



MODELAÇÃO NUMÉRICA DA INTERAÇÃO ONDA-ESTRUTURA USANDO MODELOS RANS: A IMPORTÂNCIA DOS MODELOS DE TURBULÊNCIA

Eric Didier¹; Paulo R.F. Teixeira²

¹ LNEC, Portugal; ² FURG, RS-Brasil

edidier@lnec.pt, pauloteixeira@furg.br

Resumo

Os modelos de turbulência usados em modelos do tipo Reynolds-Averaged Navier-Stokes (RANS) aplicados em problemas de interação onda-estrutura necessitam modelar os escoamentos turbulentos complexos que se desenvolvem quando ocorrem rebentação das ondas e galgamento das estruturas. Neste estudo, alguns modelos de turbulência são descritos e duas aplicações ilustram as limitações dos modelos clássicos face aos modelos de turbulência mais adaptados aos escoamentos turbulentos com superfície livre.

Introdução

Os fenómenos hidráulicos que ocorrem na interação entre ondas e estruturas costeiras ou portuárias são complexos e caóticos, particularmente a rebentação das ondas e o galgamento das estruturas, ambos caracterizados por um alto nível de turbulência na zona do escoamento fluido onde se produzem. Existem vários modelos de turbulência, mas se não forem adequados para modelar estes fenómenos, podem levar a resultados incorretos. Alguns modelos de turbulência, clássicos e menos clássicos, são descritos e duas aplicações permitem ilustrar as limitações dos modelos clássicos face aos modelos de turbulência mais adaptados no âmbito da modelação de escoamentos turbulentos com superfície livre.

Equações RANS para a engenharia costeira

As equações RANS são uma forma média das equações de Navier-Stokes, utilizadas para descrever escoamentos de fluidos turbulentos. Em vez de resolver diretamente todas as flutuações turbulentas, as equações RANS modelam o efeito médio da turbulência sobre o escoamento pela aplicação da decomposição de Reynolds, que decompõem as variáveis em uma parte média e flutuante (devida à turbulência). Assim, toma-se a média das equações de Navier-Stokes escritas nesta forma, obtendo-se as equações RANS, compostas das equações em média de continuidade e do movimento, que são, para um fluido incompressível, as seguintes (Schlichting, 1979):

$$\nabla \cdot \bar{\mathbf{u}} = 0$$

$$\rho \frac{\partial \bar{\mathbf{u}}}{\partial t} + \rho (\bar{\mathbf{u}} \cdot \nabla) \bar{\mathbf{u}} = -\nabla \bar{p} + \mu \nabla^2 \bar{\mathbf{u}} + \rho \bar{\mathbf{g}} - \rho \nabla \cdot \overline{\mathbf{u}' \mathbf{u}'}$$

onde $\bar{\mathbf{u}}$ é o vetor velocidade, p a pressão, $\bar{\mathbf{g}}$ a gravidade, ρ a densidade e μ a viscosidade dinâmica.

Esta operação faz aparecer o termo $-\rho \nabla \cdot \overline{\mathbf{u}' \mathbf{u}'}$, denominado tensor das tensões de Reynolds, que representa o efeito médio das flutuações turbulentas. A hipótese de Boussinesq, proposta em 1877, assume uma relação linear entre o tensor de tensões de Reynolds e o gradiente de velocidade média e que a turbulência é isotrópica. Permite fechar o sistema das equações RANS expressando o tensor de Reynolds como uma função da média da velocidade e tratando a turbulência como se fosse uma viscosidade extra, a viscosidade turbulenta, μ_t , modelada com base nas variáveis dos modelos de turbulência.

$$-\rho \nabla \cdot \overline{\mathbf{u}' \mathbf{u}'} = \mu_t \left(\nabla \bar{\mathbf{u}} + (\nabla \bar{\mathbf{u}})^T \right) - \frac{2}{3} \rho k$$



com $k = \frac{1}{2} \overline{u' \cdot u'}$ e I a matriz identidade.

As novas incógnitas adicionadas ao sistema de equação necessitam adotar modelos de turbulência para fechar o sistema. Os modelos de turbulência mais comumente utilizados são os modelos com duas equações, já que oferecem um bom compromisso entre precisão e custo computacional. Estes modelos resolvem duas equações de transporte adicionais para grandezas relacionadas à turbulência, geralmente a energia cinética turbulenta, k , e uma grandeza relacionada à dissipação da turbulência, ε , ou frequência da turbulência, ω . Existem outros modelos mais complexos, tal como o modelo de Tensões de Reynolds RMS (Reynolds Stress Model) capturando a anisotropia da turbulência, mas necessitam recursos computacionais muito elevados e são incompatíveis para aplicações na engenharia costeira.

A utilização das equações RANS para modelar escoamentos com superfície livre (RANS-VOF), tal como na engenharia costeira, necessita definir a posição da interface entre água e ar. A técnica de captura de interface mais comum, o método Volume of Fluid (VOF), consiste numa equação de transporte de um escalar, a fração de volume α , que varia entre 0 (ar) e 1 (água). Assim, a densidade e viscosidade do fluido são ponderadas conforme a fração de volume local, permitindo definir as zonas com ar e água e a posição da interface (superfície livre).

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \nabla \cdot \vec{u} \alpha = 0$$

Modelos de turbulência para modelação de escoamentos com equações RANS-VOF

Duas zonas de escoamento podem ser identificadas num canal (e tanque) de ondas: uma zona de propagação na qual o escoamento é quasi-potencial e uma zona na qual o escoamento é turbulento em função dos fenómenos que ocorrem, como a interação entre a onda e um corpo, a rebentação e o galgamento da onda. Dentro dos numerosos modelos de turbulência, são só apresentados a seguir alguns clássicos e mais adequados para modelação dos escoamentos RANS-VOF, e que foram utilizados em varias aplicações pelos autores.

Brown et al. (2016), Larsen e Fuhrman (2018), e Didier e Teixeira (2022) mostram que o modelo padrão de turbulência $k-\varepsilon$ (Harlow et al., 1968), modelo o mais comum e muito usado em engenharia (simples e robusto, adequado para escoamentos totalmente turbulentos com alto número de Reynolds), tende de gerar um excesso de produção de turbulência que aumenta a viscosidade turbulenta, causando o decaimento da elevação da superfície livre ao longo do canal de ondas e do tempo, atenuando a rebentação das ondas e subestimando o galgamento. Este modelo gera uma falsa viscosidade turbulenta, não física, na própria zona de propagação da onda, na qual o escoamento é quasi-potencial. O modelo $k-\omega$ SST (Menter, 1994) (modelo híbrido usando $k-\varepsilon$ longe da parede e $k-\omega$ perto, Wilcox (1993), eficiente em aerodinâmica e escoamentos em redor de corpos) limita o problema de excesso de produção de turbulência, mas não o elimina, e o decaimento da elevação da superfície livre ao longo do canal de ondas e do tempo se produz, embora não sendo tão significativo que o modelo $k-\varepsilon$.

Uma técnica alternativa consiste em aproveitar as características do escoamento ao longo do canal, particionando o domínio computacional numa zona na qual o escoamento é laminar, modelando um escoamento quasi potencial, e uma segunda na qual o modelo de turbulência é aplicado, modelando a turbulência conforme os fenómenos que ocorrem (Didier e Teixeira, 2023). Se esta metodologia de modelo de turbulência híbrido (laminar/turbulento) funciona muito bem com o modelo $k-\omega$ SST, o problema de excesso de produção de turbulência persiste com os modelos $k-\varepsilon$ padrão e $k-\varepsilon$ Realizable (uma forma mais avançada do modelo $k-\varepsilon$).

Os modelos de turbulência alternativos e mais preformantes são os modelos com tensor de tensões de Reynolds não lineares, como o modelo $k-\varepsilon$ NLS (Shih e Zhu, 1996; Lin e Liu, 1998), e modelos desenvolvidos recentemente por Larsen e Fuhrman (2018), tal como o modelo $k-\varepsilon$ SCM (Stabilized Closure Model), nos quais o crescimento de produção turbulenta e da viscosidade turbulenta é controlado e evitado a traves de equações e limitadores resultando de

uma análise de estabilidade dos modelos de turbulência padrões. Larsen e Fuhrman (2018) aplicam a mesma metodologia para os modelos de turbulência, $k-\omega$ e $k-\omega$ SST, entre outros.

Quando se pretende modelar a interação entre ondas e estruturas porosas, tal como os quebra-mares com enrocamentos e/ou blocos artificiais, apenas os modelos de turbulência $k-\varepsilon$ são adaptados para considerar os efeitos turbulentos dentro dos meios porosos através formulações e termos específicos adicionados às equações RANS-VOF (Nakayama e Kuwahara, 1999).

Os dois exemplos apresentados nas seções seguintes ilustram, entre as várias condições exigidas para garantir a confiabilidade dos resultados de simulações, a importância de adotar na modelação numérica da interação onda-estrutura um modelo de turbulência adequado.

Exemplo de um dispositivo conceitual de tipo galgamento integrado num quebra-mar

O dispositivo de tipo galgamento composto de dois reservatórios integrados num quebra-mar com declive de 30° no fim de um canal de onda com fundo horizontal foi testado à escala 1:16 por Liu et al. (2018). A Figura 1 apresenta, para uma onda incidente regular com $T=1s$ e $H=0.05m$, o escoamento e enchimento do reservatório inferior e a elevação média do nível de água no reservatório inferior obtida com vários modelos de turbulência (Didier e Teixeira, 2023). A falha do modelo $k-\varepsilon$ é evidente, em que o excesso de produção de turbulência impede o enchimento do reservatório. O desempenho é melhorado com o modelo híbrido $k-\varepsilon$, mas não acerta com os resultados experimentais. O modelo $k-\omega$ SST apresenta um bom comportamento neste caso, embora parece existir um início de sobreprodução nos últimos galgamentos, situação que o modelo híbrido $k-\omega$ SST permite resolver. Os dois modelos $k-\varepsilon$ NLS e $k-\varepsilon$ SCM apresentam o mesmo desempenho e um muito bom acordo com os resultados experimentais.

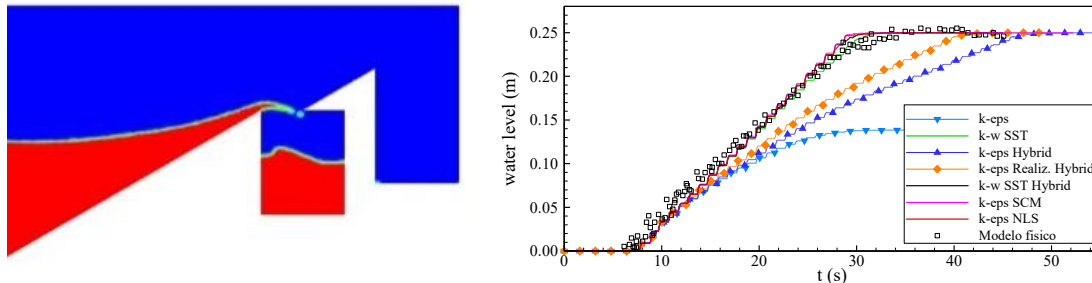


Figura 1. Quebra-mar com os dois reservatórios e elevação do nível de água no reservatório inferior para os modelos de turbulência e o modelo físico (adaptado de Didier e Teixeira, 2023).

Exemplo de um quebra-mar submerso

O quebra-mar submerso, com declive 1:2 e composto de duas camadas foi estudado em modelo físico por Lara et al. (2006). A Figura 2 apresenta os envelopes do máximo, η_{max} , e mínimo, η_{min} , da elevação de superfície livre para uma onda incidente irregular com $Tp=2.4s$ e $Hs=0.1m$ obtida em modelo físico e com três modelos de turbulência (Didier e Teixeira, 2022). Embora o modelo $k-\varepsilon$ apresente um acordo correto com o envelope mínimo η_{min} , o envelope máximo η_{max} é largamente subestimado devido ao excesso de viscosidade turbulenta gerada pelo modelo. Já com os dois modelos $k-\varepsilon$ NLS e SCM, é observado um perfeito acordo com os obtidos no modelo físico. O decrescimento do envelope η_{max} em cima do quebra-mar devido à rebentação da onda se verifica, tal como no modelo físico. Nesta aplicação, foram apenas considerados modelos de turbulência $k-\varepsilon$ já que só estes modelos permitem tomar em conta os efeitos turbulentos nos meios porosos através termos adicionais nas equações RANS-VOF.

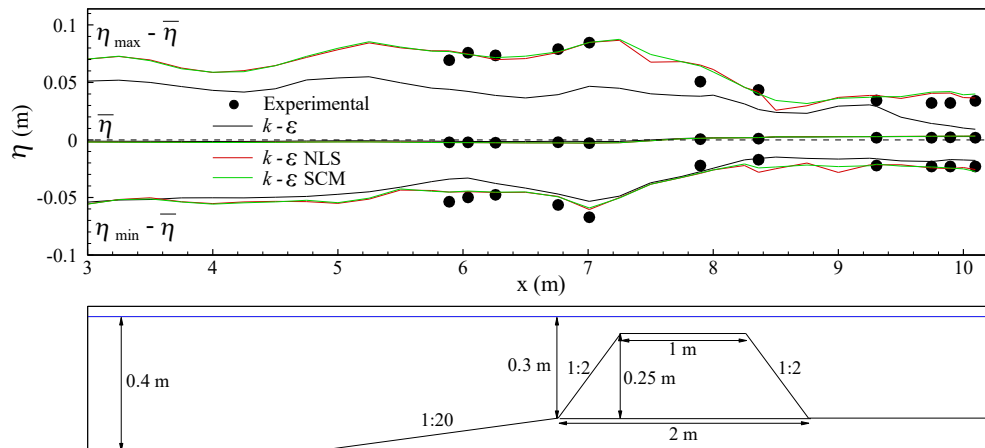


Figura 2. Envelope no modelo físico e numérico, $T_p=2.4s$ e $H_s=0.1m$ e esquema do modelo de quebra-mar submerso (adaptado de Didier e Teixeira, 2022).

Referências Bibliográficas

- Brown, S.A., Greaves, D.M., Magar, V., e Conley, D.C. (2016). "Evaluation of turbulence closure models under spilling and plunging breakers in the surf zone". *Coast. Eng.*, 114, 177-193.
- Didier, E., e Teixeira, P.R.F. (2022). "Validation and comparisons of methodologies implemented in a RANS-VoF numerical model for applications to coastal structures". *Journal of Marine Science and Engineering*, 10, 1298.
- Didier, E., e Teixeira, P.R.F. (2023). "A RANS-based numerical model to simulate overtopping-type wave energy converters integrated into breakwaters". *IJOPE*, 33(4), 420-427.
- Harlow, F.H., e Nakayama, P. (1968). "Transport of Turbulence Energy Decay Rate". University California Report LA-3854; Los Alamos Science Lab.: Los Alamos, New Mexico, USA, 1968.
- Lara, J.L., Garcia, N., e Losada, I.J. (2006). "RANS modeling applied to random wave interaction with submerged permeable structures". *Coast. Eng.*, 53, 395-417.
- Larsen, B.E., e Fuhrman, D.R. (2018). "On the over-production on turbulence beneath surface waves in Reynolds-averaged Navier-Stokes models". *J. Fluid Mech.*, 853, 419-460.
- Lin, P.Z., e Liu, P.L.F. (1998). "A numerical study of breaking waves in the surf zone". *J. Fluid Mech.*, 359, 239-264.
- Liu, Z., Han, Z., Shi, H., e Yang, W. (2018). "Experimental Study on Multi-level Overtopping Wave Energy Converter under Regular Wave Conditions". *Int J Nav Archit Ocean Eng*, 10, 651-659.
- Menter, F.R. (1994). "Two-Equation Eddy-Viscosity Turbulence Models for Engineering Applications". *AIAA J.*, 32, 1598-1605.
- Nakayama, A., e Kuwahara, F. (1999). "A macroscopic turbulence model for flow in a porous medium". *J. Fluids Eng.*, 121, 427-433.
- Schlichting, H., 1979. "Boundary-layer theory". McGraw-Hill, New York.
- Shih, T.-H., e Zhu, J. (1996). "Calculation of wall-bounded complex flows and free shear flows". *Int. J. Numer. Methods Fluids*, 23, 1133-1144.
- Wilcox, D.C. (1993). "Turbulence Modeling for CFD". DCW Industries, Inc.: La Canada, CA, USA.