

SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DO COMPORTAMENTO HIDRODINÂMICO EM RESERVATÓRIO RASO

*Rhayanna Kalline do Nascimento*¹; *Vinicius Alexandre Sikora de Souza*² & *Johannes Gerson Janzen*³

Resumo – O processo de sedimentação em reservatórios ainda não é bem conhecido, mas sua compreensão é de grande importância para o gerenciamento de recursos hídricos ao considerarem-se as consequências da deposição de sedimentos em reservatórios sob o ponto de vista econômico. Neste estudo pretende-se apresentar resultados de simulações tridimensionais do escoamento em um reservatório retangular raso. Para a realização do mesmo os resultados numéricos, obtidos do uso do software comercial CFX-12, são comparados com resultados experimentais e numéricos bidimensionais obtidos por Kantoush *et al.* (2008), além de analisar a influência dos modelos de turbulência em uma simulação. Com isso obteve-se uma simulação para cada modelo estudado. Analisando as simulações foi possível concluir que para diferentes modelos de turbulências há diferentes comportamentos do fluxo que interage com o sistema. Além disso, constatou-se que aparentemente os resultados obtidos diferiu-se dos dados medidos por Kantoush *et al.* (2008).

Abstract – The process of sedimentation in reservoirs is not well known, but their understanding is of great importance for the management of water resources when considering the effects of sediment deposition in reservoirs under the economic point of view. This study is to present results of three-dimensional simulations of flow in a rectangular shallow reservoir. To achieve the same numerical results, obtained from the use of commercial software CFX-12 are compared with experimental and numerical results obtained by two-dimensional Kantoush *et al.* (2008), to analyze the influence of turbulence models in a simulation. Thus we obtained a quote for each model. Analyzing the simulations it was concluded that for different models of turbulence for different behaviors of the flow that interacts with the system. Moreover, it was found that apparently the results differed from the data measured by Kantoush *et al.* (2008).

Palavras-Chave – Modelos de turbulência, Modelação tridimensional, CFD.

¹ Graduando em Engenharia Ambiental pela UNIR, Rua Rio Amazonas nº 351, 76900-000 Ji-Paraná. E-mail: rhayannakalline@hotmail.com

² Graduando em Engenharia Ambiental pela UNIR, Rua Rio Amazonas nº 351, 76900-000 Ji-Paraná. E-mail: vass1000@hotmail.com

³ Professor Adjunto 2 da UFMS, PGTA, Cidade Universitária S/N, Campo Grande-MS. E-mail: johannesjanzen@gmail.com

1. INTRODUÇÃO

O processo de sedimentação em reservatórios rasos ainda não é bem conhecido, mas sua compreensão é de grande importância para o gerenciamento de recursos hídricos ao considerarem-se as consequências da deposição de sedimentos em reservatórios sob o ponto de vista econômico.

A simulação numérica de reservatórios é uma tarefa bastante complexa, pois envolve uma grande quantidade de parâmetros. Porém, para Cordeiro *et al.* (2007) a simulação é uma ferramenta crucial no gerenciamento de reservatórios. Como confirma Castro (2010), modelos matemáticos permitem a avaliação de cenários alternativos, possibilitando testar distintas estratégias de gestão dos recursos hídricos.

Sabe-se que a sedimentação depende do padrão do escoamento existente no reservatório. O padrão de escoamento típico geralmente inclui a separação na entrada, acompanhada das regiões de recirculação e de estagnação. Nos reservatórios rasos, onde a dimensão vertical, H , é bem menor que a menor dimensão na direção horizontal, L , ou $H/L \ll 1$, o escoamento frequentemente é considerado como sendo bidimensional, sendo empregados modelos bidimensionais. É fato que os modelos bidimensionais são capazes de representar bem a circulação horizontal (paralela ao fundo do reservatório), mas não são adequados para simular a circulação vertical. Kantoush *et al.* (2008) recomendam o uso de modelos tridimensionais para capturar a circulação vertical.

Por conseguinte, neste artigo pretende-se apresentar resultados de simulações tridimensionais do escoamento em um reservatório retangular raso. Os resultados numéricos são comparados com resultados experimentais e numéricos bidimensionais obtidos por Kantoush *et al.* (2008). Além de analisar a influência dos modelos de turbulência em uma simulação tridimensional constando assim sua importância.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Geometria e Condições de Contorno

A Figura 1 apresenta o reservatório raso simulado neste estudo. A geometria e as condições de contorno para as simulações numéricas são iguais a de Kantoush *et al.* (2008). O reservatório possui 6,0 m de comprimento e 4,0 m de largura, com fundo horizontal e hidraulicamente liso (rugosidade $n = 0,1$). Os canais de entrada e saída possuem 0,25 m de largura e 1,0 m de comprimento. A profundidade de água é 0,20 m. A vazão é de 7,0 l/s.

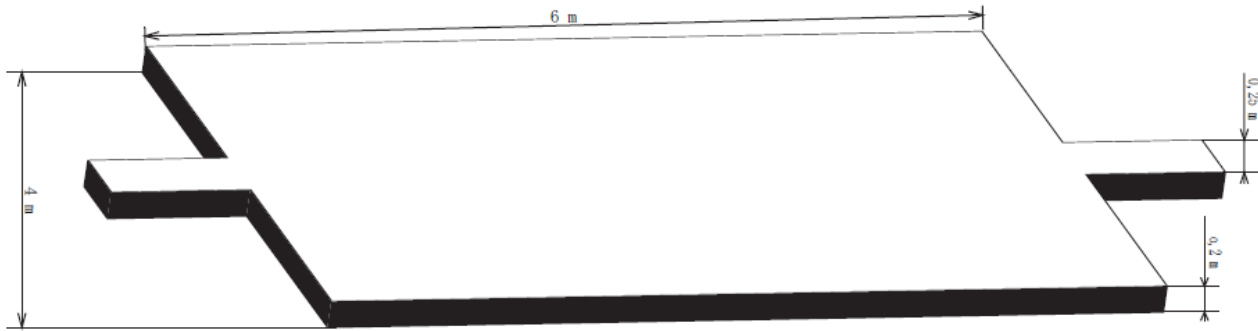


Figura 1. Visualização do reservatório retangular e definição dos parâmetros geométricos.

2.2. CFD

Computational Fluid Dynamics (CFD) é uma ferramenta computacional utilizada para resolver as equações de conservação de massa, energia e quantidade de movimento utilizando técnicas numéricas. No presente estudo, a simulação foi realizada através do uso do software comercial CFX-12. Diversos modelos de turbulência foram empregados visando avaliar sua performance em reproduzir o comportamento hidrodinâmico obtido experimentalmente. As opções disponíveis no CFX-12 são κ - ϵ , κ - ω , *Shear Stress Transport* (SST), *Eddy Viscosity Transport* (EVT) e *Omega-Based Reynolds Stress Model* (RSM). Mais informações dos modelos de turbulência são encontradas na Tabela 1.

Tabela 1. Visão geral dos modelos de turbulência empregados no presente estudo.

κ - ϵ	Modelo que resolve duas equações de transporte: (1) energia cinética, turbulenta, κ , (2) taxa de dissipação de energia, ϵ .
κ - ω	Modelo que resolve duas equações de transporte. (1) energia cinética, turbulenta, κ , (2) taxa de dissipação de energia que incorpora modificações para baixos números de Reynolds, ω .
RSM	Fecha as equações médias de Navier-Stokes através da solução das equações de transporte para as tensões de Reynolds, junto com uma equação para a taxa de dissipação.
SST	Modelo é mais completo em relação aos modelos k - ϵ e k - ω , pois segundo Venson <i>et al.</i> (2007) introduz uma nova equação, a do transporte de tensões de cisalhamento turbulentas. Este modelo é mais recomendado em simulações onde se requer uma grande precisão das condições nas diferentes camadas do escoamento.
EVT	Modelo simples, baseado no modelo k - ϵ , nesse modelo as flutuações causadas pela densidade do fluido são consideradas desprezíveis ao contrário do k - ϵ .

A Figura 2 apresenta a malha utilizada nas simulações. A malha é composta por 291450 elementos e 112361 nós.

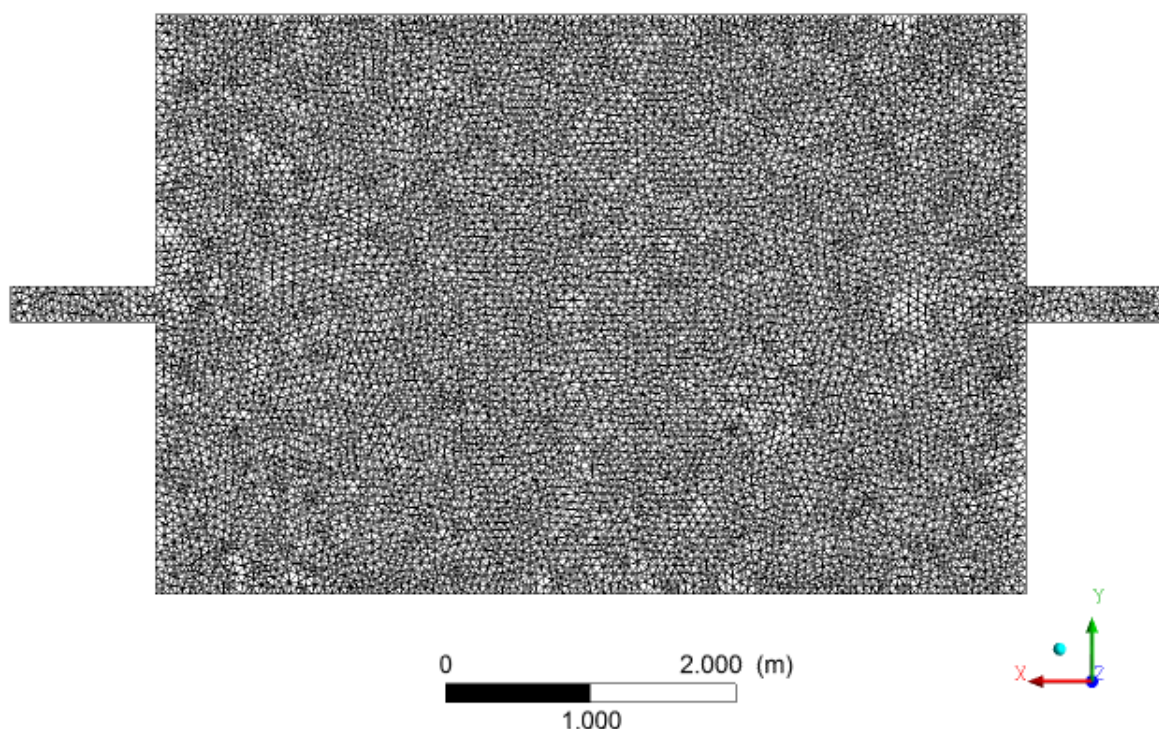


Figura 2. Malha utilizada nas simulações.

Nas simulações foram empregadas as seguintes condições de contorno: no fundo e nas laterais foi utilizada a condição de não-deslizamento. A superfície foi admitida como um plano rígido simétrico, isto é, todos os gradientes normais de velocidade são iguais a zero. Logo, o fluido deslizará sob esta sem interferências da mesma em seu escoamento. Na entrada, foi considerada velocidade horizontal uniforme e velocidade vertical igual a zero. Na saída, a pressão foi especificada igual a 0 Pa, para que assim não houvesse resistência na saída do fluxo.

3. RESULTADOS

3.1. Distribuição Horizontal da velocidade

A Fig. 3 mostra o comportamento hidrodinâmico no interior do reservatório para os diferentes modelos de turbulência. No modelo $k-\varepsilon$ (Figura 3a) é possível observar duas zonas de recirculação nas laterais do reservatório, o que ocasiona na falta de interação do fluxo de entrada com o reservatório, ou seja, a maior parte do fluxo principal atravessa o sistema sem interagir com o mesmo. Também é possível observar que as regiões que apresentam velocidades maiores estão concentradas no interior das zonas de recirculação e próximas a saída. No modelo $k-\omega$ (Figura 3b) o fluxo no interior do reservatório apresenta o seguinte comportamento: inicialmente o escoamento desloca-se para a direita e ao longo do escoamento retorna para o meio. Diferente do modelo anterior, o comportamento deste fluxo aparenta ter maior interação com o sistema. Observa-se que

também há duas zonas de recirculação, sendo uma (lado esquerdo) bem maior que a outra (lado direito próximo a saída) – diferente do modelo $k-\epsilon$. Destaca-se também que este modelo apresenta regiões com velocidades altas em maior quantidade do que o modelo anterior.

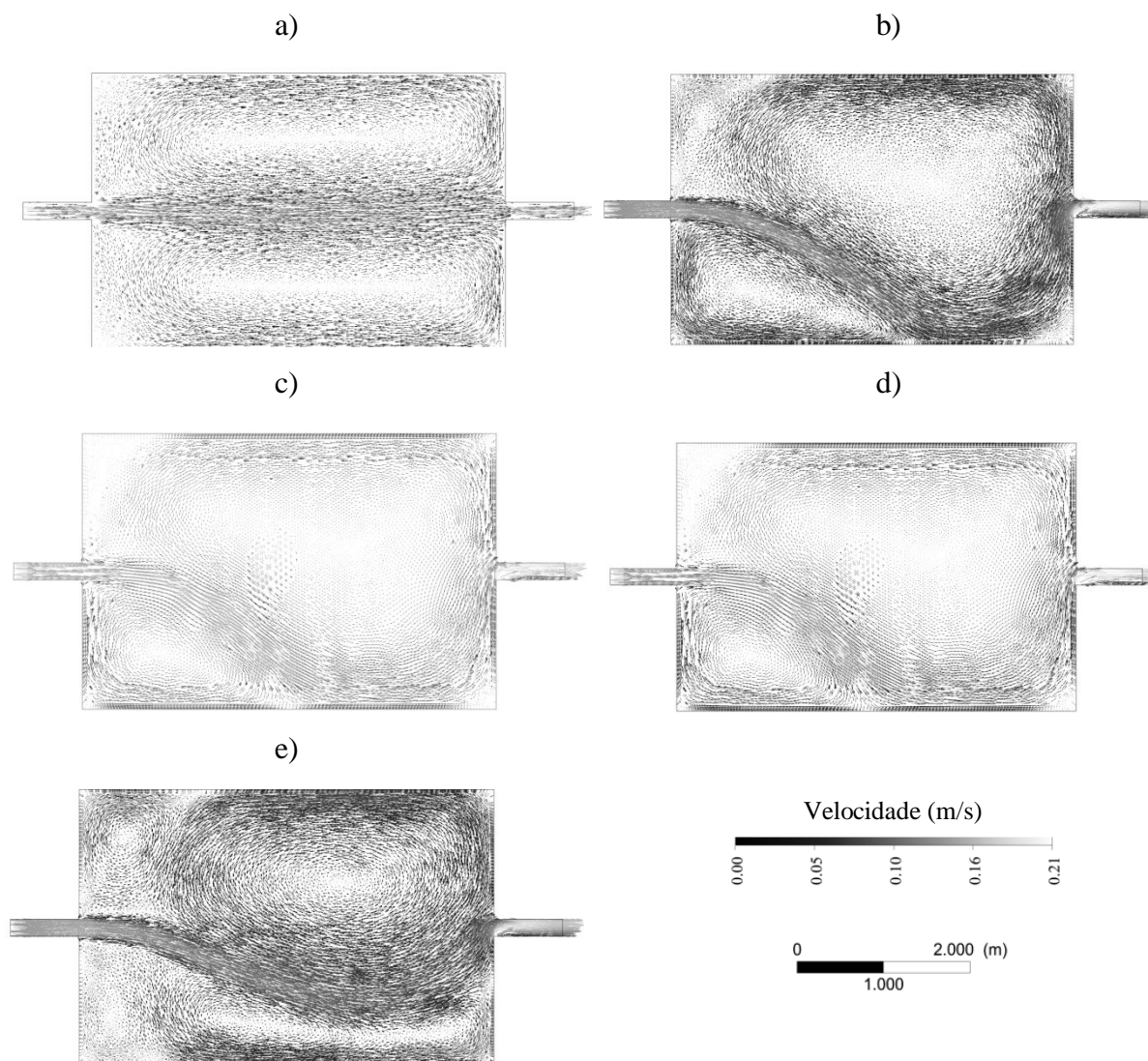


Figura 3. Comportamento do fluxo para diferentes modelos de turbulência: a) $k-\epsilon$; b) $k-\omega$; c) *eddy viscosity transport*; d) *SST*; e) *Omega-Based Reynolds Stress*.

Na Figura 3c (modelo *eddy viscosity transport*) o comportamento do fluxo não difere muito do observado na Figura 3b. Nota-se, visualmente, que neste caso a velocidade do fluxo apresenta valores maiores quando comparado com o modelo $k-\omega$. Além disso, é possível perceber pequenas zonas de recirculação ao longo do fluxo principal e nas zonas de recirculação maiores. Já o comportamento do fluxo considerando o modelo *SST* (Figura 3d), apresenta as mesmas características observadas nas Figuras 3b e 3c, diferindo somente no posicionamento das zonas de recirculação. É notável que a maior parte do fluido que entra no sistema permanece no mesmo, devido às zonas de recirculação – situação vista nos modelos das Figuras 3b e 3c. Já na Figura 3e

(modelo RMS), visualiza-se uma maior quantidade de vórtices de recirculação, além da presença marcante de velocidades baixas. Neste modelo, o fluxo principal pouco interage com o sistema, comportamento visto também na Figura 3a.

Ressalta-se, além disso, que o comportamento observado nos modelos SST, *k- ω* e *eddy viscosity* concordaram com os resultados observados por Kantoush *et al.* (2008), pois tal estudo verificou por meio das técnicas de UVP e LSPIV, que em tal reservatório após a emissão do jato, o fluxo principal tende para o lado direito, gerando um redemoinho principal grande e estável, girando no sentido contrário, e dois vórtices pequenos de forma aproximadamente triangular girando no sentido horário nos dois cantos a montante do reservatório. Sendo que esse padrão de circulação se sustenta por causa da inércia do giro principal, que empurra o jato de entrada de lado.

3.2. Distribuição vertical da velocidade

A Fig. 4 mostra a distribuição vertical da velocidade para as três direções coordenadas x, y e z (u, v e w, respectivamente) na seção localizada em $x = 3,625$ m em relação a entrada (Figura 4).

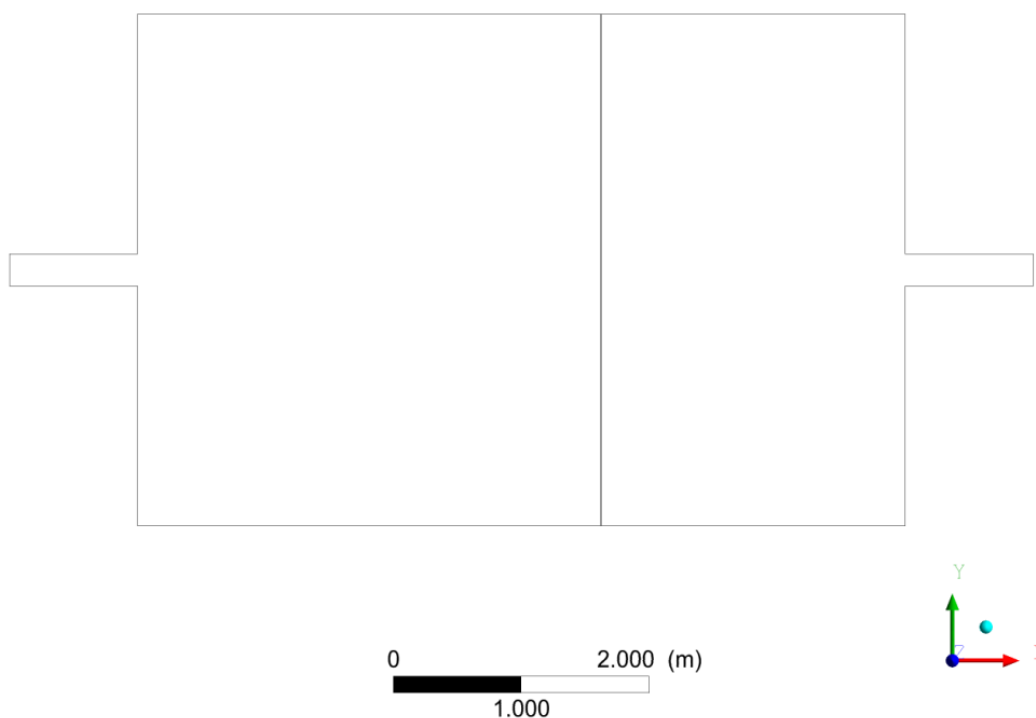


Figura 4. Demonstração da seção localizada em $x = 3,625$ m em relação a entrada.

Os mapas de contorno, da posição $x = 3,625$ m, de velocidade modular são observados na Figura 5 e o de velocidade vertical na Figura 6 para os modelos de turbulência testados.

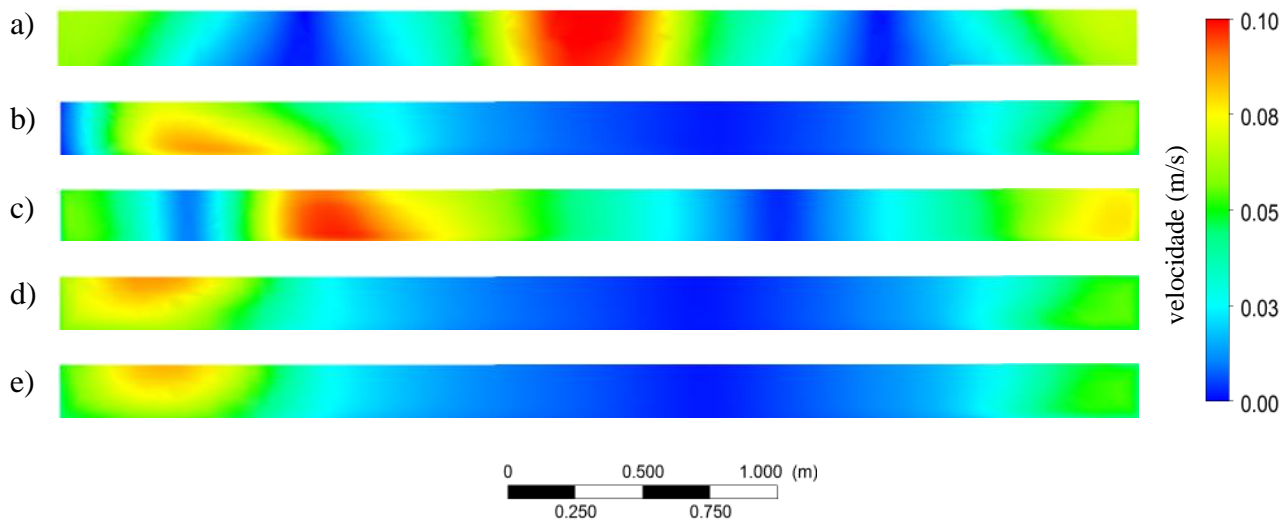


Figura 5. Mapa de contorno de velocidade modular para diferentes modelos de turbulência: a) $k-\varepsilon$; b) $k-\omega$; c) RMS ; d) SST ; e) EVT .

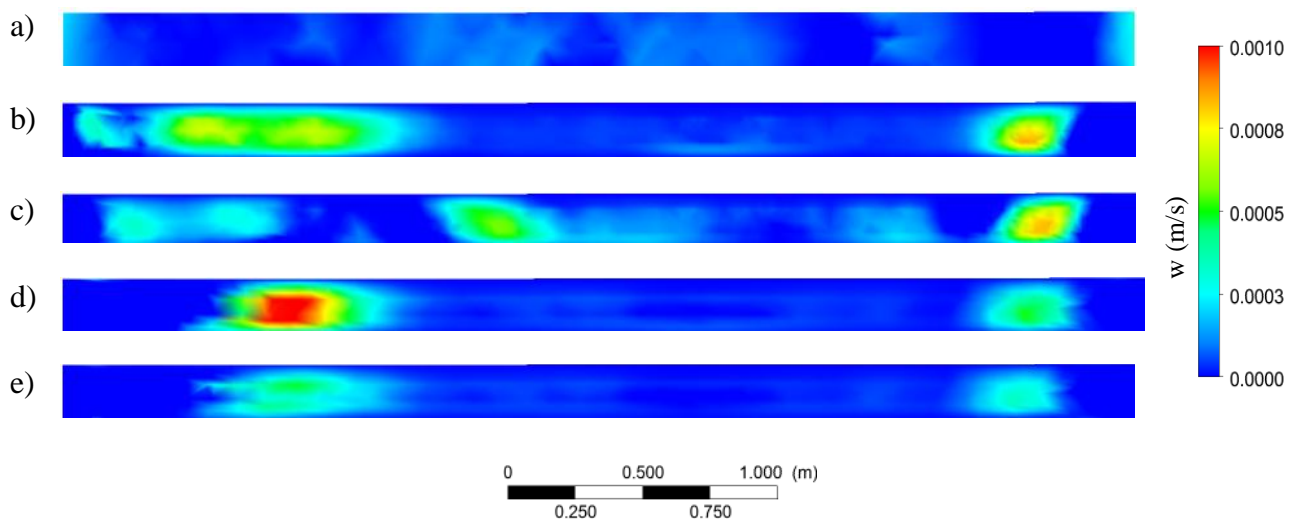


Figura 6. Mapa de contorno de velocidade vertical (w) para diferentes modelos de turbulência: a) $k-\varepsilon$; b) $k-\omega$; c) RMS ; d) SST ; e) EVT .

Ao analisar a Figura 5, constata-se que o modelo $k-\varepsilon$ apresentou sua velocidade modular máxima no centro, onde no entorno do mesmo percebe-se a existência de duas zonas de baixa velocidade, sendo posteriormente o fluxo empurrado para as paredes, apresentando desta forma velocidade média. No entanto as velocidades verticais, Figura 6, nesse modelo são imperceptíveis, pois o mesmo tenderam a 0.

Nas Figuras 5 e 6, consta-se ainda que no modelo $k-\omega$ o fluxo com velocidade modular máxima encontra-se próxima a parede a esquerda e as zonas de baixa velocidade são observadas no meio do eixo y , sendo essa mesma característica de fluxo verificada nos perfis de velocidade vertical.

As mesmas tendência de fluxo do modelo $k-\omega$ também foi observado nos modelos SST e EVT , verificou-se ainda nesses modelos, que os mesmos produziram resultados visualmente idênticos em relação a distribuição da velocidade modular. No entanto ao comparar-se a distribuição das velocidades verticais destes modelos, denotou-se que a amplitude das zonas de velocidade máxima são de menor extensão nos modelos SST e EVT em comparação ao modelo $k-\omega$, além disso, o modelo SST apresentou a maior magnitude de velocidade vertical do que em todos os modelos testados.

Em relação ao modelo de turbulência RSM , verificou-se que o mesmo apresentou a zona de velocidade modular máxima próxima ao centro do eixo y , como no modelo $k-\varepsilon$, sendo este, no entanto mais deslocado para esquerda. O perfil de velocidade vertical deste apresentou comportamento similar ao do modelo $k-\omega$, no entanto foi de menor magnitude.

No que concerne a Figura 7, verifica-se que em todos os modelos gerou-se zonas de recirculação vertical próximo a parede da direita, sendo apenas os modelos SST e EVT que apresentaram tais zonas na parede esquerda também.

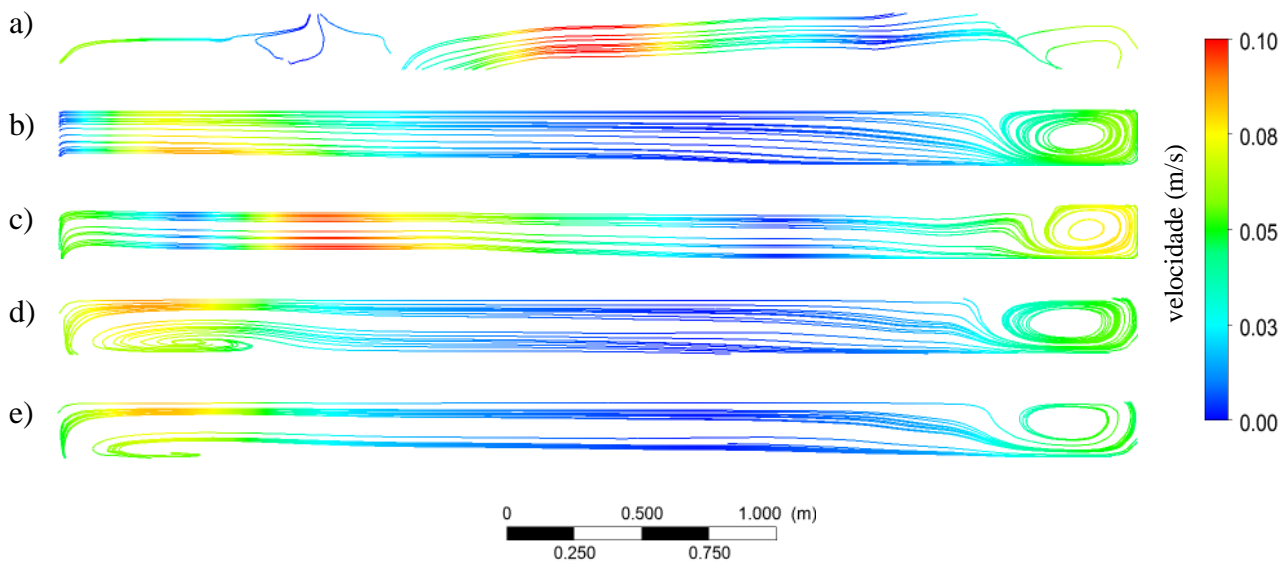


Figura 7. Linha de corrente da velocidade na posição $x = 3,625$ m, para diferentes modelos de turbulência: a) $k-\varepsilon$; b) $k-\omega$; c) RMS ; d) SST ; e) EVT .

Nota-se que os modelos $k-\varepsilon$ (Figura 8a) e RMS (Figura 8e) apresentam velocidade vertical w bem menor que a velocidade horizontal, sugerindo um comportamento quase bidimensional dos escoamentos rasos. Acordando dessa forma com os resultados aferidos por Kantoush *et al.* (2008) em seu estudo, o qual por meio das técnicas de UVP e LSPIV verificou velocidades verticais são bastante pequenas em comparação com os horizontais, confirmando o caráter superficial 2D do reservatório.

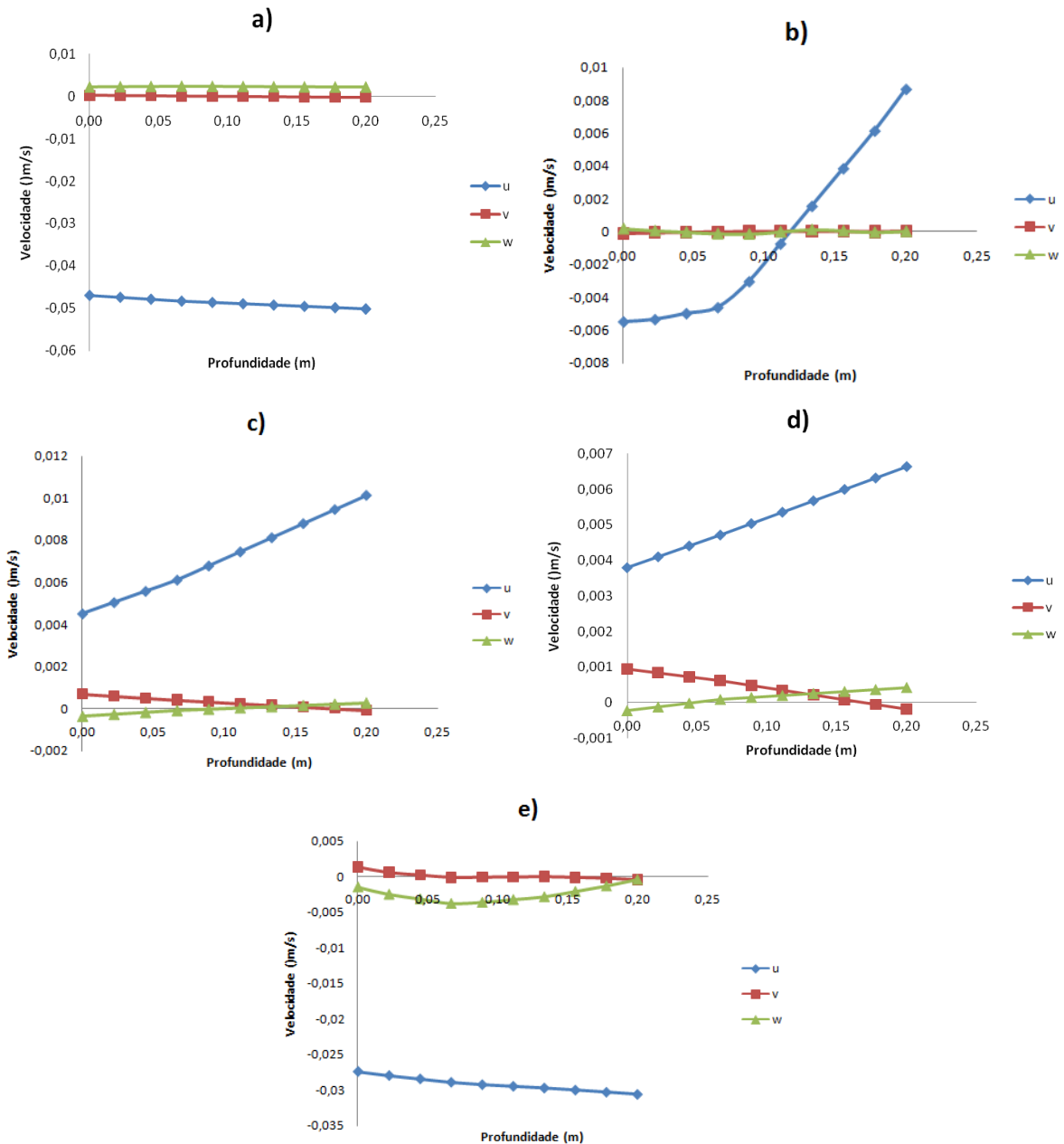


Figura 8. Distribuição vertical da velocidade para os diferentes modelos de turbulência: a) *k-epsilon*; b) *k-ômega*; c) *eddy viscosity transport*; d) SST; e) RMS.

Destaca-se, no entanto, que diferente os modelos *eddy viscosity transport* e *SST*, respectivamente Figuras 8c e 8d, apresentaram a velocidade vertical do sistema bem maior do que as horizontais. Como já foi visto anteriormente (Figura 3), as velocidades horizontais (u e v) encontram-se no intervalo entre 0 e 0,005 em todos os modelos simulados.

Um comportamento peculiar foi apresentado pelo modelo *k-omega*, pois neste a velocidade vertical w inicialmente é baixa quando próxima do fundo do reservatório, mas aumenta significativamente de acordo com a profundidade. Vale à pena lembrar que a distribuição vertical da velocidade em um rio aluvial é importante para conhecer o transporte de sedimento suspenso.

3.3. Comparação

Ao comparar os módulos de velocidade em relação ao eixo x (comprimento) dos dados obtidos nas simulações com os fornecidos por Kantoush *et al.* (2008) – Figura 6 - observa-se que o perfil de velocidade dos modelos *k-epsilon* e *eddy viscosity transport* apresentam um comportamento parecido com o encontrado por Kantoush *et al.* (2008) na simulação bidimensional. Acordando dessa forma com o autor supracitado, pois se observa na interface entre a entrada e o reservatório, um aumento de velocidade súbita, seguida por uma diminuição gradual em toda a extensão do reservatório. Além disso, segundo Kantoush *et al.* (2008) o aumento repentino de velocidade pode estar relacionado com a influência súbita do redemoinho de recirculação que produz o cisalhamento significativo entre o jato e a água estagnada, pois a distribuição de velocidade horizontal do jato é influenciado, antes da difusão do jato se torna mais relevante.

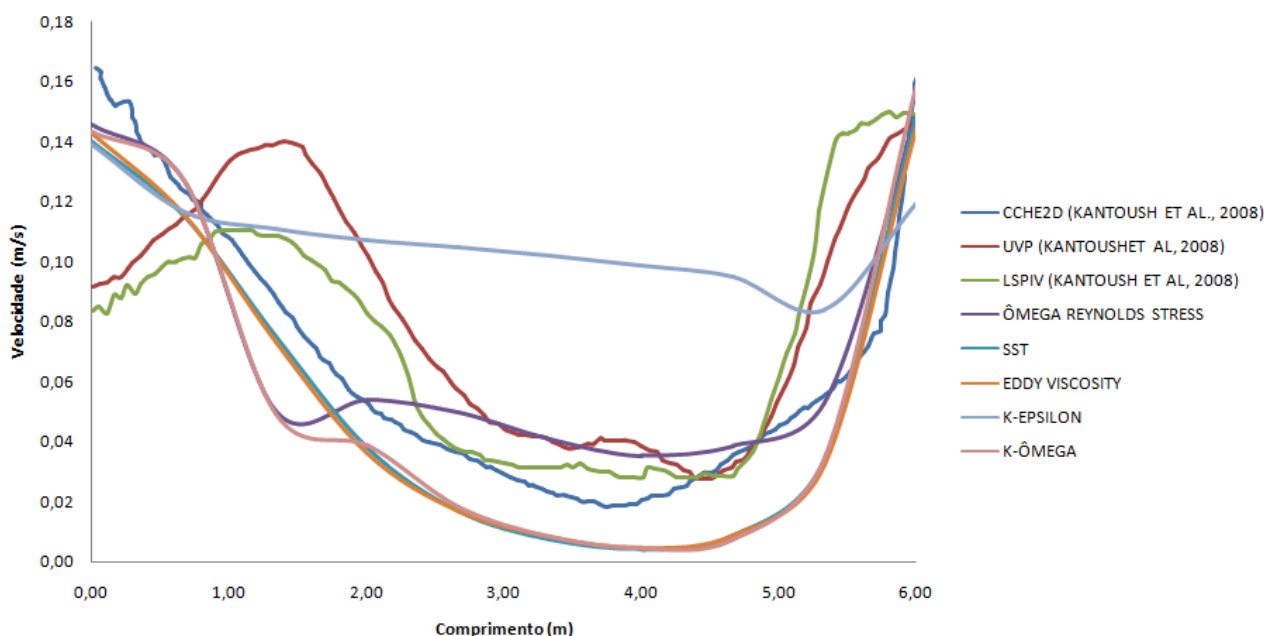


Figura 6. Comparação dos perfis de velocidade dos resultados obtidos com os de Kantoush *et al.* (2008).

Observa-se ainda que a similaridade desses modelos testados que as flutuações turbulentas causadas pela densidade do fluido nessa problemática são insignificantes.

Destaca-se também que visualmente nenhum dos resultados obtidos pelas simulações se aproxima dos dados experimentais de Kantoush *et al.* (2008). Obviamente nota-se que mesmo não tendo uma aproximação significativa, a maioria das simulações se comportam de forma parecida com os dados obtidos em laboratório, visto que as velocidades das simulações diminuem e aumentam em intervalos comuns aos dos dados experimentais. É possível que a discrepância observada seja ocasionada devido a outras variáveis que não foram definidas para as simulações e nem controladas para os experimentos. Assim como constata Wilcox (1998) sobre a existência de

situações extremamente difíceis de serem modeladas e transformadas em equações para tratamento numérico o que acaba distorcendo a solução do problema.

Ressalta-se ainda que o modelo *SST* produziu um resultado muito diversificado, quando comparado ao demais, pois o mesmo apresentou uma velocidade constante em relação a profundidade, visto que esta peculiaridade pode ser devido a esta função garantir transições suaves entre os modelos $k-\omega$ e $k-\varepsilon$, assim confirma a constatação de Bardina *et al.* (1997), que tal modelo não é tão robusto a fluxos muito turbulentos.

4. CONCLUSÃO

Analisando as simulações foi possível concluir que para diferentes modelos de turbulências há diferentes comportamentos do fluxo que interage com o sistema. Como também que os modelos de turbulência podem ou não apresentam alta significância quando relacionados com a velocidade.

Além disso, constatou-se que aparentemente os resultados obtidos por Kantoush et al. (2008) não apresentam diferenças significativas quando comparado com os resultados das simulações tridimensionais. Porém, através destas foi possível observar não só o comportamento horizontal, mas também o vertical do fluxo.

BIBLIOGRAFIA

ADAMSSON, A.; STOVIN V.; BERGDAHL, L. (2003). “*Bed Shear Stress Boundary Condition for Storage Tank Sedimentation*”. Journal of Environmental Engineering. ASCE ., pp. 651-658.

BARDINA, J.E., HUANG, P.G. e COAKLEY, T.J. (1997). “*Turbulence Modeling, Validation, Testing and Development*”. NASA Technical Memorandum 110446.

BISCARINI, C.; FRANCESCO, S. Di; MANCIOLA, P. (2009). “*CFD modelling approach for dam break flow studies*”. Journal Hydrology and Earth System Sciences (HESS).

CASTRO, M.M. (2010). *Modelação matemática de lagos e reservatório*. Dissertação (mestrado em Engenharia Civil). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 226 p.

CORDEIRO, A.F. et al. (2007). “*Simulação da injeção de água em reservatórios empregando CFD*” in Anais do 4º Congresso Brasileiro de P&D em Petróleo e Gás - PDPETRO. Campinas, SP, 2007.

DEWALS, B. J. et al. (2008). “*Experimental and numerical analysis of flow instabilities in rectangular shallow basins*”. Environ Fluid Mech. Springer Science Business Media B.V., pp. 31-54.

DIAS, G.J.; COUTINHO, A.L.G.A.; MARTINS, R.P. (2005) “*Modelagem tridimensional do lançamento de cascalhos de perfuração de poços de petróleo em águas profundas*” in Anais do 3º Congresso Brasileiro de P&D em Petróleo e Gás - PDPETRO. Salvador, BA., 2005.

KANTOUSH, S.A et al. (2008). “*Flow field investigation in a rectangular shallow reservoir using UVP, LSPIV and numerical modeling*”. *Flow Measurement and Instrumentation*, v. 19, pp. 139-144.

SHILTON, A. (2001). *Studies into the Hydraulics of Waste Stabilisation Ponds*. Doctorate Thesis. Institute of Technology and Engineering, Massey University; Palmerston North, New Zealandm, 280 p.

WENDT, T. (2009) *Aplicação de modelo computacional hidrodinâmico a jusante de uma estrutura hidráulica*. Dissertação (mestrado em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental). Universidade Federal do Paraná. Paraná, 107 p.

WILCOX, D. C. (1998). *Turbulence modelling for CFD*. Ed. 2, La Cañada, DCW Industrie, 540 p.