anteriores, a análise global dos resultados obtidos para este caso, mostra uma clara distinção entre a resposta das fórmulas de Van Rijn e Bijker e a resposta das fórmulas de Bailard e Dibajnia. Assim, a análise da evolução acumulada do fundo, nos Gráficos 5 e 6, bem como a análise destes resultados em todo o domínio (Figura 5), revelam que as previsões de Bailard e Dibajnia diferem significativamente das restantes. A alteração dos fundos provocada por aquelas é muito mais acentuada, na ordem de um factor 10, e aparentam desenhar um perfil ondulatório, onde zonas de deposição alternam com zonas de erosão (Gráfico 5 e 6). Por outro lado os resultados para todo o domínio não estabilizam tanto espacial como temporalmente o que indica que diferentes secções apresentarão também diferentes perfis e portanto diferentes volume de transporte longitudinal.

As duas expressões de Van Rijn e a de Bijker mostram uma morfologia dos fundos simétrica em que a erosão ocorre numa faixa correspondente à rebentação, às velocidades e capacidades de transporte máximas. A areia é depositada em duas faixas adjacentes, sendo em maior quantidade na faixa mais perto da praia.

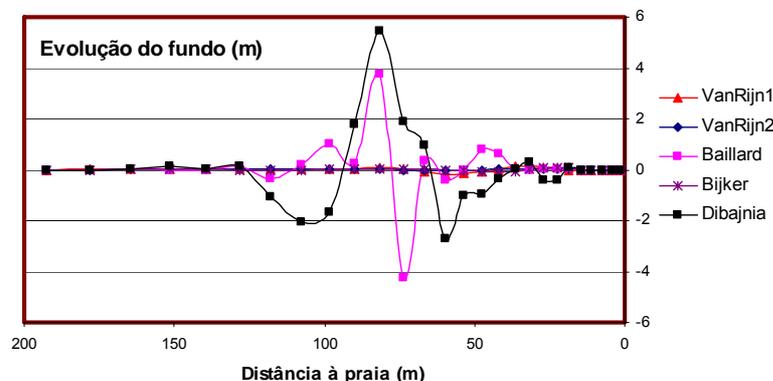


Gráfico 5 – Perfil da evolução do fundo (deposição/erosão) para o Caso 1.

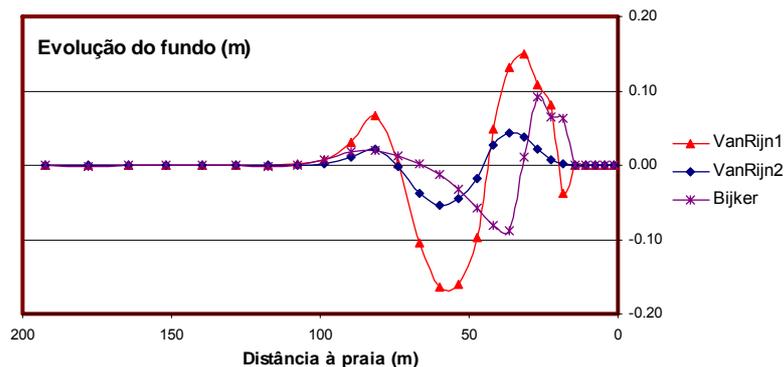


Gráfico 6 – Perfil da evolução do fundo (deposição/erosão) para o Caso 1.

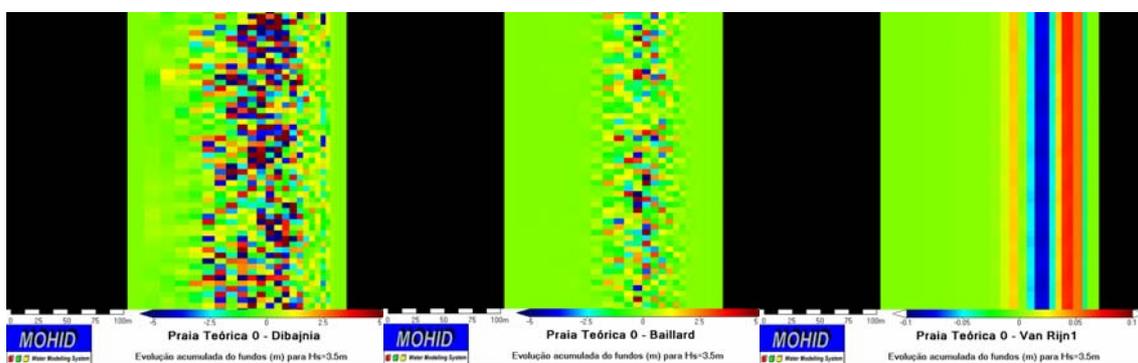


Figura 5 – Zonas de deposição/erosão prevista por Dibajnia, Bailard e Van Rijn1.

Caso 2

Na Figura 6, encontra-se representado o campo de velocidades relativo a este caso de estudo. Ao contrário da situação anterior as velocidades são sensivelmente iguais em todo o domínio, e cerca de duas ordens de grandeza inferiores, com valores máximos cerca de 2.5 cm/s. O empolamento e rebentação da onda ocorre agora mais perto da praia, para profundidades menores, visto a altura de onda ser menor.

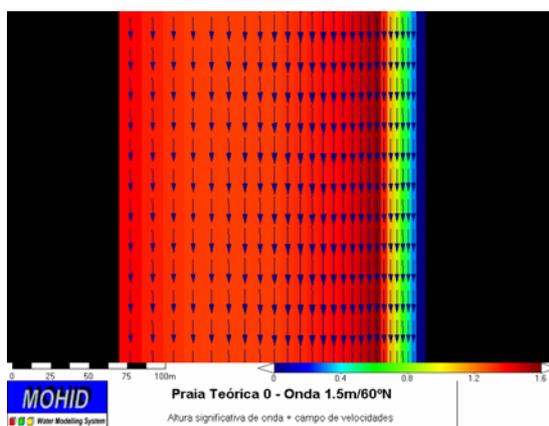


Figura 6 - Campo de velocidades (vectors) sobre altura significativa de onda para o Caso 2.

Em relação a esta situação de escoamento e sedimentos, obteve-se três tipos de resposta por parte das fórmulas preditivas. As duas expressões de Van Rijn calculam taxas de transporte da ordem de $1 \times 10^{-13} \text{ m}^2/\text{s}$, prevendo portanto transporte nulo de areias como também se pode observar pelos resultados apresentados de seguida. Apesar da ausência de dados que

informem estas previsões, pode-se considerar o referido resultado como descabido tendo em conta as condições de escoamento e de sedimentos. Os resultados de Dibajnia e de Bailard são muito semelhantes entre si, tanto no que respeita aos valores totais de transporte como aos perfis desenhados, e novamente determinam um comportamento oscilatório para o transporte ao longo da secção transversal. Os volumes totais são inferiores à formula de CERC, Kamphuis e Bijker numa ordem de grandeza. Repare-se que para este caso as previsões de volumes totais transportados diferem muito entre si. Por último, Bijker parece responder satisfatoriamente às condições de escoamento impostas, calculando taxas de transporte muito superiores às restantes formulações, porém na ordem de grandeza das taxas de CERC e Kamphuis

Comparando com o caso anterior, observa-se que os picos de transporte máximos estão deslocados no sentido da praia acompanhando a translação da linha de rebentação, agora situada por volta dos 30m de distância à linha de praia. Veja-se ainda, que as taxas de transporte obtidas são inferiores às taxas do Caso 1, fruto dum escoamento menos energético. A evolução do fundo reflecte esta situação adicionada ao facto de o período de simulação ser inferior.

Na figura 7 está presente a transformação dos fundos produzida em todo o domínio, onde está patente, em comparação com a situação anterior, uma maior uniformidade espacial dos resultados de Dibajnia e de Bailard, bem como o desenho ondulatório dos fundos.

Tabela 4 - Volumes totais de transporte longitudinal para o Caso 2.

Volumes Totais (dm ³ /s)	Van Rijn1	Van Rijn2	Bijker	Bailard	Dibajnia	CERC	Kamphuis
	≅ 0	≅ 0	5.7	0.4	0.4	8.3	12

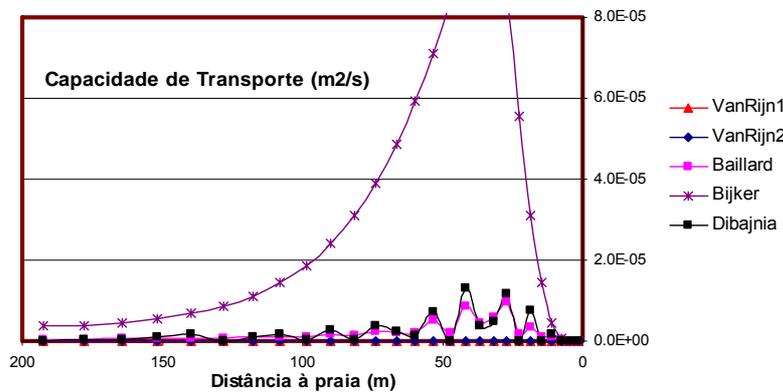


Gráfico 7 - Perfil da capacidade de transporte para o Caso 2

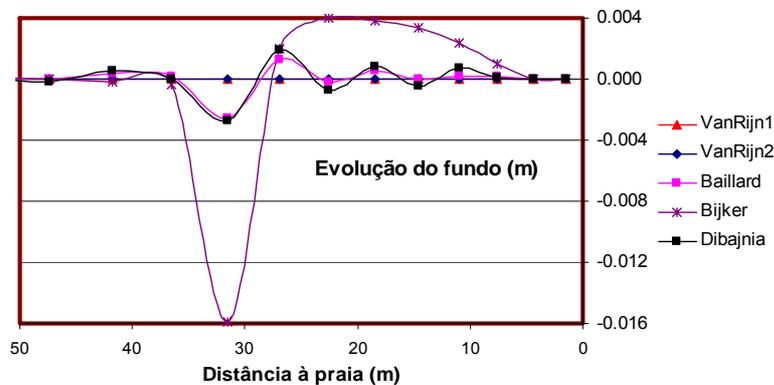


Gráfico 8 – Perfil da evolução do fundo (deposição/erosão) para o Caso 2.

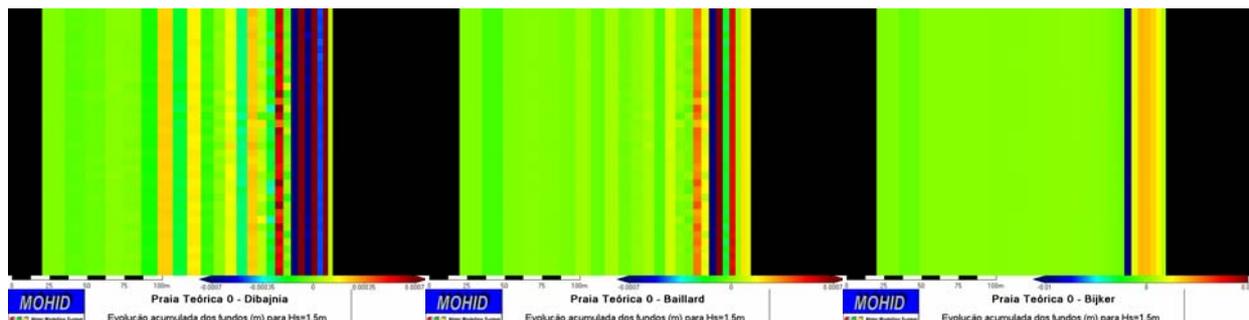


Figura 7 - Zonas de deposição/erosão prevista por Dibajnia, Bailard e Van Rijn1

Comparação de tempos de cálculo.

Na modelação numérica de fenómenos naturais complexos, o tempo de cálculo requerido pelas simulações é um factor de viabilidade deste tipo de ferramentas. Deste modo, deve-se de forma permanente procurar compromissos entre o grau de simplificação da realidade e o consumo de tempo para a simular. Neste sentido, efectuou-se uma comparação entre os tempos de cálculo característicos das rotinas que implementam as fórmulas de transporte.

Na tabela seguinte apresentam-se os tempos consumidos por cada rotina normalizados. Facilmente se conclui, que o maior rigor introduzido pelo cálculo numérico integral do transporte em suspensão pela fórmula Van Rijn2, é dispensável tendo em conta o elevado custo da sua computação. As restantes fórmulas apresentam tempos relativamente semelhantes e portanto não se colocam restrições desta ordem à sua utilização.

Tempos de cálculo (s/s)	Van Rijn1	Van Rijn2	Bijker	Bailard	Dibajnia
	1.4	36.1	1.0.7	1.8	3.5

Tabela 5 – Tempos normalizados de cálculo gastos por cada rotina.

3.4.2 Praias com obstáculos.

Nesta secção pretendeu-se desenvolver duas aplicações, que permitissem expor fenómenos típicos de evolução da morfologia dos fundos arenosos perante obstáculos ideais semelhantes a obras marítimas usuais na paisagem costeira, quebra-mar e esporão.

Obstáculo Longitudinal

Nas figuras seguintes mostra-se o campo de tensões de radiação e a propagação da altura da onda geradas no modelo STWAVE para uma onda com $H_s = 3.5m$ na fronteira de mar e com direcção perpendicular à praia (0°). Nesta situação ideal a onda desloca-se paralelamente à praia e sofre difracção nas extremidades do pontão, que a redirecciona gradualmente para a zona protegida por este. O linha de rebentação é sensivelmente colinear com o obstáculo.

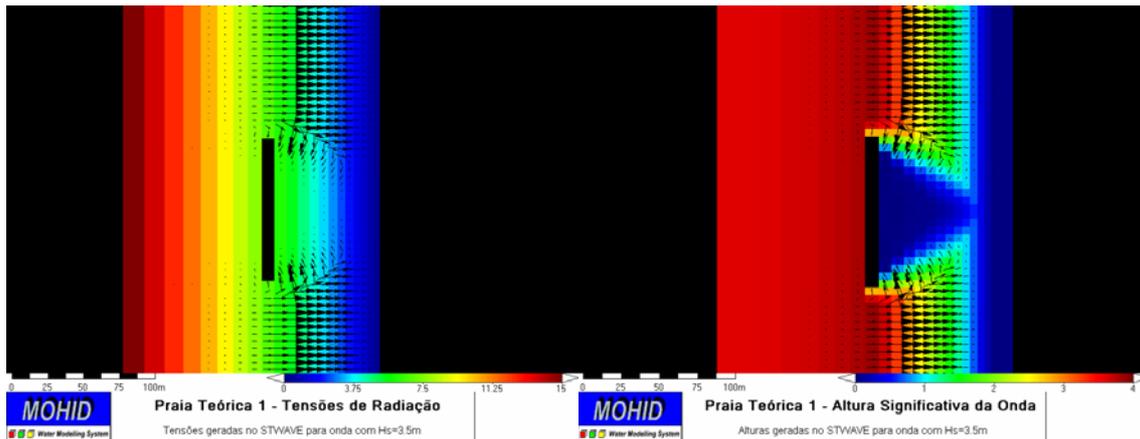


Figura 8 - Tensões de radiação sobre a batimetria (esquerda) e altura de onda (direita) na praia teórica 1.

Simulou-se o transporte de areias para um período de 24 dias, mantendo o forçamento invariável. A figura 9 mostra o instante final da simulação onde se observa o campo de velocidades estacionário e a alteração acumulada dos fundos. O escoamento é caracterizado essencialmente por dois vórtices simétricos localizados entre as extremidades do obstáculo e a praia, resultado da difracção da onda. Nas zonas não afectadas pelos vórtices as velocidades são praticamente nulas, pois como a onda é perpendicular à praia não se geram resultantes longitudinais. No fundo colorido da figura está representado a alteração dos fundos por acção do escoamento. Entre os tons azul e verde estão as zonas erodidas, que correspondem às áreas onde o escoamento circular é acelerado, e entre o amarelo e o vermelho as áreas de deposição resultante da redução das velocidades.

Ainda que a situação analisada seja um caso ideal, é de esperar que perante um obstáculo deste tipo (quebra-mar), ocorra tipicamente a acumulação de areias entre a estrutura e a praia. A ocorrência de uma onda oblíqua e/ou de fortes correntes pode deslocar os vórtices e reduzir o seu significado, porém haverá sempre uma tendência para deslocar areia para a zona referida (ver Anexo V). O estudo de diferentes distâncias do obstáculo à praia poderá também ser proveitoso, na medida que podem ocorrer alterações significativas no escoamento, função da posição daquele em relação à linha de rebentação das ondas.

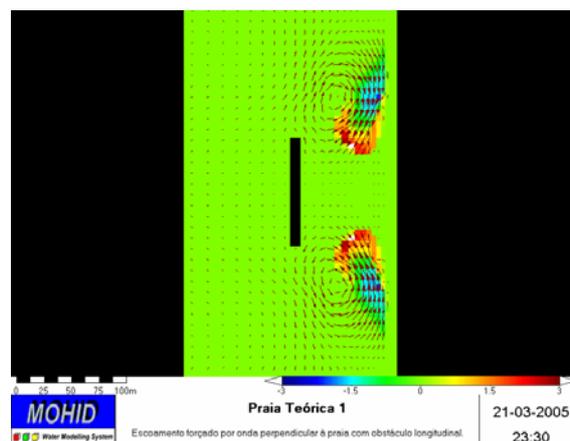


Figura 9 – Transformação acumulada dos fundos na praia teórica 1.

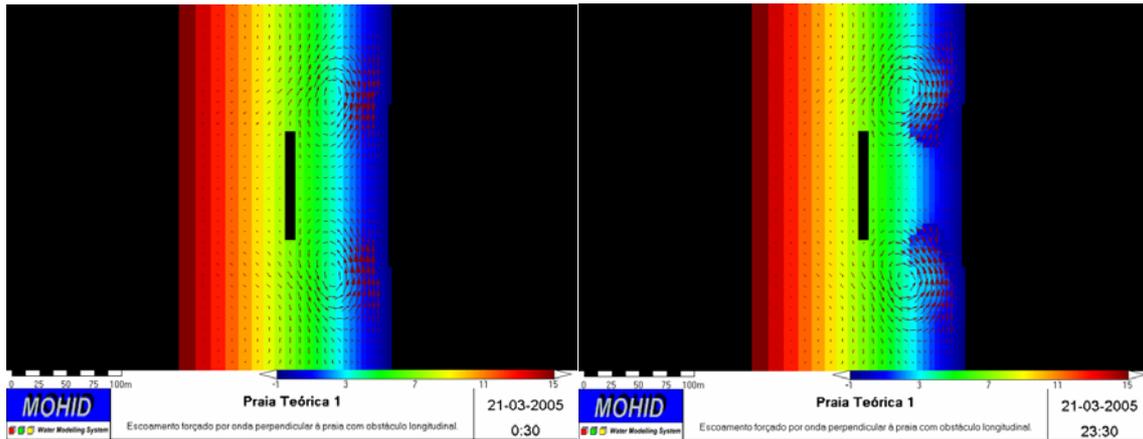


Figura 10 – Evolução da batimetria – Início (esquerda) e fim (direita).

Obstáculo Transversal

Na figura 11 está representado o campo de tensões de radiação e a propagação da altura significativa da onda para $H_s=3.5\text{m}$ na fronteira de mar. A onda entra no domínio com um ângulo de 60° com a normal à praia e à medida que progride o ângulo reduz-se gradualmente até igualar 0° na linha de praia. Na linha ao nível da extremidade do pontão a direcção da onda tem um ângulo de 22° e como se pode ver é neste ponto que inicia-se a rebentação.

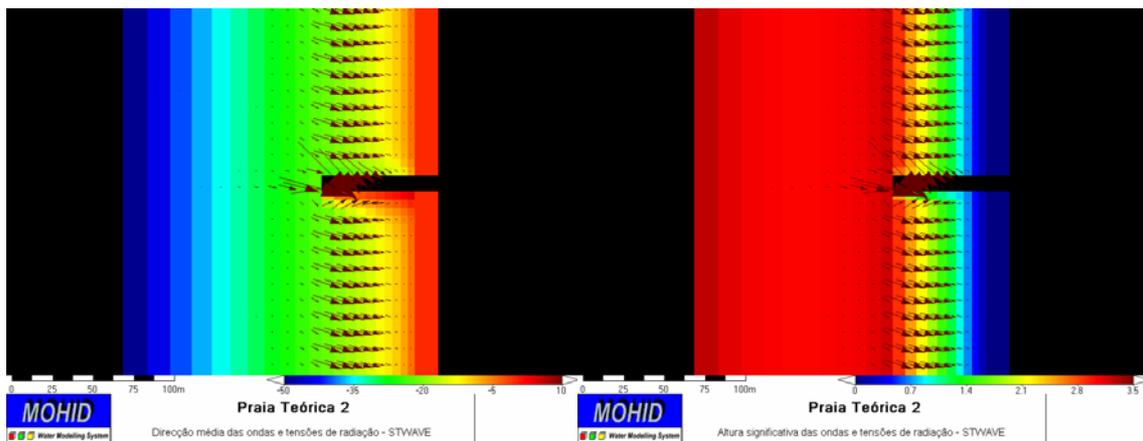


Figura 11- Tensões de radiação sobre a batimetria (esquerda) e altura de onda (direita) na praia teórica 2.

O transporte de sedimentos foi simulado igualmente para um período de 24 dias. O campo de velocidades gerado está representado nas figuras 12 e 13. Como se pode constatar as zonas erodidas encontram-se na faixa da rebentação, onde as velocidades, assim como a altura da onda são maiores. A areia transportada é depositada na zona anterior ao esporão devido à redução de velocidade por este provocada, e alguma ultrapassa-o vindo a depositar-se alguns dezenas de metros adiante. Após o fim da interferência do esporão no escoamento, volta a verificar-se o padrão normal de transformação dos fundos com uma faixa de erosão adjacente a uma de deposição. A evolução da batimetria revela que na zona anterior ao obstáculo a linha de praia praticamente avançou até à extremidade deste, situação característica de construções deste tipo nos ambientes costeiros (ver Anexo V).

Na área posterior ao pontão os resultados não são tão claros. Por um lado, a existência dum vórtice junto ao obstáculo produz a acumulação de areia na praia, ainda que em menor quantidade que na zona anterior, mas por outro lado há o recuo efectivo da praia numa zona após o vórtice. Numa simulação efectuada para um período muito superior (300 dias), verifica-

se o avanço da linha de praia na direcção do mar em todo o domínio, às custas da forte erosão dos fundos imediatamente adjacentes, obtendo-se assim declives na ordem dos 50%. Estes resultados conflituam com a noção de que na generalidade das situações reais ocorre o recuo da linha de praia na zona posterior ao esporão no sentido do escoamento predominante (ver Anexo V). O estudo de diferentes comprimentos do esporão poderia eventualmente clarificar esta situação.

Na extremidade do obstáculo ocorrem fenómenos de forte erosão, que em certa medida correspondem com situações de descalço que se verificam nalgumas estruturas marítimas.

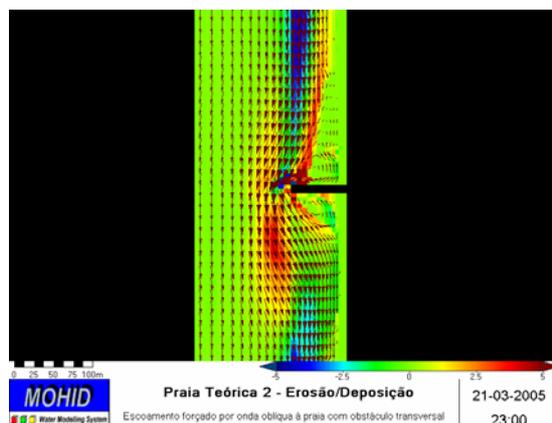


Figura 12 – Transformação acumulada dos fundos na praia teórica 2.

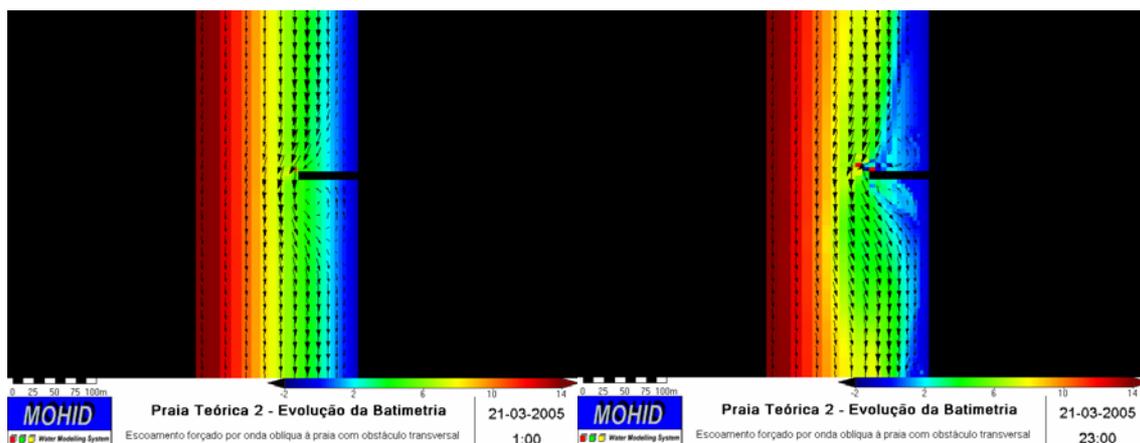


Figura 13 –Evolução da batimetria - Início (esquerda) e fim (direita).

3.4.3 Lagoa de Óbidos.

A aplicação do modelo à zona de costa adjacente à Lagoa de Óbidos tem como finalidade permitir ilustrar o funcionamento daquele numa situação real. A lagoa apresenta uma ligação ao mar, através de um canal natural de pouca profundidade, que nas últimas décadas tem apresentado uma tendência para o assoreamento devido à corrente de enchente ser superior à de vazante. A recuperação do equilíbrio morfológico da lagoa passa por, entre outros factores, estabilizar a embocadura do canal, que está relacionada com a evolução da morfologia da praia.

Simulou-se o transporte para um período de 10 dias, forçado apenas pelas ondas, sem marés e vento. Ao contrário das simulações anteriores, utilizou-se uma condição de fronteira radiativa.

Tabela 6 – Características da simulação na Lagoa de Óbidos.

Período simulado	H_s na fronteira de mar	Direcção na fronteira de mar	Diâmetro médio (D_{50})
10 dias	3.0 m	10° com Oeste no sentido Norte	0.13 mm

O escoamento e o transporte não se propagam para o interior da lagoa, pois o nível imposto na simulação é inferior às cotas do canal de entrada. O transporte de areias confina-se à zona de rebentação. A transformação dos fundos (figura 14) ocorre numa faixa longitudinal de largura variável entre os 100m e 500m, que tem como eixo a linha de rebentação, e na qual ao contrário das aplicações anteriores não se verifica qualquer simetria. Zonas de erosão alternam com zonas de deposição, numa deriva longitudinal de areias que globalmente tem a orientação nordeste. Na zona mais a sul da praia, caracterizada por uma batimetria pouco acidentada, registou-se a alteração dos fundos em muito menor escala.

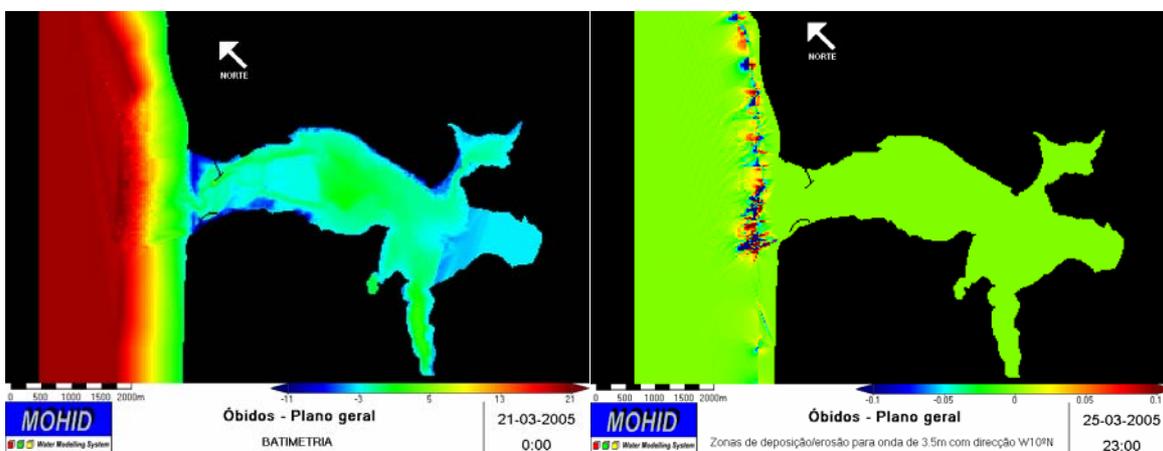


Figura 14 – Batimetria (esquerda) e zonas de deposição/erosão (direita) no sistema costeiro da Lagoa de Óbidos.

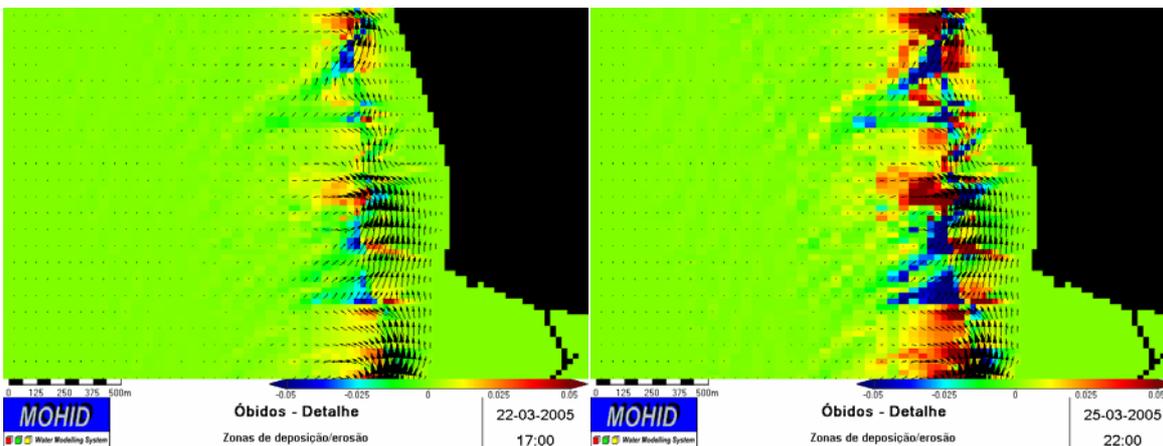


Figura 15 – Zonas de deposição/erosão (detalhe da lagoa) – dois instantes.

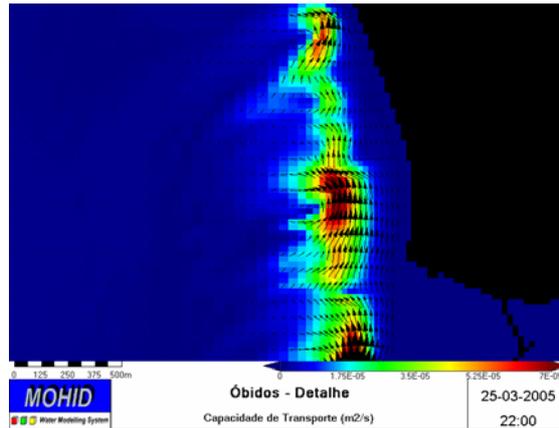


Figura 16 – Capacidade de Transporte (detalhe da lagoa).

3.4.4 Conclusões parciais

O estudo dos perfis de transporte revelam vários factos. No caso 1 todas as expressões calculam um transporte total na mesma ordem de grandeza, o que é desde logo uma indicação de qualidade. Porém as expressões de Dibajnia e Bailard produzem uma alteração da morfologia não esperada, onde células com forte erosão alternam com outras com forte deposição, desenhando-se um padrão em mosaico desordenado. As restantes fórmulas alteram a morfologia de acordo com padrões conhecido da engenharia costeira. No caso 2, onde o escoamento é muito menos energético, as divergências entre as previsões são mais acentuadas: Van Rijn calcula transporte nulo e os volumes totais divergem significativamente. Confirma-se o comportamento oscilatório de Dibajnia e Bailard, produtor de alterações que fazem lembrar *ripples*.

Mais trabalho deveria ser dedicado às últimas expressões referidas, pois permanece a dúvida sobre o seu comportamento: ou estão efectivamente a funcionar mal ou os padrões desenhados correspondem a uma situação de condições de escoamento extremas.

Relativamente às praias com obstáculos, o sistema de modelos parece responder satisfatoriamente, salientando-se contudo o simulação com o esporão onde os resultados estão de algum modo em conflito com a resposta esperada para este tipo obras costeiras.

4. Conclusões Finais

Este trabalho definiu como principal objectivo fornecer ao modelo de transporte de areias, novas fórmulas preditivas, que por um lado representassem os avanços feitos na dinâmica sedimentar e por outro aumentasse o leque de previsões disponíveis ao utilizador. Conclui-se que o modelo de transporte de areias é uma ferramenta útil para a compreensão da morfologia sedimentar e que as fórmulas de transporte implementadas dão maior consistência às potenciais aplicações do modelo.

Considerando a fraca universalidade das formulações disponíveis, a existência de métodos alternativos possibilita que, para determinadas condições de escoamento e sedimentos, se utilize a formulação mais adequada função da experiência adquirida ou da comprovação com dados de campo. Por outro lado, numa situação de desconhecimento das características do local e na ausência de medidas, a obtenção de resultados a partir de diferentes métodos permite, por análise da variabilidade obtida, uma postura mais prudente em relação à qualidade da simulação.

A complexidade do sistema integrado de modelos produz a propagação interna do erro: as inconsistências do modelo de ondas são propagadas para o modelo hidrodinâmico e em seguida para o modelo de transporte. De qualquer modo o erro inerente às fórmulas de transporte parece ser suficientemente grande para englobar os anteriores. Ao contrário de outros fenómenos marinhos, a modelação hidromorfológica não permite ainda a simulação razoável de grandes períodos de tempos, devido à complexidade do fenómeno exposta durante o texto, estando no momento mais vocacionada para a compreensão de tendências em casos reais e para fornecimento de volumes totais de apoio à decisão.

Segundo Silva *et al* (1997), apesar de por norma não ser possível quantificar com exactidão os campos de velocidade decorrentes da acção combinada de ondas e correntes e os volumes de erosão-sedimentação associados, uma avaliação qualitativa é geralmente suficiente para conduzir a um ganho significativo de qualidade no que toca ao conhecimento dos sistemas e ao tipo de resposta a esperar na sequência de determinada acção.

Numa perspectiva de trabalho futuro e aplicação eficiente e correcta do modelo, o processo iterativo entre o modelo de ondas e o MOHID, deveria ser implementado automaticamente, mediante, por exemplo, o uso de ficheiros *batch* do MS-DOS. Tal permite a actualização periódica do campo de ondas à medida que a batimetria e o campo de correntes vai evoluindo.

Finalmente, e como referido na secção 2.4, o desenvolvimento de uma descrição não-linear das ondas e do cálculo da rugosidade no fundo, mostra-se pertinente para o transporte em ambientes costeiros.

Anexo I. - Descrição do Modelo Hidrodinâmico

O modelo hidrodinâmico resolve as equações primitivas tridimensionais para escoamentos incompressíveis, em coordenadas cartesianas, assumindo as aproximações de Boussinesq e do equilíbrio hidrostático.

As equações da continuidade e do transporte da quantidade de movimento resolvidas são:

$$\frac{\partial u_1}{\partial t} + \frac{\partial(u_j u_1)}{\partial x_j} = -f u_2 - g \frac{\rho_\eta \partial \eta}{\rho_0 \partial x_1} - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p_s}{\partial x_1} - \frac{g}{\rho_0} \int_z^\eta \frac{\partial \rho'}{\partial x_1} dx_3 + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(A_j \frac{\partial u_1}{\partial x_j} \right) \quad \text{Eq. A1-1.}$$

$$\frac{\partial u_2}{\partial t} + \frac{\partial(u_j u_2)}{\partial x_j} = -f u_1 - g \frac{\rho_\eta \partial \eta}{\rho_0 \partial x_2} - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p_s}{\partial x_2} - \frac{g}{\rho_0} \int_z^\eta \frac{\partial \rho'}{\partial x_2} dx_3 + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(A_j \frac{\partial u_2}{\partial x_j} \right) \quad \text{Eq. A1-2.}$$

$$\frac{\partial p}{\partial x_3} = -\rho g \quad \text{Eq. A1-3.}$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad \text{Eq. A1-4.}$$

onde u_i representa as componentes do vector velocidade nas direcções cartesianas x_i , η a superfície livre de elevação, f o parâmetro de Coriolis, A_j a viscosidade turbulenta, p_s a pressão atmosférica, ρ a densidade da água e ρ' a sua variação.

O modelo resolve, opcionalmente, duas equações de transporte para a temperatura e salinidade e uma equação de estado para o cálculo da densidade calculada, que inclui assim os efeitos baroclínicos, expressa por:

$$\rho = \frac{5890 + 38T - 0.375T^2 + 3S}{1779.5 + 11.25T - 0.0745T^2 - (3.8 + 0.01T)S + 0.698(5890 + 38T + 0.375T^2 + 3S)} \quad \text{Eq. A1-5.}$$

em que T e S são a temperatura e a salinidade, respectivamente.

O transporte horizontal e o termo de Coriolis são resolvidos explicitamente, enquanto um algoritmo implícito é usado para o cálculo dos termos de pressão e do transporte vertical. O modelo baseia-se no conceito de volumes finitos, com integração das equações no volume da célula de cálculo, e aplicando-se o teorema da divergência para transformar os integrais de volume em fluxos através das faces.

No fundo, a tensão de corte é imposta assumindo um perfil de velocidades logarítmico:

$$\tau = C_d \left| \bar{u}_+ \right| \bar{u}_+ \quad \text{Eq. A1-6.}$$

$$C_d = k^2 \left(\ln \frac{z_+}{z_0} \right)^{-2} \quad \text{Eq. A1-7.}$$

onde τ é a tensão de corte no leito, u_+ é o vector velocidade horizontal à distância Z_+ acima do fundo, C_d é um coeficiente de atrito, k é a constante de Karman, e Z_0 é a altura da rugosidade física. Na superfície livre o fluxo de momento também é imposto na forma de tensão de corte.

Anexo II. - Descrição de duas fórmulas de transporte de areias do módulo SAND

O módulo SAND, numa etapa anterior a este trabalho dispunha de três expressões alternativas para o cálculo do transporte de sedimentos não coesivos: duas expressões para o caso de transporte forçado unicamente por correntes, Meyer-Peter & Muller (1948) e Ackers-White (1973) que aqui se descrevem; e uma expressão para situações com forçamento derivado da acção combinada de ondas e correntes, Van Rijn (1984,1993).

Ackers-White (1973)

Estes autores desenvolveram uma fórmula de transporte total para sedimentos grosseiros e finos expostos a uma corrente unidireccional. A expressão assume que os sedimentos grosseiros são transportados no fundo, numa taxa proporcional à tensão de corte, enquanto os sedimentos finos encontram-se suspensos por acção da turbulência. A intensidade desta depende da dissipação de energia gerada pelo atrito no fundo, o que torna o transporte em suspensão dependente da tensão de corte no fundo. O desenvolvimento original da teoria (Ackers e White, 1973) pode ser sumariado do seguinte modo:

Em primeiro lugar é necessário calcular o valor do diâmetro adimensional, D_* , e um conjunto de parâmetros (n , m , A e C). Os últimos são coeficientes empíricos calibrados através de um conjunto vasto de dados laboratoriais e de campo.

$$D_* = D_{35} \left[\frac{g(s-1)}{\nu^2} \right]^{1/3} \quad \text{Eq. A2-1.}$$

onde,

ν é a viscosidade cinemática; g é a gravidade; D_{35} é o diâmetro das partículas excedido por 65% em peso; e s é a densidade relativa dos sedimentos.

$$s = \frac{\rho_s}{\rho} \quad \text{Eq. A2-2.}$$

onde ρ e ρ_s representam, respectivamente, a densidade da água e dos sedimentos

Para valores de D_* entre 1 e 60, temos que:

$$n = 1 - 0.56 \log D_* \quad \text{Eq. A2-3.}$$

$$A = \frac{0.23}{\sqrt{D_*}} + 0.14 \quad \text{Eq. A2-4.}$$

$$m = \frac{9.66}{D_*} + 1.34 \quad \text{Eq. A2-5.}$$

$$\log C = 2.86 \log D_* - \log^2 D_* - 3.53 \quad \text{Eq. A2-6.}$$

Para valores maiores que 60:

$$n = 0$$

$$A = 0.17$$

$$m = 1.5$$

$$C = 0.025$$

Deste modo é possível escrever uma expressão que é função do transporte de sedimentos.

$$G_{gr} = C \left(\frac{F_{gr}}{A} - 1 \right)^m \quad \text{Eq. A2-7.}$$

onde F_{gr} representa a mobilidade dos sedimentos e está definido como,

$$F_{gr} = \frac{U_*^n}{\sqrt{g D_{35} (s-1)}} \left[\frac{U}{\sqrt{32 \log(\alpha h/D_{35})}} \right]^{1-n} \quad \text{Eq. A2-8.}$$

onde $\alpha = 1/K_s$, em que K_s é o coeficiente de rugosidade de Manning ($m^{1/3} \cdot s^{-1}$), h é a profundidade local, U_* é a velocidade de atrito e U é a velocidade.

A transformação da função G_{gr} em volume de sedimentos transportados por unidade de tempo é feita através da seguinte fórmula,

$$q_{sv} = s G_{gr} D_{35} \left(\frac{U_*}{U} \right)^n \quad (m) \quad \text{Eq. A2-9.}$$

Meyer-Peter & Muller (1948)

A fórmula proposta por estes autores foi desenvolvida para estimar taxas de transporte no fundo e descreve uma relação empírica derivada de experiências laboratoriais. É indicada principalmente para simulações fluviais.

$$q_s = 8[(s-1)g]^{\frac{1}{2}} [D_{50}(\tau' - \tau_c)]^{\frac{3}{2}} \quad \text{Eq. A2-10.}$$

onde D_{50} é o diâmetro das partículas excedido por 50% em peso; τ_c é a tensão de corte crítica e τ' é a tensão de corte total:

$$\tau_c = 0.047 \gamma_s D_{50}, \quad \text{Eq. A2-11.}$$

$$\tau' = \mu \tau_f \quad \text{Eq. A2-12.}$$

O γ_s é igual a $(\rho_s - \rho)$, τ_f representa a tensão de corte no fundo e μ é um factor de forma que indica a influência da forma da rugosidade do fundo no transporte, sendo calculado através das seguintes expressões,

$$\mu = \left(\frac{C}{C_{90}} \right)^{1.5} \quad \text{Eq. A2-13.}$$

$$C = 18 \log_{10} \left(\frac{12h}{k_{sc}} \right) \quad \text{Eq. A2-14.}$$

onde C_{90} é o coeficiente de Chézy baseado na rugosidade dada por D_{90} - diâmetro das partículas excedido apenas por 10% destas em peso e K_{sc} é a rugosidade devido à corrente.

Anexo III. - Descrição do Modelo de Ondas

A interacção entre ondas e correntes é considerada num referencial em movimento com a corrente. Os parâmetros neste referencial são assinalados com o índice r , e quando no referencial absoluto pelo índice a . A relação de dispersão das ondas é dada por:

$$\omega_r^2 = gk \tanh(kd) \quad \text{Eq. A3-1.}$$

onde ω é a frequência angular, g a aceleração gravítica, k o número de onda e d a profundidade. Num referencial absoluto, a equação de dispersão é expressa por:

$$\omega_a = \omega_r + kU \cos(\delta - \alpha) \quad \text{Eq. A3-2.}$$

onde U é a velocidade da corrente, δ é direcção da corrente em relação ao referencial fixo, α é direcção ortogonal da onda, i.e., normal à crista. O número de onda é obtido por substituição da Eq. A2-1 na Eq. A2-2 e resolvendo iterativamente em ordem a k . O número de onda e o comprimento de onda ($L=2\pi/k$) são iguais nos dois referencias.

As soluções para a refração e empolamento (*shoaling*) da onda necessitam da celeridade das ondas, C , e da celeridade para grupos de ondas, C_g , calculadas para ambos os referencias:

$$C_r = \frac{\omega_r}{k} \quad \text{Eq. A3-3.}$$

$$C_{gr} = 0.5C_r \left(1 + \frac{2kd}{\sinh 2kd} \right) \quad \text{Eq. A3-4.}$$

A direcção de ambas as celeridades calculadas é a direcção ortogonal da onda. No referencial absoluto temos:

$$C_a = C_r + U \cos(\delta - \alpha) \quad \text{Eq. A3-5.}$$

$$(C_{ga})_i = (C_{gr})_i + (U)_i \quad \text{Eq. A3-6.}$$

em que os índice i representam as componentes x e y . A direcção da celeridade absoluta é também a ortogonal da onda, mas a direcção da celeridade de grupo absoluta define a nova direcção da onda, designada por direcção do raio da onda.

$$\mu = \tan^{-1} \left(\frac{C_{gr} \sin \alpha + U \sin \delta}{C_{gr} \cos \alpha + U \cos \delta} \right) \quad \text{Eq. A3-7.}$$

A distinção entre estas duas direcções é importante na descrição da interacção onda-corrente, pois numa situação com correntes, a energia da onda desloca-se na direcção do raio da onda, enquanto a direcção da onda continua definida pela ortogonal à crista (ver Ilustração 4).

A direcção ortogonal da onda para condições estacionárias é dada por,

$$C_{ga} \frac{D\alpha}{DR} = - \frac{C_r k}{\sinh(2kd)} \cdot \frac{Dd}{Dn} - \frac{k_i}{k} \cdot \frac{DU_i}{Dn} \quad \text{Eq. A3-8.}$$

onde D é o símbolo de derivada; R a coordenada na direcção do raio e n a coordenada normal à ortogonal da onda.

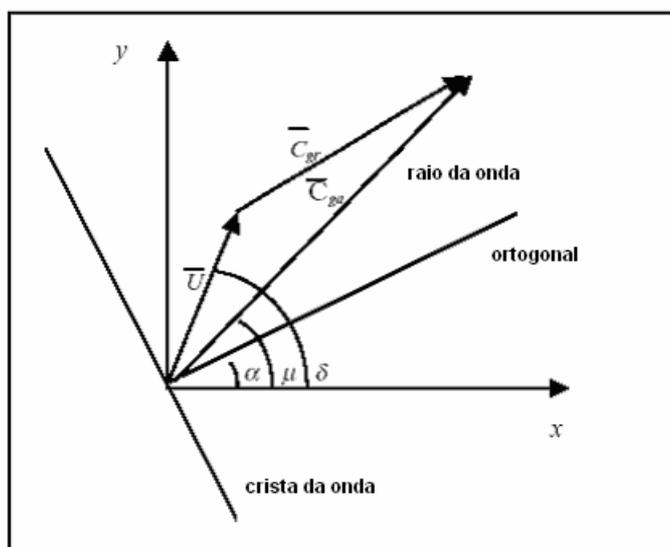


Ilustração 5 – Esquemática das direcções das celeridades relativas ao referencial absoluto para uma situação com ondas e correntes.

Por fim, a equação de conservação da acção espectral da onda em estado estacionário ao longo do raio da onda é dada por,

$$\left(C_{ga}\right)_i \frac{\partial}{\partial x_i} \frac{C_a C_{ga} \cos(\mu - \alpha) E(\omega_a, \alpha)}{\omega_r} = \sum \frac{S}{\omega_r} \quad \text{Eq. A3-9.}$$

onde E é a densidade energética da onda dividida por $(\rho_w g)$ em que ρ_w é densidade da água; e S representa fontes e sumidouros de energia.

Refracção e Empolamento (shoaling)

O fenómeno da refração manifesta-se em consequência da redução da celeridade da onda, quando a mesma se propaga de águas profundas para zonas de menor profundidade, com incidência oblíqua. Para uma crista de onda em diferentes profundidades, os troços da crista em que a profundidade é menor deslocam-se mais lentamente que os troços em que a profundidade é maior, e assim, a crista tende a encurvar-se adaptando-se à morfologia do fundo. Na teoria da refração admite-se que a variação dos fundo têm declives suaves. O empolamento consiste no crescimento gradual da altura da onda devido à redução da profundidade.



Ilustração A2.1 – Refracção de ondas na costa oeste portuguesa (Lagoa de Óbidos).

A refração e o empolamento estão implementados no STWAVE por aplicação da equação de conservação da acção das ondas ao longo dos raios da onda traçados previamente através da Eq. A2-7 e do espectro bidimensional da onda. O espectro constitui uma representação estatística do campo de ondas, que conceptualmente descreve a distribuição da energia da onda em função da frequência e direcção. É calculado no início das simulações e preenche a primeira coluna da malha (fronteira de mar). Para uma célula na segunda coluna, o espectro é calculado traçando-se um raio para cada frequência e direcção que compõem o espectro. Apenas as direcções que se propagam no sentido da praia (± 87.5 graus relativo ao eixo dos xx) são consideradas, sendo a energia que se propaga noutras direcções desprezada.

Difracção

A difracção da onda corresponde a um fluxo de energia resultante de uma distribuição espacial não uniforme da altura de onda, que tem como principal efeito o transporte de energia ao longo das cristas, no sentido das zonas em que a altura de onda é menor. O fenómeno da difracção pode ser ilustrado considerando um conjunto de ondas propagando-se na direcção de um quebra-mar ou barreiras naturais, como se pode observar na ilustração seguinte (Ilustração A2.2).



Ilustração A2. 2 – Difracção de ondas à entrada da baía de São Martinho.

A difracção está incluída no STWAVE de modo simples através de uma expressão que homogeneiza a energia da onda entre células na mesma linha longitudinal à praia. Para uma dada frequência e direcção,

$$E_j(\omega_a, \alpha) = 0.55E_j(\omega_a, \alpha) + 0.225[E_{j+1}(\omega_a, \alpha) + E_{j-1}(\omega_a, \alpha)] \quad \text{Eq. A3-10.}$$

onde E é a densidade energética da onda, e o índice j indica a linha. Esta equação possibilita a suavização de fortes gradientes na altura da onda em zonas protegidas, mas não produz a rotação da onda.

Altura da onda na zona de rebentação

A altura significativa da onda, H_{sig} , é aproximadamente igual à média do 1/3 das ondas mais altas. O limite máximo da altura significativa da onda é obtido através de uma relação delineada para a zona de rebentação:

$$H_{sig, \max} = 0.1L \tanh(kd) \quad \text{Eq. A3-11.}$$

Gradientes das tensões de radiação

Os gradientes nas tensões de radiação são calculados no STWAVE com o objectivo de fornecer a modelos externos de circulação hidrodinâmica o forçamento com origem na ondulação. Com estes gradientes, modelos como o MOHID poderão determinar a variação produzida no campo de velocidades e no nível da água. Os tensores da tensão de radiação são deduzidos a partir da teoria linear das ondas:

$$S_{xx} = \rho_w g \iint E(f, \alpha) \left[0.5 \left(1 + \frac{2kd}{\sinh(2kd)} \right) (\cos^2 \alpha + 1) - 0.5 \right] df d\alpha \quad \text{Eq. A3-12.}$$

$$S_{xy} = \rho_w g \iint \frac{E(f, \alpha)}{2} \left[0.5 \left(1 + \frac{2kd}{\sinh(2kd)} \right) \sin 2\alpha \right] df d\alpha \quad \text{Eq. A3-13.}$$

$$S_{yy} = \rho_w g \iint E(f, \alpha) \left[0.5 \left(1 + \frac{2kd}{\sinh(2kd)} \right) (\sin^2 \alpha + 1) - 0.5 \right] df d\alpha \quad \text{Eq. A3-14.}$$

Os gradientes são calculados como:

$$\tau_x = -\frac{\partial S_{xx}}{\partial x} - \frac{\partial S_{xy}}{\partial y} \quad \text{Eq. A3-15.}$$

$$\tau_y = -\frac{\partial S_{xy}}{\partial x} - \frac{\partial S_{yy}}{\partial y} \quad \text{Eq. A3-16.}$$

Os valores de τ_x/ρ_w e τ_y/ρ_w são os dados de saída para uso na modelação da circulação.

Anexo IV. - Fórmula CERC (1984) e Kamphuis (1986)

A fórmula CERC (Shore Protection Manual, 1984), desenvolvida originalmente pelo instituto *Coastal Engineering Research Center* pertencente ao US Army Corps of Engineers, é uma ferramenta simples e de uso comum no cálculo de taxas totais de transporte longitudinal, pode expressar na seguinte forma:

$$Q = \frac{K}{16\sqrt{\gamma}} \rho g^{\frac{3}{2}} H_{sb}^{\frac{5}{2}} \sin(2\theta_b) \quad \text{Eq. A4-1.}$$

onde, γ é um índice de rebentação, geralmente igual a 0.78; K é um coeficiente empírico, neste trabalho considerado igual a 0.39; H_{sb} e θ_b são a altura significativa e a direcção da onda, respectivamente, imediatamente antes de iniciar-se a rebentação.

A partir de dados de campo, Kamphuis *et al* (1986) propõe uma nova expressão empírica que inclui o declive do fundo (m) e o diâmetro dos sedimentos (d) (Wang, 2002):

$$Q = 1.28 \frac{H_{sb}^{3.5} m}{d} \sin(2\theta_b) \quad \text{Eq. A4-2.}$$

Anexo V. - Fenómenos de transporte longitudinal

Esquematisações de fenómenos de transporte longitudinal costeiro perante dois obstáculos típicos: quebra-mar e esporões, com a localização das zonas de erosão e deposição. Figuras retiradas dos apontamentos da disciplina de Processos Fluviais e Costeiros (Sancho, 2002)

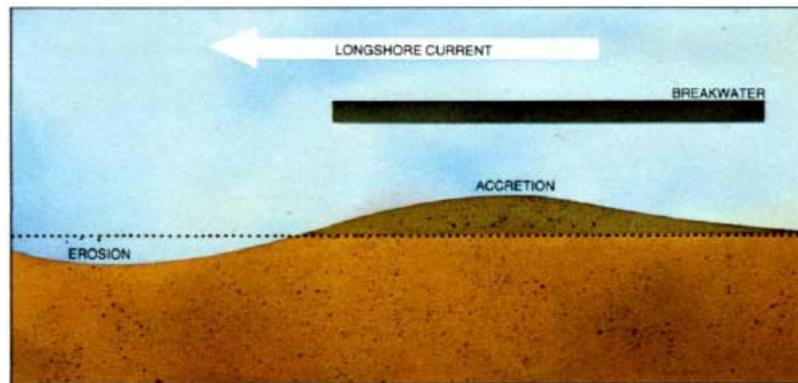


Ilustração A5. 1 - Obstáculo longitudinal, quebra-mar.

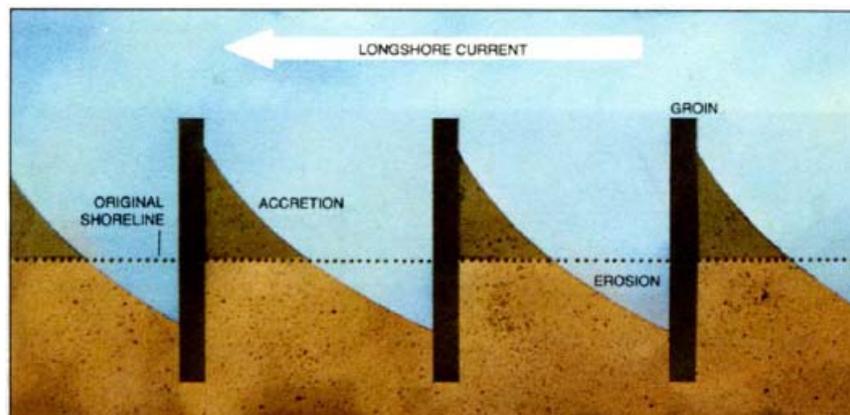


Ilustração A5. 2 – Obstáculo transversal, campo de esporões.

Bibliografia

- AHMED, S. M., SATO, S. (2003);** A sheetflow transport model for asymmetric oscillatory flows. Part I: Uniform grain size sediments; Coastal Engineering Journal 45, 321-337.
- AL SALEM, A. (1993);** *Sediment transport in oscillatory boundary layers under sheet flow conditions*; PhD thesis, Delft Hydraulics, The Netherlands.
- BAGNOLD, R. (1966);** *An approach of sediment transport model from general physics*; US Geol. Survey Prof. Paper 422-I.
- BAILARD, J. A. (1984);** *A simplified model for longshore sediment transport*. Proceedings of the 19th Coastal Engineering Conference, pp. 1454– 1470.
- BAILARD, J. A., INMAN, D. L. (1981);** *An energetics bedload model for plane sloping beach: local transport*. Journal of Geophysical Research 86 (C3), 2035– 2043.
- BAYRAM, A., LARSON, M., MILLER, H., KRAUS, N. (2001);** *Cross-shore distribution of longshore sediment transport: comparison between predictive formulas and field measurements*; Coastal Engineering Journal 44, 79– 99.
- BIJKER, E. (1968);** *Littoral drift as function of waves and current*; 11th Coastal Eng. Conf. Proc. ASCE; London, UK; pp. 415–435.
- CAMENEN, B., LARROUDÉ, P. (2003);** *Comparison of sediment transport formulae for the coastal environment*; Coastal Engineering 48, 111– 132.
- DIBAJNIA, M., WATANABE, A. (1992);** *Sheet flow under nonlinear waves and currents*. Coastal Engineering Journal, 2015– 2029.
- DU BOYS, P. (1879);** *Le Rhône et les rivières à lit affouillable*; Ann; Ponts Chaussées 18 (5), 171– 195.
- FERNANDES, L. (2001);** *Transporte de Poluentes em Estuários*; Trabalho Final de Curso da Licenciatura em Engenharia do Ambiente; Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa.
- FRIJLINK, H. (1952);** *Discussion des formules de débit solide de Kalinske, Einstein et Meyer-Peter and Muller compte tenue des mesures récentes de transport dans les rivières néerlandaises*; 2nd Journal Hydraulique; Société Hydraulique de France, pp. 98– 103.
- KOMAR, P. D. (1998);** *Beach processes and sedimentation*; 2nd Ed.; Pearson Education, New Jersey.
- LEITÃO, P.C. (2002);** *Integração de Escalas e de Processos na Modelação do Ambiente Marinho*; Dissertação para a obtenção do grau de Doutor em Engenharia do Ambiente; Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa.
- LIU, Z. (2001);** *Sediment Transport*; Institutet for Vand, Jord og Miljøteknik; Aalborg Universitet.

SANCHO, F. (2002); *Apontamentos da disciplina de Processos Fluviais e Costeiros, Mestrado em Hidráulica, Recursos Hídricos e Ambiente*; Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra.

SILVA*, A., NEVES, R., LEITÃO, J.C. (1997);** *Modelação de Processos de Transporte por Acção Combinada de Ondas e Correntes*; *HIDROMOD - Modelação em Eng^a, Ld^a; **Instituto Superior Técnico; Lisboa.

SMITH, J., SHERLOCK, A., RESIO, D. (2001); *STWAVE: Steady-State Spectral Wave Model.*

User's Manual for STWAVE, Version 3.0; ERDC/CHL, US Army Corps of Engineers; Washington, DC.

TRANCOSO, A. R. (2002); *Modelling Macroalgae in Estuaries*; Trabalho Final de Curso da Licenciatura em Engenharia do Ambiente; Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa.

VAN RIJN, L.C. (1984); *Sediment transport: Part I: Bed load transport; Part II: Suspended load transport; Part III: Bed forms and alluvial roughness.* Journal of Hydraulic Division 110 (10), 1431– 1456; 110 (11) 1613– 1641; 110 (12) 1733-1754.

VAN RIJN, L.C. (1993); *Principles of sediment transport in rivers, estuaries and coastal seas.* Aqua Publication, The Netherlands, Amsterdam.

WANG, P., EBERSOLE B., SMITH E. (2002); Longshore Sand Transport – Initial Results from Large-Scale Sediment Transport Facility; ERDC/CHL, US Army Corps of Engineers, Washington, DC.

WINTER, C. (2004); *Performance of sediment transport models in tidal environments*, Workshop HWK, Delmenhorst.