

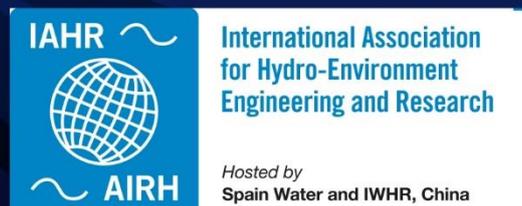
XXX CLH

CONGRESO LATINOAMERICANO
DE HIDRAULICA | BRASIL | 2022

ANALES

- VOLÚMEN 1 -

MECÁNICA DE LOS FLUIDOS E HIDRÁULICA
FUNDAMENTAL



Organizadores

Dr. Cristiano Poletto - UFRGS (Presidente)
Dr. José Gilberto Dalfré Filho - UNICAMP
Dr. André Luís Sotero Salustiano Martim - UNICAMP

**ANALES DEL
XXX CONGRESO LATINOAMERICANO DE
HIDRÁULICA 2022**

**- VOLÚMEN 1 -
MECÁNICA DE LOS FLUIDOS E HIDRÁULICA
FUNDAMENTAL**



Madrid – España
2023

Copyright © 2023, by IAHR Publishing.

Derechos Reservados en 2023 por **IAHR Publishing.**

Montaje: Cristiano Poletto

Organización General de la Obra: Cristiano Poletto; José Gilberto Dalfré Filho;
André Luís Sotero Salustiano Martim

Maquetación: Juliane Fagotti; Cícero Manz Fagotti

Relectura General: Elissandro Voigt Beier

Portada: Juliane Fagotti

Cristiano Poletto; José Gilberto Dalfré Filho; André Luís Sotero Salustiano Martim
(Organizadores)

ANALES del XXX Congreso Latinoamericano de Hidráulica – VOLÚMEN 1 –
MECÁNICA DE LOS FLUIDOS E HIDRÁULICA FUNDAMENTAL / Organizadores:
Cristiano Poletto; José Gilberto Dalfré Filho; André Luís Sotero Salustiano Martim –
MADRI, España: IAHR Publishing, 2023.

380p.: il.;

ISBN • 978-90-832612-2-5

*ES AUTORIZADA la libre reproducción, total o parcial, por cualquier medio, sin
autorización escrita del Editor o de los Organizadores.*

AVALIAÇÃO DE MODELOS DE TURBULÊNCIA PARA ANÁLISE DE PRESSÕES MÉDIAS EM SIMULAÇÃO NUMÉRICA DE RESSALTO HIDRÁULICO

João Pedro Paludo Bocchi¹, Daniela Guzzon Sanagiotto², Eder Daniel Teixeira³ e Lucas Camargo da Silva Tassinari⁴

^{1,2,3,4}Instituto de Pesquisas Hidráulicas / Universidade Federal do Rio Grande do Sul (IPH/UFRGS). Brasil

¹jp.bocchi@gmail.com, ²dsanagiotto@ufrgs.br, ³eder.teixeira@ufrgs.br, ⁴lucascstassinari@gmail.com

RESUMO:

O ressalto hidráulico é um fenômeno físico caracterizado pela alta dissipação de energia, fato que proporciona grande aplicabilidade em obras de engenharia. A avaliação experimental deste fenômeno tradicionalmente é realizada via instrumentação de modelos físicos hidráulicos. Contudo, as simulações computacionais vêm se apresentando como uma alternativa interessante para explorar avaliações impossibilitadas em modelos físicos, complementando-as. Uma das técnicas mais utilizadas na modelagem computacional de escoamentos é a utilização das equações RANS, as quais necessitam utilizar modelos de turbulência para o fechamento das mesmas. O presente artigo tem como objetivo avaliar o comportamento de quatro diferentes modelos de turbulência (modelos $k-\varepsilon$, $k-\omega$, $RNG\ k-\varepsilon$ e $SST\ k-\omega$) frente à simulação CFD de um ressalto hidráulico em uma bacia de dissipação de energia. Foi simulado o escoamento sobre o vertedouro e bacia de dissipação de um modelo físico hidráulico, em escala 1:32, da Usina Hidrelétrica Porto Colômbia. As simulações foram realizadas no software Ansys CFX, utilizando-se o método VOF homogêneo para modelar o escoamento multifásico. Os resultados de pressões médias obtidos nas simulações foram comparados com os valores adquiridos experimentalmente, em sete pontos distribuídos entre a curva de concordância e a bacia de dissipação. Foram observados erros relativos médios de 5,80%, 7,85%, 4,00% e 20,05% para os modelos de turbulência $k-\varepsilon$, $k-\omega$, $RNG\ k-\varepsilon$ e $SST\ k-\omega$, respectivamente. Nota-se que o modelo $RNG\ k-\varepsilon$ apresenta o menor erro relativo médio para as condições simuladas na avaliação de pressões médias. Portanto, nota-se que a escolha correta do modelo de turbulência possui influência direta nos resultados de pressões médias para estas condições de simulação.

ABSTRACT:

Hydraulic jump is a physical phenomenon characterized by high energy dissipation, which provides great applicability in engineering. The experimental evaluation of this phenomenon is traditionally performed by probing and measuring hydraulic physical models. However, computational simulations have been presented as an interesting alternative to evaluate parameters that are impossible in physical models. One of the most used techniques in computational modeling of fluids are the RANS equations, which needs turbulence models to perform its closure. This study aims to evaluate the behavior of four different turbulence models ($k-\varepsilon$, $k-\omega$, $RNG\ k-\varepsilon$ and $SST\ k-\omega$) in a CFD simulation of a hydraulic jump stilling basin. The flow over the spillway chute and stilling basin of a 1:32 scale hydraulic physical model of the Hydroelectric Power Plant of Porto Colombia was simulated. The simulations were performed in Ansys CFX, using the homogeneous VOF method to model the multiphase flow. The results of mean pressure obtained in the simulations were compared with the mean pressure obtained experimentally in seven gauges distributed between the spillway curve and the stilling basin. Average relative errors of 5.80%, 7.85%, 4.00% and 20.05% were observed for $k-\varepsilon$, $k-\omega$, $RNG\ k-\varepsilon$ and $SST\ k-\omega$ turbulence models, respectively. Note that the $RNG\ k-\varepsilon$ model presents the smallest mean relative error for the simulated conditions in the evaluation of mean pressure. Therefore, it is noted that the correct choice of the turbulence model has a direct influence on the mean pressure results for these simulation conditions.

PALAVRAS-CHAVE: ressalto hidráulico; CFD; modelos de turbulência

INTRODUÇÃO

O ressalto hidráulico corresponde a um escoamento bruscamente variado, caracterizado pela transição abrupta entre um escoamento supercrítico, a montante, para um escoamento subcrítico, a jusante, em um processo altamente dissipativo em termos energéticos (HAGER, 1992). As bacias de dissipação de energia por ressalto hidráulico se utilizam dessa característica para a sua funcionalidade, onde a dissipação de energia cinética turbulenta, oriunda da energia potencial da água armazenada no reservatório, ocorre a fim de diminuir as velocidades do escoamento a jusante, reduzindo o potencial erosivo (CHANSON, 2015). O ressalto hidráulico nesse tipo de estrutura ocorre geralmente de forma afogada, onde o rolo do ressalto desloca-se para junto da calha do vertedouro.

Tradicionalmente a avaliação de parâmetros e padrões de escoamento sobre estruturas hidráulicas é realizada através do ensaio e instrumentação de modelos físicos hidráulicos (MFH) (HELLER, 2011; PFISTER; CHANSON, 2012), o que também inclui a avaliação de bacias de dissipação por ressalto hidráulico. Todavia, a análise a partir desta metodologia possui certas limitações, decorrentes, por exemplo, dos equipamentos de bombeamento, espaço laboratorial, instrumentos disponíveis, entre outros.

Nesse cenário, apresenta-se outra estratégia para a avaliação de fenômenos hidráulicos: simulações fluidodinâmicas computacionais (CFD), que permitem descrever fenômenos que envolvem escoamentos de fluidos. Assim, as simulações computacionais se apresentam como um caminho presente e futuro interessante para a avaliação de ressaltos hidráulicos (CHANSON, 2009a, 2009b). Todavia, essa abordagem também possui diversas limitações, principalmente com relação aos altos custos computacionais para descrever todas as escalas de turbulência do escoamento, o que é agravado ainda mais em escoamentos altamente turbulentos, com geometrias complexas e com características multifásicas, como é o caso de bacias de dissipação por ressalto hidráulico.

Dentro das simulações em CFD, existem técnicas para reduzir estes custos computacionais, onde simulam-se as maiores escalas de turbulência, enquanto as menores escalas de turbulência são modeladas. Dentre essas técnicas destaca-se a modelagem numérica das equações médias de Navier-Stokes (RANS), as quais são obtidas a partir da aplicação da decomposição de Reynolds às equações de Navier-Stokes. Nessa técnica, os parâmetros decorrentes das flutuações de velocidades, denominados tensões de Reynolds ($-\rho \overline{u_i' u_j'}$), são modelados a partir de modelos de turbulência (FERZIGER; PERIC, 2002).

Em simulações CFD de ressaltos hidráulicos, uma ampla gama de modelos de turbulência é utilizada. Viti, Valero e Gualtieri (2018) apresentam uma revisão bibliográfica sobre simulações numéricas de ressaltos hidráulicos, destacando alguns trabalhos que utilizaram técnicas baseadas em RANS em suas simulações, apresentando os respectivos modelos de turbulência utilizados, ano de publicação e número de Froude de montante do ressalto hidráulico. Dentre os modelos de turbulência apresentados, destacam-se os modelos $k-\varepsilon$, $k-\omega$, $RNG k-\varepsilon$ e $SST k-\omega$.

Alguns trabalhos realizaram comparações entre diferentes tipos de modelos de turbulência para outros tipos de escoamento, como escoamento sobre um vertedouro em degraus (BAI; ZHANG, 2017), no interior de um tubo plano (CANLI; ATES; BILIR, 2018) e no entrono de uma bola de golfe (HART, 2016).

O presente artigo tem como objetivo avaliar o comportamento dos quatro modelos de turbulência supracitados frente à simulação CFD de um ressalto hidráulico em uma bacia de dissipação de energia. Foi simulado o escoamento sobre o vertedouro e bacia de dissipação de um MFH, em escala 1:32, da Usina Hidrelétrica (UHE) Porto Colômbia, de propriedade da Eletrobras Furnas, localizada no Rio Grande, entre os estados de Minas Gerais e São Paulo, Brasil.

METODOLOGIA

Para a simulação numérica, foi utilizado o software Ansys CFX (ANSYS, 2009). Foram realizadas simulações tridimensionais e em regime permanente a partir do método dos volumes finitos. As equações resolvidas numericamente são as equações da continuidade (Equação 1) e da conservação da quantidade de movimento (Equação 2).

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j)}{\partial x_j} = 0 \quad [1]$$

$$\frac{\partial \rho u_j}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p'}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu_{eff} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] + S_M \quad [2]$$

Onde ρ é a massa específica do fluido, t é a variável independente tempo, u_{ij} é a velocidade, p' é a pressão modificada, μ_{eff} é a viscosidade efetiva e S_M é o somatório das forças de corpo. A viscosidade efetiva μ_{eff} é dada pelo somatório da viscosidade molecular (μ) e da viscosidade turbulenta (μ_t).

Todavia, o modelo matemático utilizado no presente trabalho se deu a partir das equações médias relativas às equações [1] e [2]. Aplicando a decomposição de Reynolds na forma $u_i = \bar{u} + u'$ nas equações [1] e [2], obtêm-se as seguintes equações.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \bar{u}_j)}{\partial x_j} = 0 \quad [3]$$

$$\frac{\partial \rho \bar{u}_j}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \bar{u}_i \bar{u}_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p'}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu_{eff} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \overline{\rho u'_i u'_j} \right) + S_M \quad [4]$$

Estas são denominadas as equações médias da continuidade [3] e de Navier-Stokes [4], comumente denominadas RANS, acrônimo para o termo em inglês *Reynolds Averaged Navier-Stokes*. Nota-se, na equação [4], que ainda existe um termo oriundo das flutuações de velocidade ($-\rho \overline{u'_i u'_j}$). Esse termo é denominado de tensões de Reynolds, o qual deve ser modelado por equações adicionais ao problema que possuam quantidades conhecidas. Diversos são os modelos de turbulência conhecidos e a avaliação dos mesmos para um caso específico é objetivo deste trabalho. Os modelos de turbulência avaliados serão apresentados na sequência.

Foi utilizado o modelo de escoamento multifásico Volume of Fluid (VOF) homogêneo, descrito por Hirt e Nichols (1981) e já implementado ao código do Ansys CFX. Sinteticamente, no VOF a interface entre os fluidos (água e ar, no caso do presente estudo) é definida por uma variável (α) que representa a parcela de preenchimento da célula de cálculo com um dos dois fluidos envolvidos. Assim, $0 \leq \alpha \leq 1$, onde, quanto mais próximo o valor de α da unidade, a célula está preenchida com o fluido de referência e, analogamente, quanto mais próxima de zero, está preenchida com o fluido secundário. As trocas envolvidas na interface são resolvidas a partir de um equação de adveccção (MONTEIRO, 2018).

O domínio simulado consiste em parte do reservatório da UHE, onde foi aplicada a condição de contorno de entrada, no vertedouro de soleira controlada por comporta segmento, seguido pela calha, curva de concordância, bacia de dissipação, soleira terminal e canal, onde foi aplicada a condição de contorno de saída. O domínio simulado é uma fatia com largura de 1,00 m, em escala de protótipo, representativa do vão do vertedouro.

Para todos os casos utilizou-se uma mesma malha prismática irregular, com um esquema de inflação de malha a partir da calha do vertedouro e fundo da bacia de dissipação. Ainda, se utilizou um refinamento de malha na região de ocorrência do ressalto hidráulico, com uma dimensão característica de 5 mm. A malha utilizada resultou em $2,968 \times 10^6$ elementos e $5,843 \times 10^5$ nós. A Figura 1 apresenta a malha utilizada nas simulações.

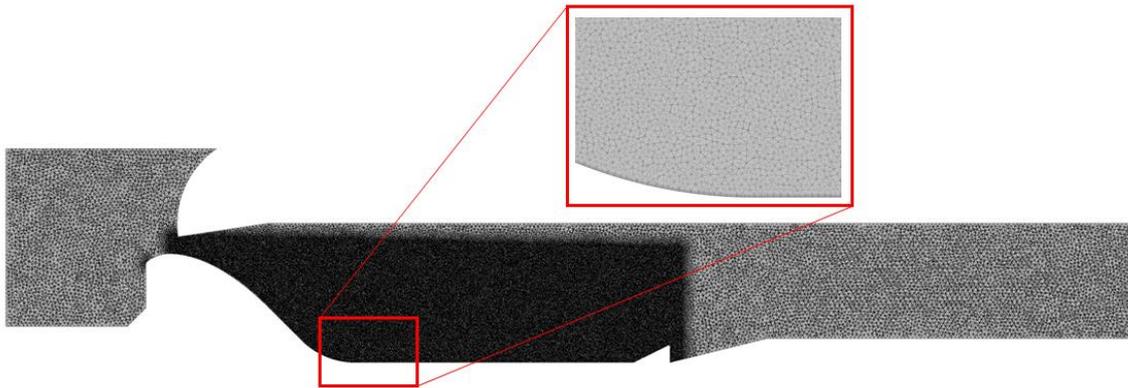


Figura 1. - Malha utilizada nas simulações.

Como condições de contorno, foi utilizada uma condição de entrada de massa, a montante, correspondente a uma vazão de água de 4.000 m³/s (em escala de protótipo); uma condição de saída, com nível d'água constante com pressão hidrostática; condições de parede (*no-slip*) onde não ocorre trocas de massa; condições de simetria na parte lateral do domínio e; condições de abertura na parte superior do domínio. Ressalta-se que na condição de contorno de saída foi considerado um adicional de 1,50 m (em escala de protótipo) na profundidade do escoamento, para todas as simulações, se comparado com a profundidade observada no MFH, a fim de realizar um maior afogamento do ressalto na simulação.

A Figura 2 apresenta um croqui esquemático das condições de contorno utilizadas.

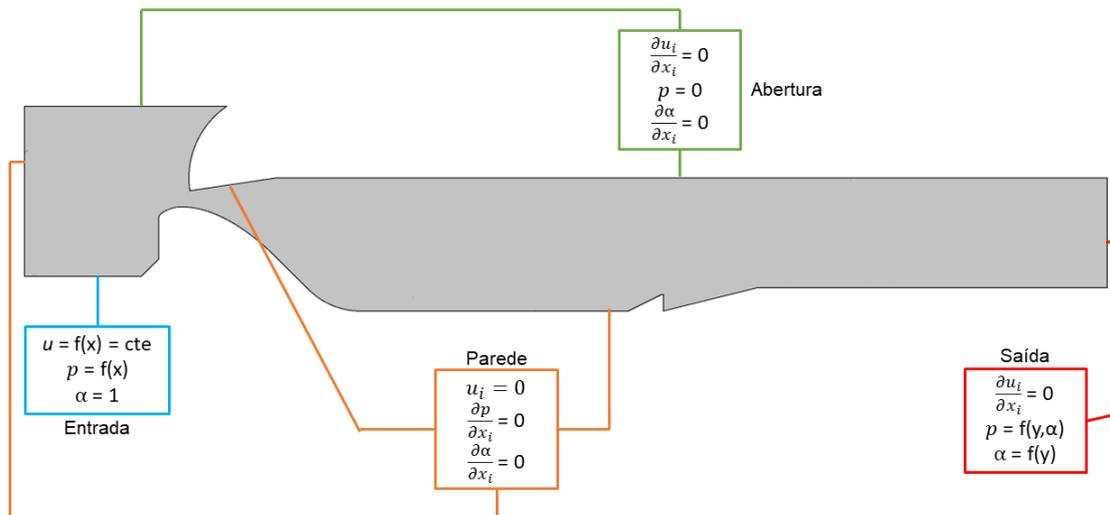


Figura 2. - Domínio simulado e condições de contorno.

Foram avaliados os seguintes modelos de turbulência para as equações RANS: $k-\epsilon$, proposto por Launder e Sharma (1974); $k-\omega$, proposto por Wilcox (1988); $RNG k-\epsilon$, proposto por Yakhot et al. (1992); e $SST k-\omega$, proposto por Menter (1993). Todos os modelos testados são denominados modelos de duas equações. Todos estes modelos relacionam as tensões de Reynolds aos gradientes de velocidade média e à viscosidade turbulenta, a qual é modelada como um produto das flutuações de velocidade.

Totalizou-se uma bateria de 4 simulações, sendo uma relativa a cada modelo de turbulência, das quais foram retirados dados de pressão média e campos de fração água-ar.

Os resultados de pressões médias obtidos nas simulações foram comparados com as pressões médias obtidas experimentalmente, através de transdutores de pressão, no MFH em escala 1:32 da UHE Porto Colômbia, apresentados por Teixeira (2008). Foram avaliados resultados em sete pontos

distribuídos entre a curva de concordância e a bacia de dissipação. A Figura 3 apresenta um croqui da estrutura simulada e a localização dos pontos de medição.

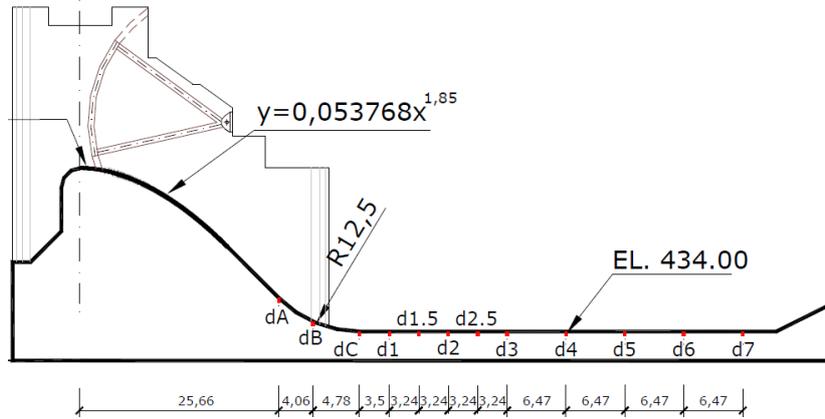


Figura 3. - Croqui da estrutura simulada e localização das tomadas de medição. Valores em escala de protótipo. Adaptado de Teixeira (2008).

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Na Figura 4 são observados os valores de fração água-ar para as 4 simulações realizadas.

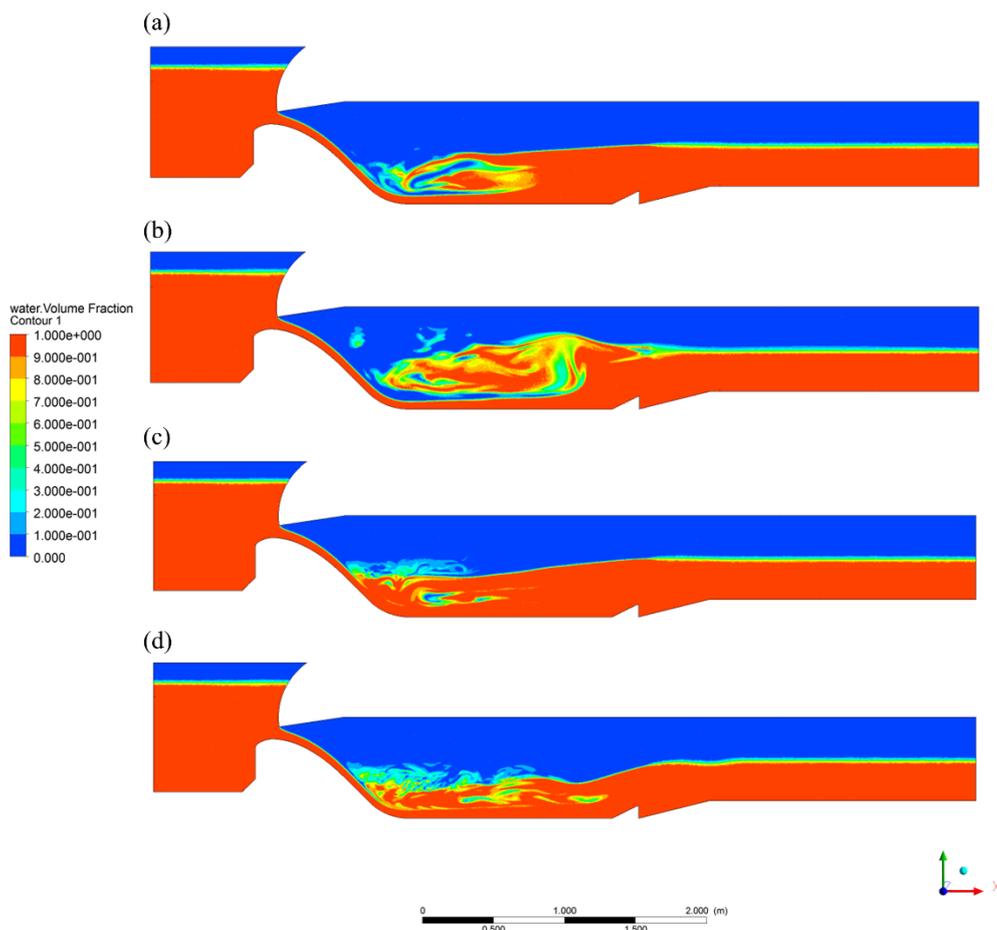


Figura 3.- Resultados da simulação para fração água-ar para os modelos de turbulência $k-\epsilon$ (a), $k-\omega$ (b), $RNG\ k-\epsilon$ (c) e $SST\ k-\omega$ (d).

Através da Figura 4 pode-se observar, qualitativamente, que os modelos de turbulência *RNG k-ε* e *SST k-ω* apresentam um padrão de escoamento mais semelhante ao observado no fenômeno físico. Nota-se, também a partir da Figura 4 que os padrões de incorporação de ar no escoamento e formato do perfil da linha d'água são sensíveis ao modelo de turbulência escolhido.

Os resultados de pressão média obtidos em cada uma das sete tomadas, tanto para as simulações, quanto para as medições no MFH, são apresentados na Figura 4. No Quadro 1, são apresentados os erros relativos percentuais de cada modelo de turbulência com relação às medições no MFH.

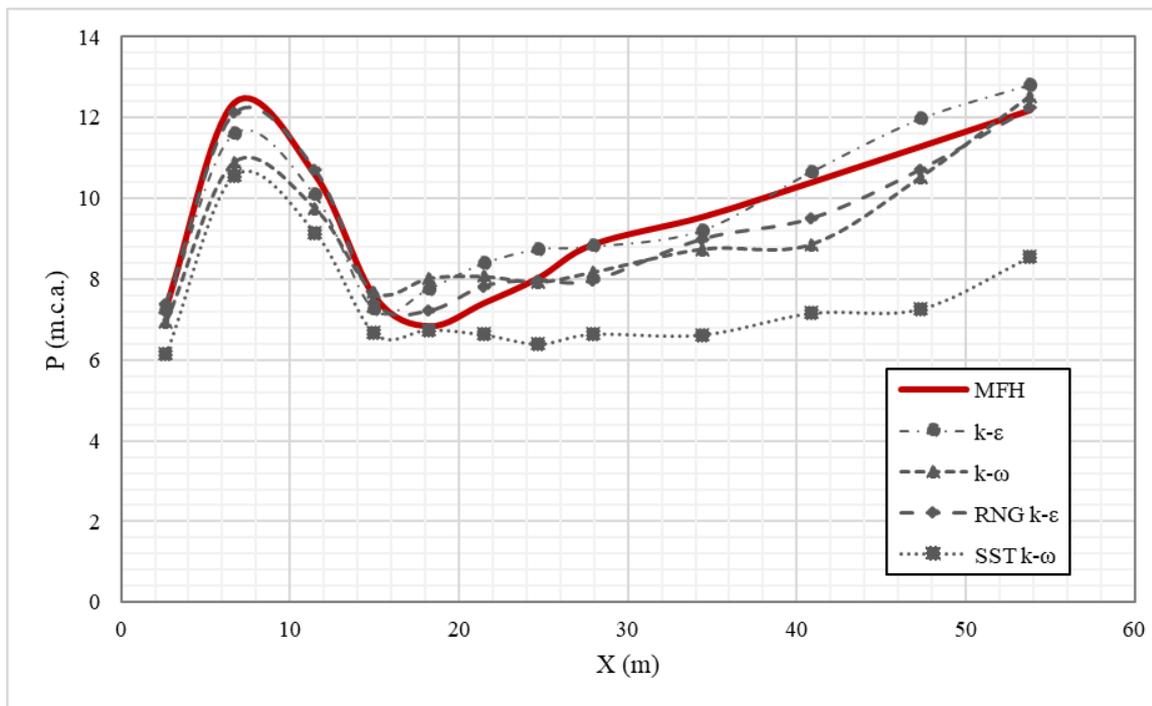


Figura 4. - Pressões obtidas nas posições das tomadas de pressão. Valores em escala de protótipo.

Quadro 1. - Erro percentual relativo ao modelo físico.

Sonda	Erro (%)			
	<i>k-ε</i>	<i>k-ω</i>	<i>RNG k-ε</i>	<i>SST k-ω</i>
dA	0.92	4.85	1.09	15.97
dB	6.21	11.91	1.99	14.65
dC	4.59	7.80	1.27	13.57
d1	4.07	1.71	1.87	12.00
d1.5	13.70	17.57	5.63	1.20
d2	13.47	9.11	5.76	10.46
d2.5	8.96	1.11	0.67	20.37
d3	0.47	7.65	10.08	25.07
d4	3.40	8.25	5.69	30.58
d5	2.53	14.67	8.52	31.17
d6	6.09	6.66	4.95	35.67
d7	5.16	2.88	0.53	29.88
Média	5.80	7.85	4.00	20.05

Conforme pode ser visualizado na Figura 2 e no Quadro 1, o modelo de turbulência *RNG k-ε* apresenta o menor erro relativo percentual médio para as pressões médias dentre os modelos avaliados. Todavia, deve-se levar em consideração que este resultado foi obtido para a variável de pressões médias no fundo da bacia de dissipação e para uma condição específica de escoamento. Em linhas gerais, todas as simulações subestimaram a pressão média de pico, no centro da curva de concordância.

Observa-se que a escolha do modelo de turbulência possui influência direta na formação do perfil da linha d'água no ressalto e também na incorporação de ar. Esse fato, por consequência, influencia também as pressões observadas no fundo da bacia de dissipação.

CONCLUSÃO

Portanto, conclui-se que quando utilizadas técnicas baseadas em RANS para a simulação de bacias de dissipação por ressalto hidráulico, a escolha do modelo de turbulência possui influência significativa nos resultados de pressão média no fundo da bacia. A escolha do modelo de turbulência adequado, juntamente com a escolha de condições de contorno adequadas, resulta em representações mais próximas do perfil da linha d'água do ressalto hidráulico, dos padrões de escoamento e das pressões médias no fundo da bacia de dissipação.

Ressalta-se que a escolha do modelo de turbulência a ser utilizado deve ser avaliada particularmente para cada situação, não só buscando na bibliografia modelos de turbulência já utilizados para a situação desejada, mas também realizando testes e análises de sensibilidade. Recomenda-se, para a mesma situação das simulações apresentadas no presente artigo, avaliar o comportamento dos diferentes modelos de turbulência frente a outras variáveis do escoamento, tal como campo de velocidades, dissipação de energia e perfis da linha d'água.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela concessão de bolsa de estudo na modalidade Mestrado (GM) e à Eletrobras Furnas pelos dados referentes a UHE Porto Colômbia.

REFERÊNCIAS

- ANSYS. **ANSYS CFX - Solver Theory Guide**. Canonsburg, PA: Ansys Inc., 2009.
- BAI, Z.; ZHANG, J. Comparison of Different Turbulence Models for Numerical Simulation of Pressure Distribution in V-Shaped Stepped Spillway. **Mathematical Problems in Engineering**, v. 2017, p. 1–9, 2017.
- CANLI, E.; ATES, A.; BILIR, S. Comparison of turbulence models and CFD solution options for a plain pipe. **EPJ Web of Conferences**, v. 180, p. 02013, 4 jun. 2018.
- CHANSON, H. Turbulent air-water flows in hydraulic structures: Dynamic similarity and scale effects. **Environmental Fluid Mechanics**, v. 9, n. 2, p. 125–142, 2009a.
- CHANSON, H. Current knowledge in hydraulic jumps and related phenomena. A survey of experimental results. **European Journal of Mechanics, B/Fluids**, v. 28, n. 2, p. 191–210, 2009b.
- CHANSON, H. **Energy Dissipation in Hydraulic Structures**. London, UK: Taylor & Francis Group (IAHR monograph), 2015.
- FERZIGER, J. H.; PERIC, M. **Computational methods for fluid dynamics**. 3. rev ed. ed. Berlin; Heidelberg; New York; Barcelona; Hong Kong; London; Milan; Paris; Tokyo: Springer International Publishing, 2002. v. 34
- HAGER, W. H. **Energy Dissipators and Hydraulic Jump**. Dordrecht: Springer Netherlands, 1992. v. 8
- HART, J. Comparison of Turbulence Modeling Approaches to the Simulation of a Dimpled Sphere. **Procedia Engineering**, v. 147, n. 0, p. 68–73, 2016.
- HELLER, V. Scale effects in physical hydraulic engineering models. **Journal of Hydraulic Research**, v. 49, n. 3, p. 293–306, 2011.
- HIRT, C. .; NICHOLS, B. . Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries. **Journal of Computational Physics**, v. 39, n. 1, p. 201–225, jan. 1981.
- MENTER, F. **Zonal Two Equation k-w Turbulence Models For Aerodynamic Flows**. 23rd Fluid Dynamics, Plasmadynamics, and Lasers Conference. **Anais...**Reston, Virigina: American Institute of

- Aeronautics and Astronautics, 6 jul. 1993Disponível em: <<https://arc.aiaa.org/doi/10.2514/6.1993-2906>>
- MONTEIRO, L. R. **SIMULAÇÃO NUMÉRICA DIRETA DE ALTA ORDEM PARA ESCOAMENTOS BIFÁSICOS ÁGUA-AR**. Tese (Doutorado) - Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental—Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2018.
- PFISTER, M.; CHANSON, H. Scale effects in physical hydraulic engineering models. **Journal of Hydraulic Research**, v. 50, n. 2, p. 244–246, 2012.
- TEIXEIRA, E. D. **Efeito de Escala na Previsão dos Valores Extremos de Pressão Junto ao Fundo em Bacias de Dissipação por Ressalto Hidráulico**. Tese (Doutorado) - Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental—Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2008.
- VITI, N.; VALERO, D.; GUALTIERI, C. Numerical simulation of hydraulic jumps. part 2: Recent results and future outlook. **Water (Switzerland)**, v. 11, n. 1, p. 1–18, 2018.
- WILCOX, D. C. Reassessment of the scale-determining equation for advanced turbulence models. **AIAA Journal**, v. 26, n. 11, p. 1299–1310, nov. 1988.
- YAKHOT, V. et al. Development of turbulence models for shear flows by a double expansion technique. **Physics of Fluids A: Fluid Dynamics**, v. 4, n. 7, p. 1510–1520, jul. 1992.