

# Modelação numérica da interacção onda-corrente numa escala local. Estudo de efeitos de modelos de fecho de turbulência

Maria João TELES<sup>1</sup>, António A. PIRES-SILVA<sup>2</sup>, Michel BENOIT<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Instituto Superior Técnico, TULisbon, Av. Rovisco Pais, 1049-001 Lisboa, Portugal  
*mjteles@gmail.com*

<sup>2</sup> Instituto Superior Técnico, TULisbon, Av. Rovisco Pais, 1049-001 Lisboa, Portugal  
*aps@civil.ist.utl.pt*

<sup>3</sup> Laboratoire d'Hydraulique Saint-Venant (EDF R&D, CETMEF, Ecole des Ponts ParisTech), 6, quai Watier, BP 49 78401 Chatou, France  
*michel.benoit@edf.fr*

## Resumo:

A hidrodinâmica das zonas litorais resulta da contribuição de diversos fenómenos, que apresentam interacções complexas, com escalas espaço temporais distintas. Desde o largo até à costa, os efeitos associados à maré, ao vento, à batimetria, às ondas de superfície e à turbulência condicionam a dinâmica do movimento em menor ou maior intensidade.

De entre estas interacções complexas destaca-se a que se observa entre as ondas de superfície e as correntes, especialmente quando a corrente possui forte variação na vertical.

No presente estudo foi utilizado o modelo numérico 3D Code\_Saturne (Archambeau et al., 2004) baseado nas equações de Navier Stokes para o escoamento médio (RANS). Inicialmente desenvolvido para escoamentos em pressão, o código foi adaptado para o estudo da interacção entre ondas e correntes, considerando efeitos de turbulência em escoamentos com superfície livre. A verificação e validação das simulações foi feita através dos resultados experimentais obtidos por Klopman (1994) num canal de ondas em DELFT HYDRAULICS.

Avaliou-se e discutiu-se a influência de diferentes modelos de fecho da turbulência no perfil vertical da velocidade média do escoamento.

## 1. INTRODUÇÃO

De um ponto de vista hidrodinâmico a orla costeira é um sistema complexo onde diversos fenómenos de escalas espaço temporais distintas interagem. O conhecimento dos processos físicos que coexistem neste domínio é essencial, nomeadamente, para o dimensionamento de estruturas no ambiente marítimo, para o aproveitamento de energias renováveis e para a modelação da morfodinâmica litoral.

Como foi referido, uma das componentes da complexidade é a presença de interacções entre escalas diferentes e os respectivos mecanismos de realimentação, quer sejam a modelação das marés, o forçamento do vento, a dissipação associada à diminuição de profundidade, o efeito Doppler de campos de correntes espacialmente heterogéneos ou as flutuações da turbulência.

O presente trabalho aborda as interacções entre as ondas de superfície e as correntes. Em particular, a influência sobre o perfil vertical da velocidade média horizontal do escoamento de um campo de velocidades induzido pela propagação de ondas de gravidade na superfície livre. Para este fim, usa-se um modelo numérico, o modelo Code\_Saturne (Archambeau et al., 2004), de equações primitivas de fluidos newtonianos, com a decomposição de Reynolds para o escoamento médio e flutuação turbulenta. A aplicação do operador de média apropriado introduz as tensões de Reynolds e conduz às equações para o escoamento médio (RANS). As equações são resolvidas com o método dos volumes finitos apoiados em malhas não estruturadas de vários tipos. O modelo Code\_Saturne foi desenvolvido e é propriedade da EDF R&D. Constitui a ferramenta multi-tarefa para a Dinâmica de Fluidos Computacional (CFD) da EDF R&D e é um código aberto que corre, entre outras, em plataformas Linux.

A relação das tensões de Reynolds com o movimento médio é aproximada por modelos de viscosidade turbulenta, como  $k - \epsilon$  e  $k - \omega$ , e modelos de transporte das tensões de Reynolds (Reynolds Stress Model) como  $R_{ij} - \epsilon$ . Esta escolha condiciona a qualidade da representação do perfil vertical da velocidade média horizontal e é o objecto principal do estudo agora apresentado. As simulações com os diferentes modelos de fecho da turbulência foram comparadas com as medições em laboratório num canal de ondas com possibilidade de injeção de uma corrente estacionária (Klopman, 1994).

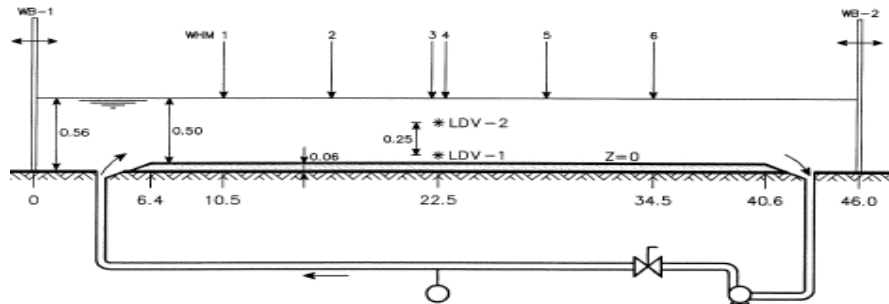
O artigo está estruturado em cinco secções. A seguir a esta secção introdutória, a secção 2 apresenta os dados experimentais que sustentaram o estudo. Na secção 3 introduz-se o modelo numérico e computacional aplicado no estudo das interacções onda corrente. A análise de resultados ocupa a secção 4. Na secção 5 discutem-se as conclusões e os desenvolvimentos a prosseguir.

## 2. DADOS EXPERIMENTAIS

Klopman (1994) descreve um conjunto de ensaios em laboratório concebidos com o fim preciso de obter medições de grandezas cinemáticas em ambiente de coexistência de ondas de superfície e correntes estacionárias. A experiência decorreu nas instalações *Scheldegoot*, DELFT HYDRAULICS (actualmente DELTARES). O canal de ondas, representado na Figura 1, está equipado com dois sistemas de geração de ondas, em cada extremidade, e um sistema de circulação, com um circuito externo munido de uma bomba centrífuga e válvula que assegura um caudal de  $80 \text{ ls}^{-1}$ . Com esta configuração foi possível simular ambas as situações de ondas propagando-se a favor da corrente e contra a corrente, além de experiências só com correntes ou só com ondas.

As ondas de superfície foram geradas com um sinal de segunda ordem para eliminar ondas longas livres expúrias. O sistema de geração tinha também capacidade de absorver, em tempo real, ondas reflectidas. Foi simulada uma onda monocromática com altura  $H = 0,12 \text{ m}$  e um período  $T = 1,44 \text{ s}$  num canal com escala geométrica  $1/20$  e semelhança de Froude.

Ao longo do tempo estas experiências e os resultados associados tem constituído uma referência de comparação relevante para estudos tão diversos como You (1996), Groeneweg e Klopman (1998), Huang e Mei (2003) ou Olabarrieta et al. (2010).



**Figura 1-** Canal de ondas, em Delft, utilizado nas experiências de Klopman (1994).

### 3. MODELO CODE\_SATURNE

#### 3.1 INTRODUÇÃO

O modelo Code\_Saturne é um modelo de cálculo de mecânica dos fluidos de largo espectro desenvolvido na *EDF R&D* para a modelação de escoamentos laminares e turbulentos em domínios bi-dimensionais e tri-dimensionais. Resolve as equações de Navier Stokes para fluidos incompressíveis, completadas com equações para a modelação da turbulência. O modelo é baseado no método de volumes finitos, apresentando as equações uma formulação na forma conservativa, sendo depois integradas em volumes de controlo. Este modelo numérico aceita todos os tipos de malhas não estruturadas. O programa é constituído por dois módulos principais: um dedicado à resolução das equações primárias com modelos de fecho de turbulência associados e outro que tem como função o pré e o pós processamento.

O grande campo de aplicação do modelo Code\_Saturne tem sido os escoamentos em pressão em instalações industriais de grande porte. A modelação de escoamentos em superfície livre, em particular a propagação de ondas à superfície, exigiu a adaptação do código e sua verificação.

#### 3.2 MÓDULO DE SUPERFÍCIE LIVRE - ALE

A representação de uma fronteira móvel, como a superfície livre, nos modelos numéricos da dinâmica de fluidos computacional faz-se, basicamente, com o auxílio de malhas fixas, de que é exemplo o método VOF (volume of fluid), ou malhas móveis, perspectiva adoptada no modelo Code\_Saturne. Através de uma transformação conforme assegura-se que a superfície livre constitui sempre uma superfície coordenada. A ligação entre o domínio físico e o domínio de cálculo é feita com a definição de uma velocidade de deformação da malha, que representa uma mudança de coordenadas. Quando a velocidade da malha é zero surge uma descrição euleriana, se a velocidade da malha coincide com a velocidade das partículas materiais do fluido identifica-se uma descrição lagrangiana.

Não há uma forma única de escolher a transformação ou mudança de coordenadas entre os dois domínios. A formalização deste isomorfismo e o cálculo do respectivo jacobiano constitui o método ALE (*Arbitrary Lagrangian-Eulerian*) (Souli e Zolesio, 2001).

A restrição *a priori* a impor para a velocidade de deformação da malha é a sua coincidência com a velocidade da fronteira móvel, neste caso a superfície livre. As equações de Navier Stokes sofrem assim uma modificação, ganham uma nova grandeza que é a velocidade vertical da malha. A cada passo temporal, a malha é reactualizada. Deste modo as equações a serem resolvidas são, respectivamente, as equações de conservação da massa (1) e da quantidade de movimento (2) reescritas da seguinte forma:

$$\nabla \cdot \bar{u} = 0 \quad (1)$$

$$\rho \frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + \nabla \cdot [\rho(\bar{u} - \bar{w}) \otimes \bar{u}] = -\nabla P + \mu \Delta \bar{u} + \bar{f} - \rho \bar{u} \nabla \cdot \bar{w} \quad (2)$$

As variáveis  $\bar{u}$  e  $P$  referem-se, respectivamente, à velocidade do fluido e pressão,  $\bar{w}$  à velocidade de deformação da malha,  $\mu$  e  $\rho$  à viscosidade e densidade do fluido  $\bar{f}$  às forças de volume e  $g$  à aceleração da gravidade.

### 3.3 OPÇÕES DE CONFIGURAÇÃO DO MODELO

Existem vários métodos para a geração de ondas em modelos numéricos, de que são exemplos a imposição na fronteira de montante de um perfil de velocidades compatível com um dado movimento da superfície livre e a especificação do próprio movimento da fronteira de modo a reproduzir um batedor físico. No presente estudo foi escolhida esta última alternativa. O sinal de segunda ordem  $X_0(t)$  (Dean e Dalrymple, 1991) está indicado na equação (3) e deve ser introduzido progressivamente de modo a evitar uma entrada brusca no domínio,

$$X_0(t) = \frac{H}{2m_1} \sin(\sigma t) + \frac{H^2}{32h} \left( \frac{3 \cosh(kh)}{\sinh^3(kh)} - \frac{2}{m_1} \right) \sin(2\sigma t) \quad (3)$$

$$m_1 = \frac{4 \sinh(kh)}{\sinh(2kh) + 2kh} \left[ \sinh(kh) + \frac{(1 - \cosh(kh))}{kh} \right] \quad (4)$$

Onde:

$k$  - número de onda [rad/m]

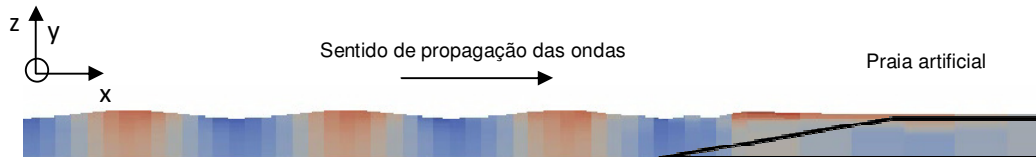
$h$  - profundidade [m]

$H$  - altura de onda [m]

$\sigma$  - frequência relativa da onda [rad/s]

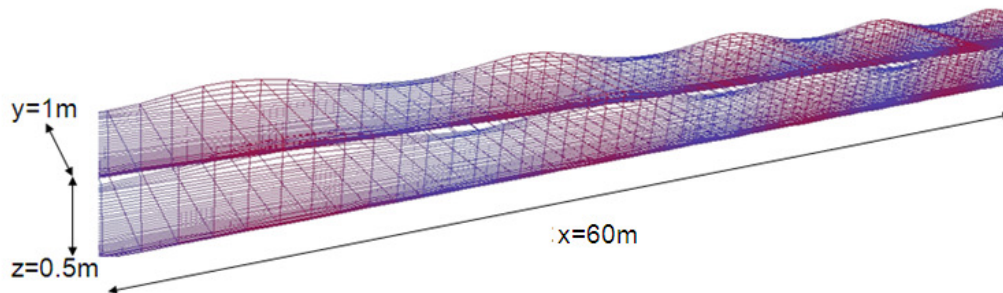
$t$  - tempo [s]

De modo a controlar a reflexão foi necessário criar uma praia artificial (Figura 2) na extremidade de jusante, com 20 m de desenvolvimento, aproximadamente, que corresponde a 6 comprimentos de onda. Esta praia artificial apresentava uma forte valor de viscosidade, permitindo o amortecimento das ondas.



**Figura 2** – Representação da praia artificial a jusante do canal

A geração da malha teve de obedecer a certos requisitos. Por um lado, na direcção  $x$  tiveram que se assegurar pelo menos 10 células por comprimento de onda, de maneira a reproduzir bem a propagação das ondas ao longo do canal. Por outro lado, junto à parede móvel a montante não era possível uma descrição espacial muito elevada. Esta última condição teve que ser respeitada para evitar qualquer tipo de cruzamento entre os diferentes elementos da malha e por isso obter volumes negativos que fariam divergir o cálculo. As discretizações espaciais obtidas foram para cada direcção:  $\Delta x \approx 0.25m$ ,  $\Delta y = 1m$  e  $0.005m < \Delta z < 0.02m$ . Foi imposto no cálculo um passo temporal de  $\Delta t = 0.02s$  de modo a garantir a condição de Courant Friedrichs Levy (CFL) (Figura 3).



**Figura 3** – Domínio computacional representativo do canal de ondas das experiências de Klopman (1994)

### 3.4 CONDIÇÕES DE FRONTEIRA

No presente estudo deu-se particular atenção às condições de fronteira a aplicar na fronteira superior, correspondente à superfície livre, uma vez que era nesta área que as maiores alterações eram necessárias. Como condição de fronteira dinâmica impôs-se uma condição de Dirichlet para a pressão igual à pressão atmosférica. Para garantir que não houvesse fluxo de massa através da superfície livre impôs-se a seguinte condição para a velocidade da malha:

$$w = \frac{\vec{u} \cdot \vec{S}}{\vec{e}_z \cdot \vec{S}} = \frac{\dot{m}_{fs}}{\rho S} \quad (5)$$

$w$  representa a velocidade da malha,  $\dot{m}_{fs}$  o fluxo de massa que existiria caso a superfície livre fosse considerada fixa e  $S_z$  a componente vertical do vector normal à superfície livre.

Nezu e Rodi (1986) realizaram experiências em superfície livre para avaliar a variação vertical do valor da viscosidade turbulenta ao longo da coluna de água. Constataram que a escala integral dos turbilhões diminui quando se aproxima da superfície livre (Figura 4). De modo a garantir este comportamento da escala integral segundo a vertical, Nezu e Nakagawa (1993) propuseram a seguinte expressão para a dissipação turbulenta:

$$\varepsilon = \frac{k^{3/2}}{\alpha h} \quad (6)$$

$\varepsilon$  representa a dissipação turbulenta,  $k$  a energia cinética turbulenta,  $\alpha=0.18$  uma constante empírica e  $h$  a profundidade.

Esta condição de fronteira revelou-se essencial para um correcto perfil da viscosidade turbulenta.

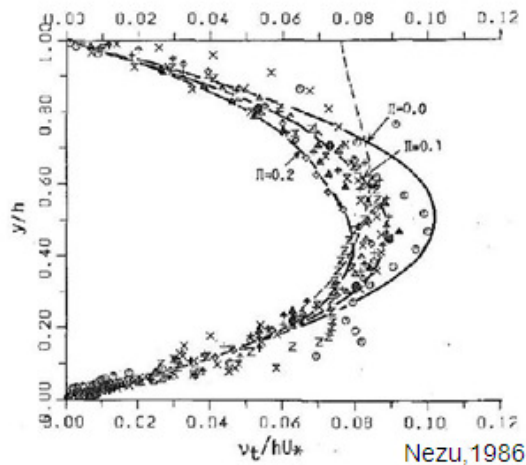


Figura 4 – Perfil vertical da viscosidade turbulenta (Nezu e Nakagawa, 1993).

## 4. RESULTADOS E INTERPRETAÇÃO

### 4.1 CORRENTE ESTACIONÁRIA

O primeiro caso a ser estudado envolveu apenas uma corrente estacionária associada a um caudal de  $80 \text{ ls}^{-1}$ . Com este teste mais simples foi possível a definição do domínio computacional, e respectivas condições de fronteira, e dimensionar uma praia artificial na extremidade de jusante do canal de modo a absorver instabilidades do escoamento.

Como se pode verificar através das Figuras 5 e 6, o modelo reproduz bem o perfil vertical de velocidade média horizontal com os diferentes modelos de fecho de turbulência. Através do perfil vertical de velocidade média em escala semi-logarítmica (Figura 6), e ajustando uma recta aos valores de velocidade junto ao fundo, o valor de  $z_0$  pode ser estimado.

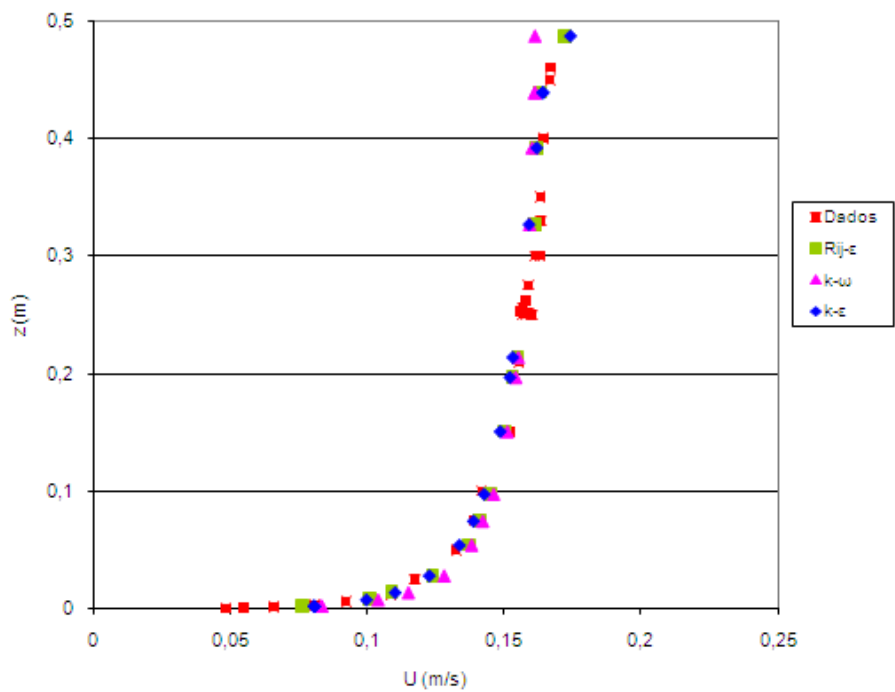


Figura 5- Perfil de velocidade média horizontal para o caso de só correntes.

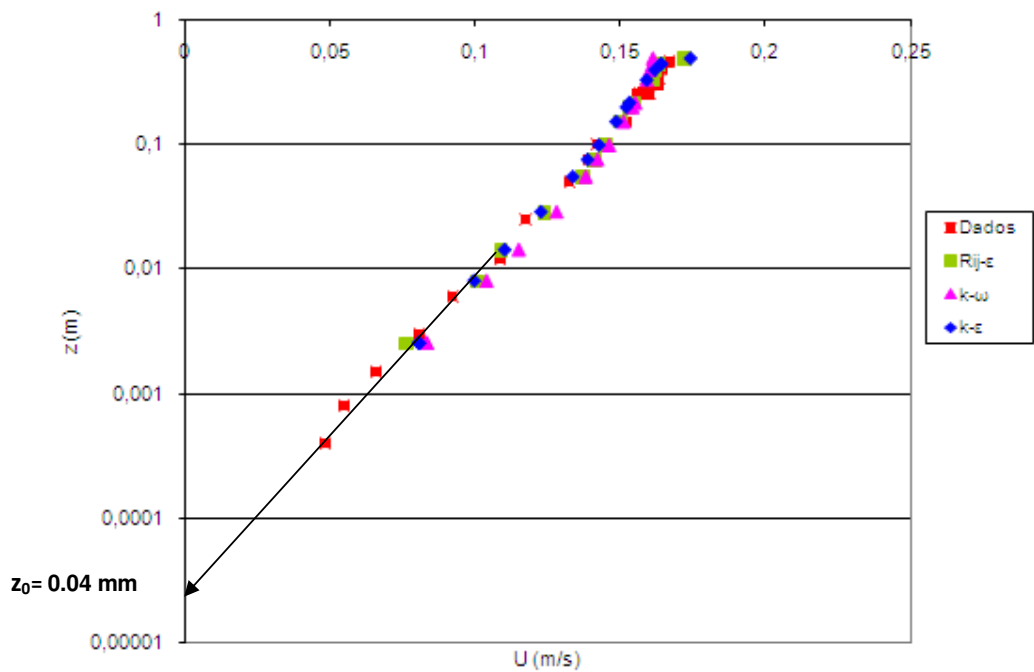


Figura 6 - Perfil de velocidade média para o caso de só correntes em escala semi logarítmica.

A este valor de  $z_0$  corresponde uma rugosidade de Nikuradse de  $k_s = 30 \times z_0 = 1,2$  mm.

Na Figura 7 estão representadas as tensões de Reynolds. Consta-se que as simulações realizadas com os modelos  $k - \omega$  e  $R_{ij} - \varepsilon$  apresentam uma boa concordância com as medições de Klopman (1994). Por seu lado, o modelo  $k - \varepsilon$  tem tendência a sobrestimar as tensões de Reynolds. De facto, é conhecido este comportamento junto à parede da parte deste modelo.

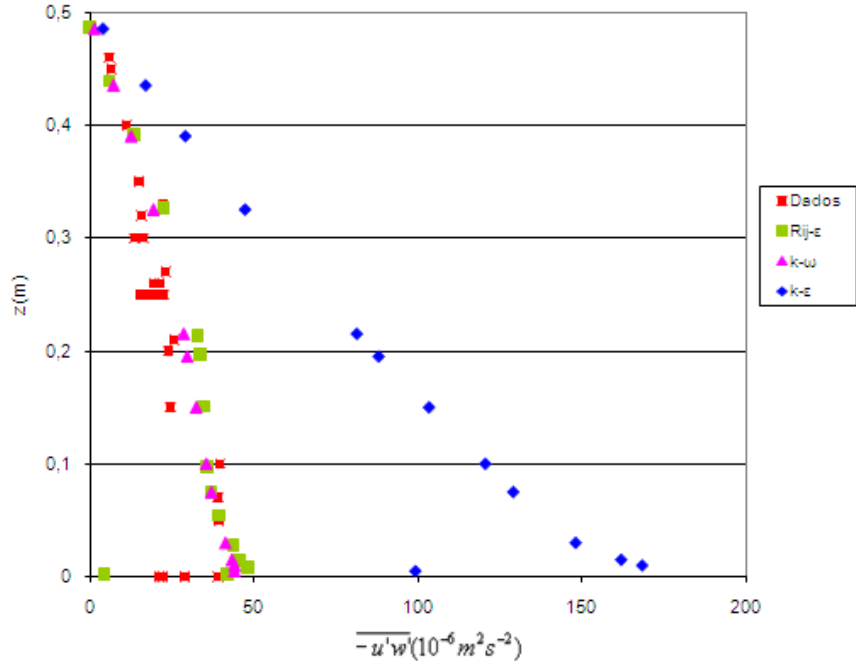


Figura 7 – Perfil vertical das tensões de Reynolds

## 4.2 ONDA MONOCROMÁTICA

O segundo caso simulado consistiu na propagação de ondas sem correntes. Foi gerada uma onda monocromática com altura  $H = 0.12$  m e período  $T = 1.44$  s, a que corresponde um comprimento de onda  $L = 2.68$  m.

As Figuras 8 e 9 apresentam o perfil vertical da velocidade média horizontal na presença de um campo de velocidades impostas pelas ondas de superfície (escala linear e semi-logarítmica, respectivamente). A comparação mostra que o Code Saturne complementado com a condição de fecho  $R_{ij} - \varepsilon$  consegue reproduzir o perfil experimental, em particular o efeito da corrente induzida pelo movimento ondulatório junto ao fundo (*wave-induced streaming*). Este fenómeno pode ser observado através da mudança de sinal da velocidade média horizontal ao nível  $z \approx 0.014$  mm, valor coincidente com as experiências de Klopman (1994). Em contraste, a condição  $k - \omega$  para as simulações não conduz a resultados satisfatórios em toda extensão do perfil e as simulações com o modelo  $k - \varepsilon$  não exibem a banda de inversão do sinal da velocidade média.



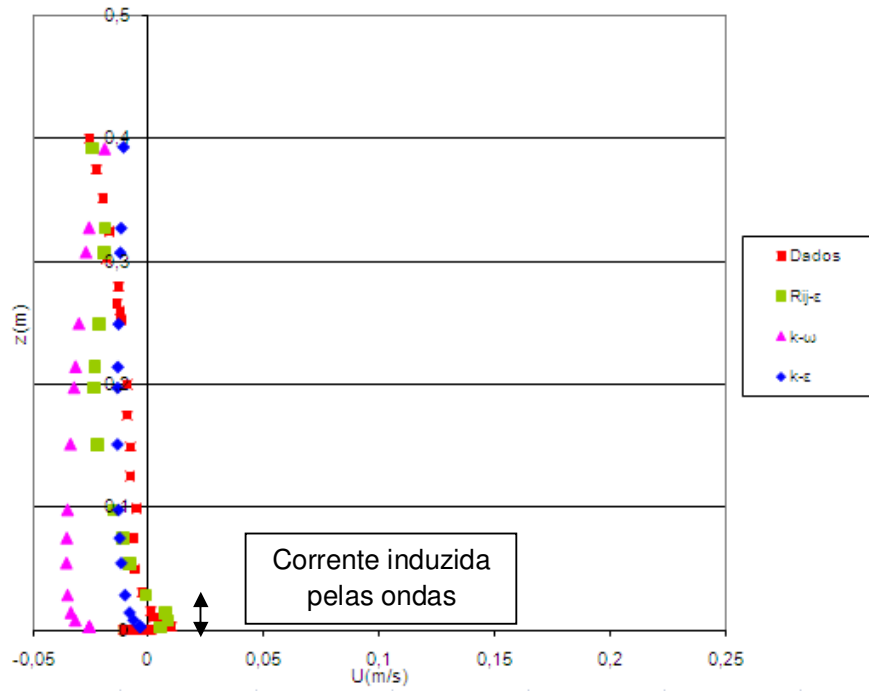


Figura 8 – Perfil de velocidade média horizontal para o caso de presença de apenas ondas

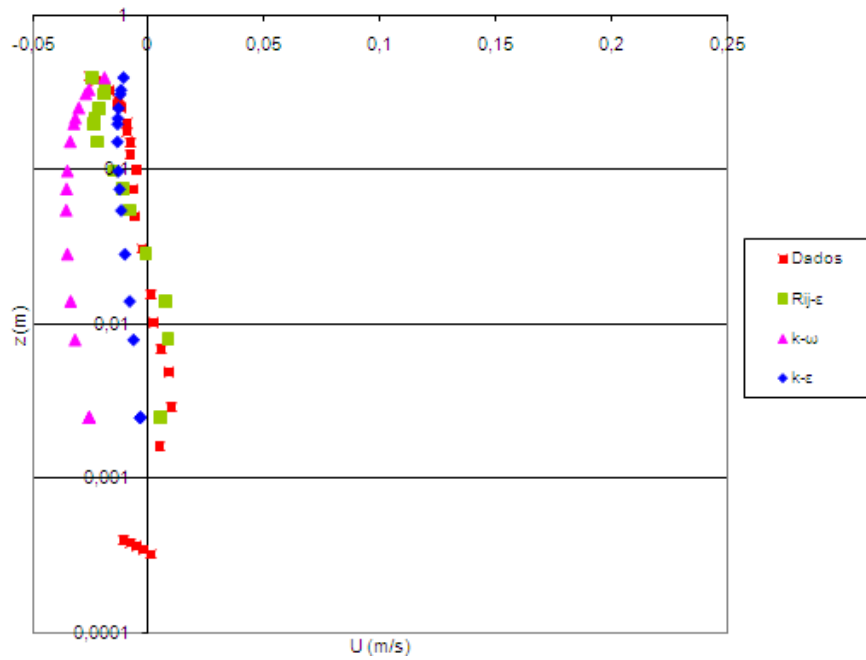
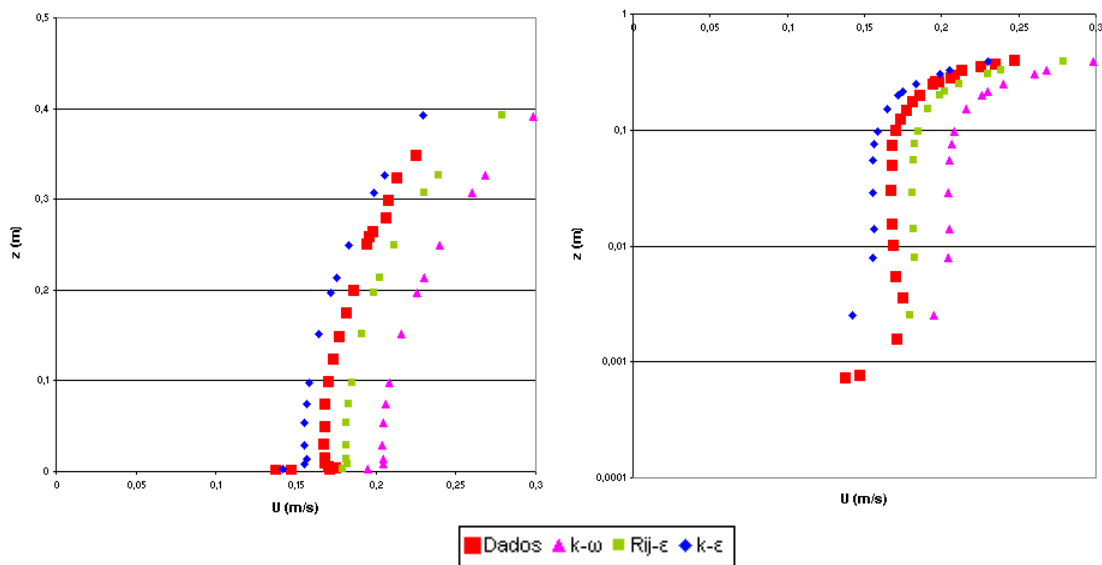


Figura 9 - Perfil de velocidade média horizontal para o caso de presença de apenas ondas em escala semi-logaritmica



**Figura 10** - Perfil da amplitude da velocidade média horizontal para o caso de presença de apenas ondas em escala linear e escala semi-logaritmica

Na Figura 10 estão representados o perfil vertical da amplitude da velocidade média horizontal em escala linear e escala semi-logaritmica. Exceptuando o caso de  $k - \omega$  regista-se uma boa concordância com as medições realizadas. É possível também observar a forma do cosseno hiperbólico para o perfil da amplitude.

### 4.3 ONDAS E CORRENTES NO MESMO SENTIDO

O perfil de velocidade horizontal média da corrente é significativamente alterado pela presença de ondas. A Figura 11 mostra que a velocidade média horizontal diminui na parte superior da coluna de água, estando de acordo com os dados de Klopman (1994) e outras experiências similares. Apenas a modelação da turbulência com o modelo  $R_{ij} - \epsilon$  permite simular este efeito. Tal é confirmado na Figura 12 onde está representado o perfil de velocidade horizontal em escala semi-logaritmica.

Na Figura 13, onde as amplitudes da velocidade media estão representadas, pode-se constatar uma pequena subestimação dos resultados do modelo face às medições. Uma possível explicação para a subestimação observada é que, no presente estudo, a razão da altura de onda relativa à profundidade de água apresenta valores pequenos e por isso aproxima-se de um caso não linear. Deste modo, as cristas das ondas são mais acentuadas e as cavas mais pequenas, pelo que a amplitude das velocidades orbitais são assimétricas e, conseqüentemente, os perfis de velocidade média horizontal podem ser modificados.

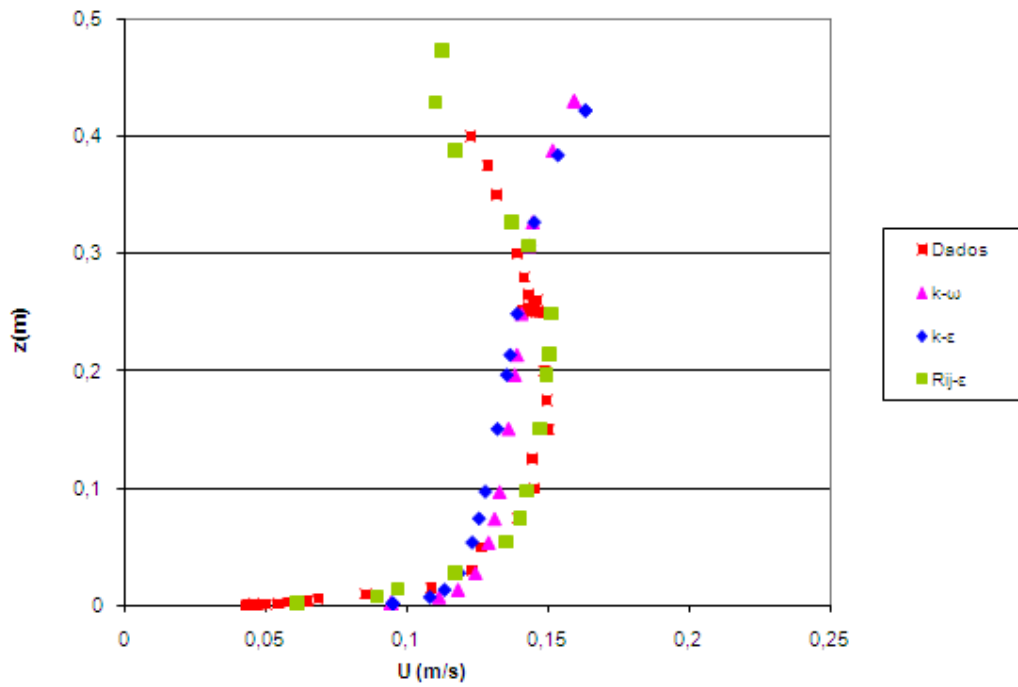


Figura 11 – Perfil de velocidade horizontal para o caso de ondas e correntes no mesmo sentido

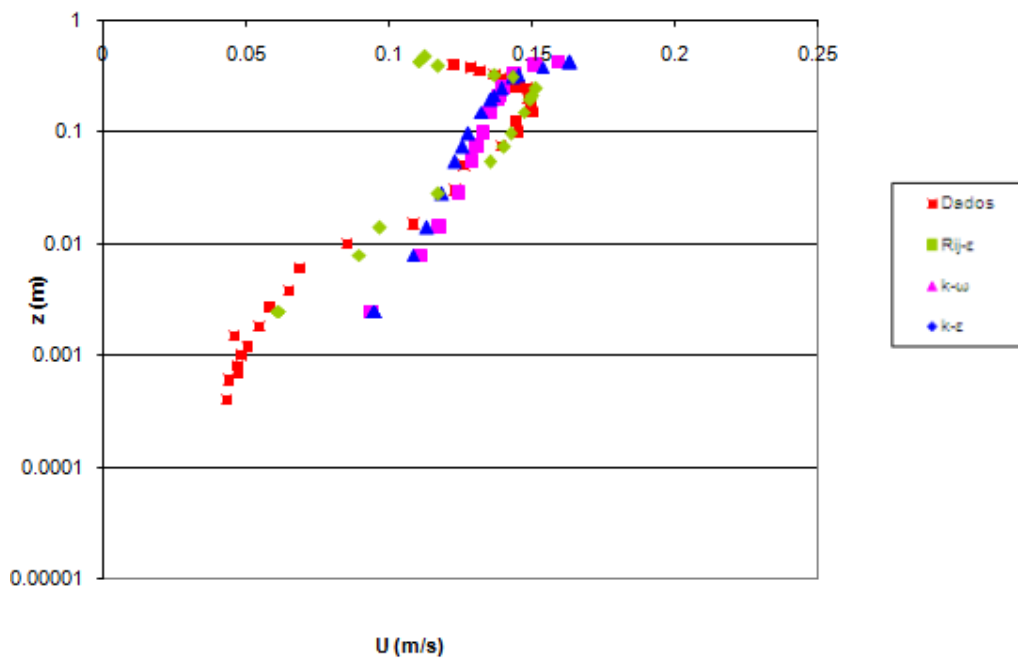
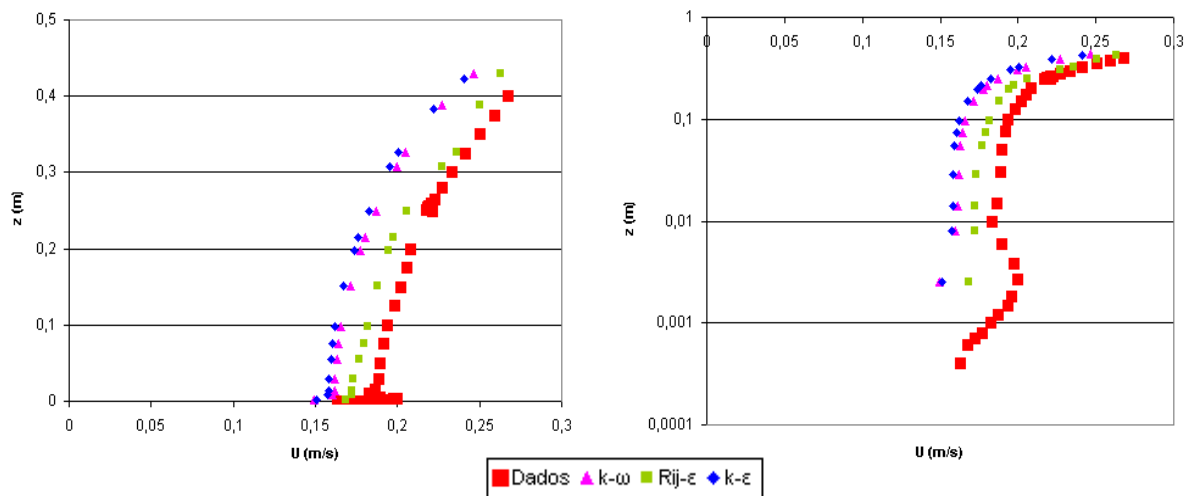


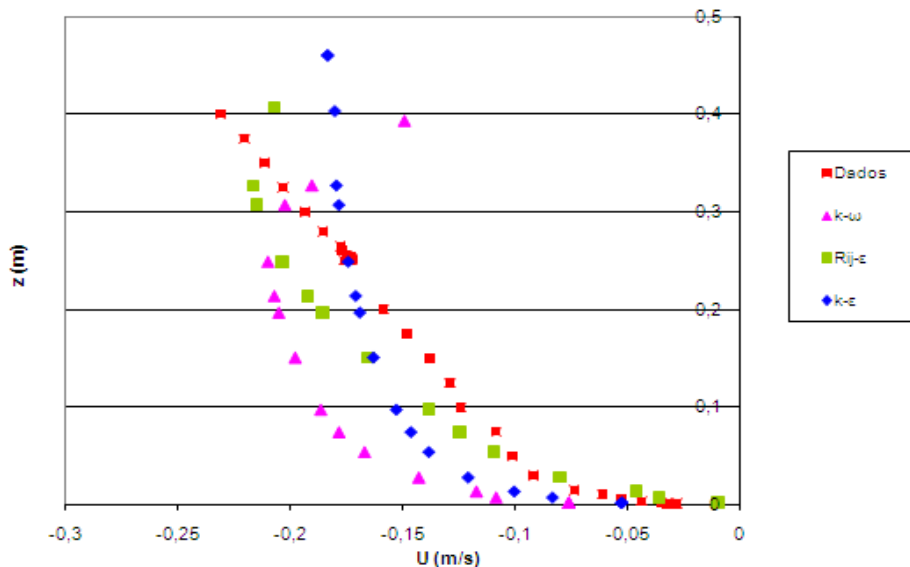
Figura 12 - Perfil de velocidade média horizontal para o caso de ondas e correntes no mesmo sentido em escala semi-logaritmica



**Figura 13** - Perfil da amplitude da velocidade média horizontal para o caso de ondas e correntes no mesmo sentido em escala linear e semi-logaritmica

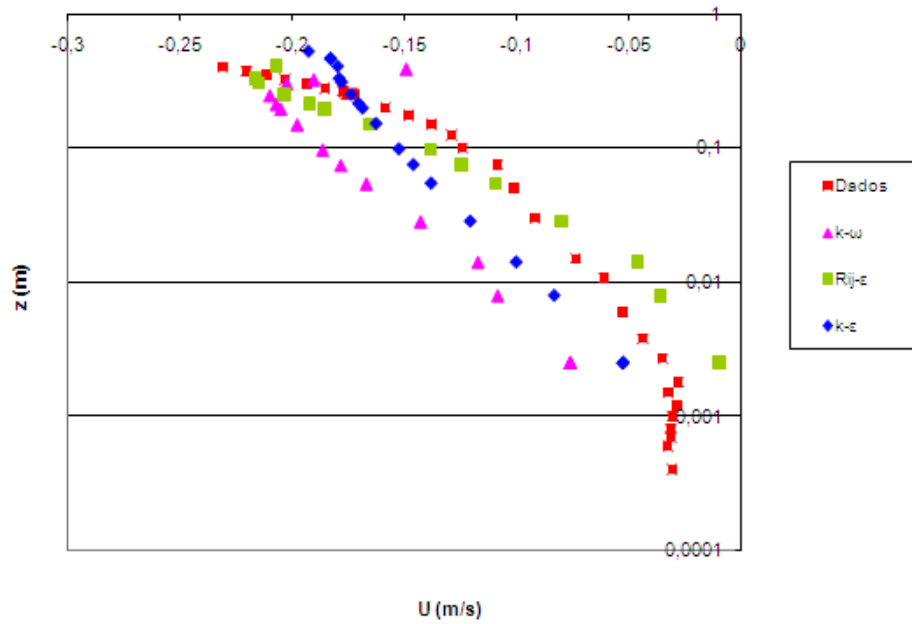
#### 4.4 ONDAS E CORRENTES EM SENTIDOS OPOSTOS

Como último caso modelaram-se ondas e correntes com sentidos opostos. Contrariamente ao que acontece quando as ondas e as correntes estão no mesmo sentido, a velocidade média horizontal aumenta na parte superior da coluna de água.

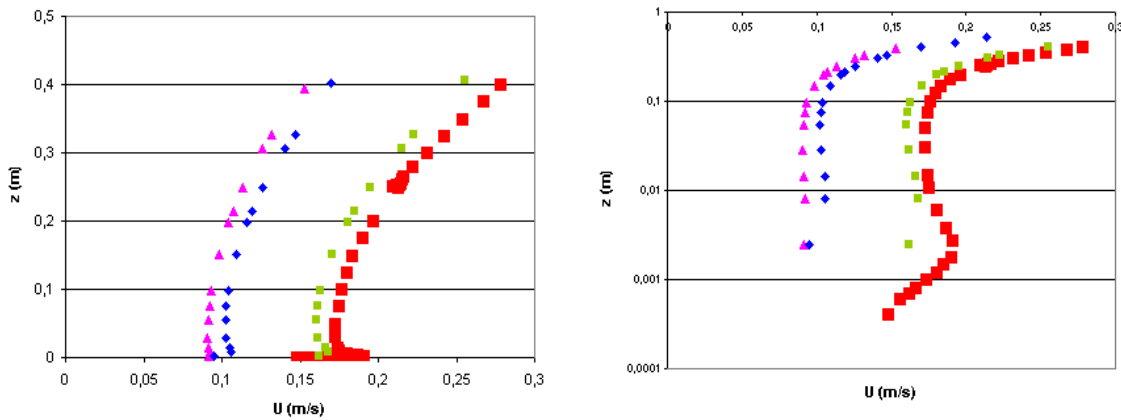


**Figura 14** - Perfil de velocidade média horizontal para o caso de ondas e correntes com sentidos opostos

Mais uma vez com o modelo  $R_{ij} - \epsilon$  obtém-se os melhores resultados. Apesar de uma ligeira sobrestimação a meio da coluna de água e subestimação no limite superior, o modelo reproduz relativamente bem o desenvolvimento vertical da velocidade horizontal média (Figura 14) quando comparado com os dados retirados das experiências de Klopman (1994). A Figura 15, que apresenta o perfil da velocidade média horizontal em escala semi-logarítmica, confirma este aspecto. As diferenças observadas, podem ser explicadas pela quase não linearidade do presente estudo. No limite superior há uma redução do valor das velocidades, podendo ser explicado pelo efeito de deriva de Stokes que tem o sentido de propagação das ondas.



**Figura 15** - Perfil de velocidade média horizontal para o caso de ondas e correntes com sentidos opostos em escala semi-logarítmica



**Figura 16** - Perfil da amplitude da velocidade média horizontal para o caso de ondas e correntes com sentidos opostos em escala linear e semi-logarítmica

A Figura 16 mostra claramente a influência da opção de fecho da turbulência no comportamento do modelo Code\_Saturne na simulação das interações onda-corrente. As opções baseadas em modelos de viscosidade turbulenta revelam erros de viés que são corrigidos somente com o modelo de transporte das tensões de Reynolds ( $R_{ij} - \epsilon$ ).

## 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O modelo Code\_Saturne foi verificado em escoamentos com superfície livre e coexistência de ondas e correntes. Os dados experimentais utilizados são relativos às experiências realizadas por Klopman (1994). Foram testados diferentes casos: escoamento só com correntes, propagação de ondas de superfície, ondas e correntes com o mesmo sentido, e ondas e correntes com sentidos opostos. Testou-se a sensibilidade face ao modelo de fecho de turbulência mais apropriado para este tipo de estudos.

O modelo de transporte de tensões de Reynolds  $R_{ij} - \epsilon$  apresentou os melhores resultados no estudo das interações onda - corrente comparativamente com os resultados obtidos pelos modelos  $k - \epsilon$  e  $k - \omega$ . De facto, este modelo de fecho de turbulência resolve a dissipação turbulenta e as tensões de Reynolds, evitando a aproximação da viscosidade turbulenta, comum aos outros modelos.

A proposta de Nezu e Nakagawa (1993) para a dissipação turbulenta foi essencial para reproduzir o perfil vertical das tensões de Reynolds e da viscosidade turbulenta.

A mudança do gradiente vertical da velocidade no perfil de velocidade horizontal média causada pela presença de ondas no escoamento médio no mesmo sentido e em sentidos opostos é bem representada pelo modelo Code\_Saturne.

## AGRADECIMENTOS

Maria João Teles agradece a bolsa de doutoramento concedida pela Fundação para a Ciência e Tecnologia (SFRH/BD/61269/2009).

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Archambeau, F., Méchitoua, N., Sakiz, M. (2004), Code\_Saturne: a Finite Volume Code for the Computation of Turbulent Incompressible Flows- Industrial Applications, *International Journal on Finite Volumes*, 1(1)

Dean, R. G., Dalrymple, R. A. (1991). *Water wave mechanics for engineers and scientists*, Singapore, : World Scientific Press.

Groeneweg, J., Klopman, G. (1998). Changes of the mean velocity profiles in the combined wave current motion described in a GLM formulation. *Journal of Fluid Mechanics*, 370, 271 - 296

Huang, Z., Mei, C. (2003). Effects of surface waves on a turbulent current over a smooth or rough seabed. *Journal of Fluid Mechanics*, 497, 253 - 287.

Klopman, G. (1994). Vertical Structure of the flow due to waves and currents. Progress report H840.30, Part II. Delft Hydraulics.

Nezu, I., Rodi, W. (1986). Open channel flow measurements with a laser Doppler anemometer. *Journal of Hydraulic Engineering*, 112 (5), 335 - 355.

Nezu, I., Nakagawa, H. (1993). *Turbulence in Open-Channel Flows*, CRC Press.

Olabarrieta, M., Medina, R., Castanedo, S. (2010). Effects of wave-current interaction on the current profile. *Coastal Engineering*, 57 (4), 643 - 655.

Souli, M., Zoloto, J. P. (2001), Arbitrary Lagrangian-Eulerian and free surface methods in fluid mechanics, *Comput. Methods Appl. Mech. Engrg.*, 191 (3-5), 451 – 466.

You, Z. (1996). The effect of wave-induced stress on current profiles. *Ocean Engineering*, 23 (7), 619 - 628.