

ANÁLISE COMPARATIVA DE PRESSÕES E NÍVEIS DE ÁGUA EM UMA BACIA DE DISSIPACÃO POR RESSALTO HIDRÁULICO OBTIDAS EM UM MODELO FÍSICO E UM MODELO NUMÉRICO TRIDIMENSIONAL

Rodolfo Rosendo de Carvalho (Universidade Federal do Paraná) E-mail: rrcarvalho89@gmail.com
Michael Mannich (Universidade Federal do Paraná) E-mail: mannich@ufpr.br

Resumo: Com o advento da capacidade de processamento dos computadores, a modelagem numérica de fenômenos hidráulicos tem sido cada vez mais utilizada para a resolução de problemas de engenharia. O objetivo geral deste artigo é o estudo dos níveis de água e pressões ao longo de uma bacia de dissipação por ressalto hidráulico utilizando as ferramentas de modelagem computacional presentes no software FLOW 3D® em um estudo de caso de um vertedouro, onde foram realizados ensaios em modelo hidráulico reduzido (modelo físico) para determinação dessas grandezas. Os estudos foram pautados em análises quantitativas e qualitativas dos resultados obtidos no modelo computacional frente aos resultados obtidos no modelo físico reduzido. Buscou-se avaliar as condições hidráulicas na bacia de dissipação obtidas no modelo computacional por meio de simulações numéricas com dois modelos de turbulência distintos, κ - ε RNG e κ - ω $k - \omega$. As análises permitiram concluir que a simulação realizada com o modelo de turbulência κ - ε RNG melhor reproduziu os resultados em termos de pressão e níveis de água observados no modelo físico em comparação à simulação realizada com o modelo de turbulência κ - ω .

Palavras-chave: Bacia de Dissipação, Vertedouro, Ressalto Hidráulico, Pressões, Níveis de Água.

COMPARATIVE ANALYSIS OF PRESSURES AND WATER LEVELS IN A STILLING BASIN BY HYDRAULIC JUMP OBTAINED IN A PHYSICAL MODEL AND A THREE-DIMENSIONAL MATHEMATICAL MODEL

Abstract: With the advent of computer processing capabilities, numerical modeling of hydraulic phenomena has increasingly been used to solve engineering problems. The general objective of this article is to study the water levels and pressures along a dissipation basin by hydraulic jump using the computational modeling tools present in FLOW 3D® software in a case study of a spillway, where tests were conducted on a reduced hydraulic model (physical model) to determine these quantities. The studies were based on quantitative and qualitative analyses of the results obtained from the computational model compared to the results obtained from the reduced physical model. The aim was to evaluate the hydraulic conditions in the dissipation basin obtained from the computational model through mathematical simulations using two distinct turbulence models, κ - ε RNG and κ - ω . The analyses allowed us to conclude that the simulation conducted with the κ - ε RNG turbulence model better replicated the pressure and water level results observed in the physical model compared to the simulation conducted with the κ - ω turbulence model.

Keywords: Stilling Basin, Spillway, Hydraulic Jump, Pressures, Water Levels.

1. Introdução

A dinâmica dos fluidos computacional (CFD - Computational Fluid Dynamics) é uma área da ciência que tem por finalidade a resolução numérica por métodos computacionais de problemas que envolvem o escoamento de fluidos, seja em estado líquido ou gasoso. Segundo Araújo Filho (2014), a utilização de programas computacionais para simular numericamente o escoamento através de estruturas hidráulicas é, em muitos aspectos, semelhante à construção de um modelo físico: se o modelo físico ou numérico não está configurado corretamente para simular uma determinada situação, os resultados obtidos não irão representar fielmente a realidade.

Araújo Filho (2014) apresenta, entre os principais benefícios do uso de CFD na resolução de problemas de engenharia, a facilidade de extração dos resultados e a disponibilidade desses dados em todos os pontos do domínio estudado. Enquanto em um modelo físico o processo de medição deve ser meticuloso e, por essa razão, dispendioso em tempo, no modelo numérico todas as variáveis em todos os pontos do escoamento estão disponíveis para análise, facilitando a visualização e a compreensão do escoamento como um todo (JOHNSON, 2006). Contudo, a modelagem computacional de um determinado problema requer que o usuário conheça, com certo grau de profundidade, a teoria envolvida na resolução do problema.

No dimensionamento de estruturas hidráulicas, a determinação de níveis de água e pressões ao longo desses perfis é de extrema importância como subsídio para o dimensionamento estrutural dessas estruturas. As bacias de dissipação são estruturas terminais utilizadas em vertedouros para dissipar a energia do escoamento por meio da formação de um ressalto hidráulico. Nessas estruturas, devido às características tridimensionais do escoamento e às flutuações turbulentas, a determinação dessas variáveis por metodologias empíricas pode estar sujeita a erros. Dessa forma, as simulações computacionais tridimensionais podem ser ferramentas que trazem precisão e acurácia na determinação dessas variáveis.

Laishram (2022) estudou numericamente e experimentalmente o ressalto hidráulico em canais de leitos rugosos inclinados e planos. Em seu estudo, Laishram (2022) utilizou o software ANSYS FLUENT 18.1 e concluiu que os resultados numéricos apresentaram boa concordância com os resultados experimentais em termos de velocidades.

Amorim et al. (2004) realizaram um estudo numérico e experimental do ressalto hidráulico em uma bacia de dissipação a jusante de um vertedouro controlado por comportas, comparando os resultados obtidos pelas duas abordagens. Nesse estudo foi utilizado o software FLOW 3D® com o modelo de turbulência κ - ϵ . Foram comparados os resultados em termos de níveis de água e pressões. Amorim et al. (2004) concluíram que, mesmo com as limitações e complexidades da geometria, o escoamento turbulento foi bem representado pelo modelo numérico, incluindo o rolo causado pela formação do ressalto hidráulico.

O presente trabalho compara os resultados em termos de pressão e níveis de água obtidos em uma simulação de escoamento realizada em modelo físico com os resultados obtidos em uma simulação computacional de um vertedouro controlado com bacia de dissipação por ressalto hidráulico utilizando a solução através de dois modelos de turbulência: κ - ϵ RNG e κ - ω . Tal comparação tem como objetivo avaliar a capacidade da ferramenta numérica de reproduzir as condições hidráulicas observadas no modelo físico, fornecendo subsídios para sua aplicação em estudos futuros.

2. Revisão Bibliográfica

Conforme apresentado por Blazek (2001), as equações dos fluidos são baseadas nas leis de conservação: lei de conservação de massa e lei de conservação da quantidade de movimento. Os fluidos escoam de forma tridimensional, ou seja, as propriedades do escoamento variam em todas as direções e o campo de velocidades é função das coordenadas de posição e do tempo. Em fluidos newtonianos, ou seja, que obedecem à Lei da Viscosidade de Newton, o valor da viscosidade dinâmica (μ) é constante. Para fluidos incompressíveis e com viscosidade constante, as formulações resultam em um conjunto de equações conhecidas como Equações de Navier-Stokes (Equações 2, 3 e 4), que adicionadas à equação da continuidade (Equação 1), descrevem o comportamento de um fluido.

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad \text{Eq. [1]}$$

$$\rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) = \rho g_x - \frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \quad \text{Eq. [2]}$$

$$\rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) = \rho g_y - \frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) \quad \text{Eq. [3]}$$

$$\rho \left(\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) = \rho g_z - \frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) \quad \text{Eq. [4]}$$

onde u , v e w são as componentes da velocidade, ρ é a densidade, p é a pressão, x , y e z são as coordenadas espaciais, g é a aceleração da gravidade nas direções, t é o tempo e μ é a viscosidade dinâmica.

Segundo apresentado por Blazek (2001), a solução desse conjunto de equações não apresenta grande dificuldade no caso de fluidos ideais (não viscosos) e escoamentos laminares.

Em escoamentos turbulentos, a resolução direta das escalas de turbulência pelas equações de Navier-Stokes, por meio de simulações DNS (Direct Numerical Simulation), é viável apenas para casos relativamente simples e com baixos números de Reynolds (Re). Blazek (2001) apresenta que o número de pontos do domínio para uma adequada resolução espacial em uma simulação DNS deve ser da ordem de $Re^{9/4}$, ou seja, para um escoamento turbulento típico em obras hidráulicas, com número de Reynolds da ordem de 107, seria necessária a resolução das equações de Navier-Stokes em 1016 pontos do domínio.

Desta forma, é usual a utilização da decomposição de Reynolds, que se trata das Equações de Navier-Stokes reescritas em termos de quantidades médias de velocidade e pressão. Essa aproximação apresentada por Reynolds em 1885 propõe a decomposição das propriedades do escoamento considerando uma parcela média e uma parcela que corresponde à flutuação turbulenta, conforme exemplificado na Figura 1 e descrito nas Equações 5, 6, 7 e 8.

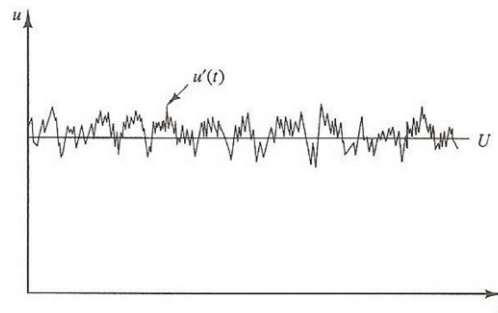


Figura 1 – Medição Típica de Velocidade num Escoamento Turbulento
Fonte: Araújo Filho (2014)

$$u(t) = U + u' \quad \text{Eq. [5]}$$

$$v(t) = V + v' \quad \text{Eq. [6]}$$

$$w(t) = W + w' \quad \text{Eq. [7]}$$

$$p(t) = P + p' \quad \text{Eq. [8]}$$

onde u , v e w são as componentes da velocidade, p das pressões, t é o tempo, U , V , W são os componentes da velocidade em termos médios, u' , v' , w' são as flutuações turbulentas dos componentes de velocidade, P das pressões em termos médios e p' são as flutuações turbulentas da pressão.

As equações obtidas a partir da decomposição de Reynolds associadas às equações de Navier-Stokes resultam nas equações de Navier-Stokes com média de Reynolds (Equações 9, 10 e 11), conhecidas pelo termo em inglês “RANS - Reynolds Averaged Navier-Stokes”.

$$\frac{\partial U}{\partial t} + u \frac{\partial U}{\partial x} + v \frac{\partial U}{\partial y} + w \frac{\partial U}{\partial z} = g_x - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \left(\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} \right) - \left(\overline{\frac{\partial u'^2}{\partial x}} + \frac{\partial \overline{u'v'}}{\partial y} + \frac{\partial \overline{u'w'}}{\partial z} \right) \quad \text{Eq. [9]}$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + u \frac{\partial V}{\partial x} + v \frac{\partial V}{\partial y} + w \frac{\partial V}{\partial z} = g_y - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \nu \left(\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial z^2} \right) - \left(\frac{\partial \overline{v'u'}}{\partial x} + \overline{\frac{\partial v'^2}{\partial y}} + \frac{\partial \overline{v'w'}}{\partial z} \right) \quad \text{Eq. [10]}$$

$$\frac{\partial W}{\partial t} + u \frac{\partial W}{\partial x} + v \frac{\partial W}{\partial y} + w \frac{\partial W}{\partial z} = g_z - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \nu \left(\frac{\partial^2 W}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 W}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 W}{\partial z^2} \right) - \left(\frac{\partial \overline{w'u'}}{\partial x} + \frac{\partial \overline{w'v'}}{\partial y} + \overline{\frac{\partial w'^2}{\partial z}} \right) \quad \text{Eq. [11]}$$

onde ν é a viscosidade cinemática. As demais variáveis foram definidas anteriormente.

As equações RANS são semelhantes às equações de Navier-Stokes, o que difere é o aparecimento de novos termos que representam a influência das flutuações turbulentas no escoamento. Tais termos criam a necessidade de equações adicionais para resolver o problema, as quais são fornecidas pelos chamados modelos de turbulência, para os quais existem várias formulações dependendo do problema que se está analisando.

A solução desse grupo de equações é um problema mais complexo. No escoamento turbulento as propriedades do escoamento como velocidade, temperatura e pressão estão sujeitas a flutuações no espaço e no tempo. Por isso, para se aproximarem da realidade os modelos de turbulência devem ser capazes de considerar e representar estes fatos.

Segundo Bates et al. (2005), existem muitos modelos de turbulência, cujo critério de classificação está relacionado ao número de equações de transporte consideradas sendo que os modelos mais simples são aqueles que não utilizam equações de transporte.

Modelos deste tipo usam basicamente o conceito de viscosidade turbulenta proposto por Boussinesq em 1877. Existem ainda os modelos de turbulência com uma equação de transporte, que é o caso do modelo proposto por Prandtl (1925).

A partir do conceito de Prandtl (1925) surgiram outros modelos de turbulência, com duas equações de transporte, capazes de simular a turbulência de um escoamento de forma mais genérica e com bons resultados. Os modelos com duas equações utilizam a equação de transporte para a energia cinética de turbulência por unidade de massa (κ), e outra equação para outra variável auxiliar.

Segundo Bates et al. (2005), dentre os modelos de turbulência de duas equações, o mais utilizado é o chamado modelo κ - ϵ , proposto por Launder e Spalding em 1972, que simula a viscosidade turbulenta através de duas equações diferenciais parciais, uma para a energia cinética turbulenta (κ), e outra para a taxa de dissipação de energia cinética turbulenta (ϵ), sendo que ϵ aparece naturalmente na equação de κ . Bates et al. (2005) ainda apresentam que a principal falha no modelo κ - ϵ é a hipótese de isotropia nas flutuações turbulentas, o que pode produzir uma grande viscosidade turbulenta.

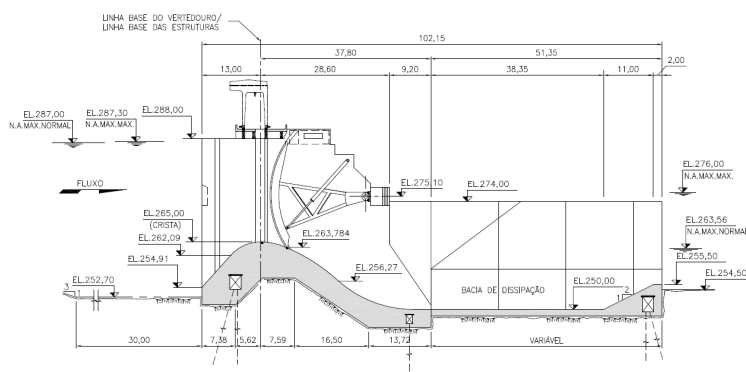
Há ainda o modelo de turbulência κ - ϵ RNG desenvolvido por Yakhot e Orszag (1986), conforme apresentado por Bates et al. (2005) que se baseia na teoria da renormalização de grupos e apresenta as mesmas equações para a energia cinética turbulenta e para a taxa de dissipação turbulenta do modelo κ - ϵ , porém utiliza um coeficiente $c\epsilon_2$ definido de forma explícita através de equações, enquanto que no modelo κ - ϵ padrão, os coeficientes são obtidos de forma empírica. Segundo Bates et al. (2005) este modelo é capaz de descrever com precisão os escoamentos turbulentos de baixa intensidade e regiões com fortes tensões. Um terceiro modelo de duas equações é o modelo κ - ω , que, segundo Blazek (2001), tem sido muito utilizado na resolução de problemas de engenharia. Segundo Blazek (2001), nesse

modelo, como no κ - ϵ , é simulada a viscosidade turbulenta através de duas equações diferenciais parciais, uma para a energia cinética turbulenta (κ), e outra para a taxa de dissipação de energia turbulenta específica (ω), que determina a escala de turbulência. A viscosidade turbulenta é calculada se utilizando κ e ω . Segundo Bates et al. (2005), o modelo κ - ω $k-\omega$ tende a ser mais preciso na região da camada limite ou em escoamentos de transição quando comparado ao modelo κ - ϵ .

3. Método

Foram realizados testes em modelo físico reduzido construído de acordo com o critério de semelhança de Froude para verificação do vertedouro construído na escala geométrica 1:60.

Os ensaios foram realizados no Centro de Hidráulica e Hidrologia Professor Parigot de Souza – CEHPAR mediante a construção de um trecho do vertedouro com largura correspondente a dois vãos (64,7 cm no modelo), configurando um vão central e duas metades de vãos localizadas adjacentes às paredes laterais do modelo, sendo o trecho inicial do canal posicionado na elevação 258,00 m. A jusante da bacia de dissipação do vertedouro foi configurado um canal com a mesma largura do canal de aproximação e elevação variando entre 254,50 m e 256,50 m. A imposição de vazão pelo vertedouro é realizada, no modelo, através de medidores de vazão do tipo Venturi instalados em tubulações com diâmetros de 200 mm e 300 mm. A tranquilização do fluxo é realizada através de tubos e tijolos perfurados posicionados na região da alimentação do modelo. A Figura 2 apresenta o projeto do vertedouro simulado. A Figura 3 apresenta a estrutura implantada no respectivo modelo físico.



Nos ensaios realizados foram obtidos registros das condições de escoamentos, tais como níveis de água a montante e a jusante do vertedouro, pressões instantâneas e médias ao longo da crista e da bacia de dissipação, perfil da linha de água ao longo do vertedouro e velocidades máximas a jusante da bacia de dissipação, além de observações gerais das condições de escoamento na bacia de dissipação.

O vertedouro foi construído em acrílico, o que permitiu a visualização do fluxo ao longo de toda a estrutura. A estrutura foi preparada para permitir a medição de pressões médias (piezômetros) e de pressões instantâneas (transdutores de pressão). Já a superfície da lâmina da água foi levantada através do registro de níveis ao longo do vertedouro e da bacia de dissipação. As pressões, os níveis de água e as velocidades foram medidos a partir da estabilização do escoamento no modelo.

A Figura 4 apresenta as condições de escoamento durante o ensaio com a vazão de 113,7 L/s no modelo físico, correspondente a uma vazão total de 9515 m³/s em protótipo se considerado o escoamento pelos 6 vãos do vertedouro. Para essa vazão, a abertura da comporta resultou em 8,84 m em protótipo e 0,147 m em modelo e uma carga hidráulica (medida entre o nível de montante e o centro do orifício) de 18,98 m. A Figura 5 apresenta os registros de pressão ao longo da estrutura para esta condição de escoamento. A pressão média foi obtida de duas maneiras: através da medição realizada pelos piezômetros instalados (identificados como “Pressão média” na legenda da figura) e através do cálculo da média aritmética dos valores de pressão instantânea obtida pelos transdutores (identificados como “Pressão média – transdutor” na legenda da figura).



Figura 4 – Ensaio com a vazão de 113,7 L/s (9515 m³/s em protótipo)
Fonte: CEHPAR (2002)

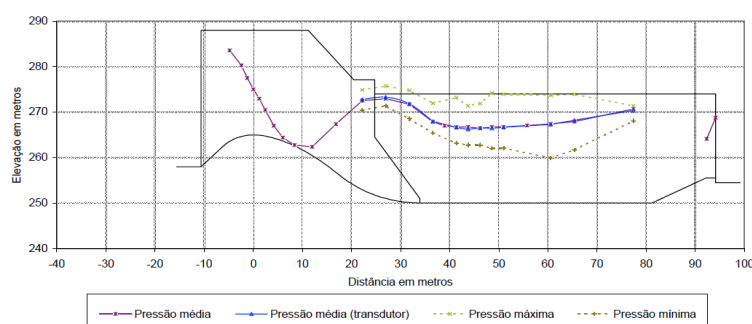


Figura 5 – Pressões medidas no Ensaio com a vazão de 113,7 L/s (9515 m³/s em protótipo)
Fonte: CEHPAR (2002)

Para resolver numericamente o problema utilizou-se o modelo numérico computacional

FLOW 3D[®], desenvolvido pela companhia Flow Science Inc.

Este programa é baseado no método dos volumes finitos para resolução das equações de Navier-Stokes, que constituem um modelo teórico representativo da dinâmica dos fluidos newtonianos. A rotina do programa FLOW 3D[®] permite modelar escoamentos tridimensionais de grande complexidade através do método “FAVOR” - Fractional Area/Volume Obstacle Representation Method. Este método estabelece critérios para definir a geometria com base na parcela das células ocupadas pelo sólido. Segundo apresentado por Dalmora (2016), o FLOW 3D[®] utiliza o método do “Volume of Fluid (VOF)” que é aplicado com o propósito de discretizar a superfície livre do escoamento. Isso significa que o programa exclui do cálculo as células que não contribuem para o escoamento através da definição de uma função “F”, com valor atribuído a cada célula. Segundo Araújo Filho (2014), a unidade ($F = 1$) é atribuída a células totalmente preenchidas, e a nulidade ($F = 0$) é atribuída às células vazias, sendo valores intermediários atribuídos a células parcialmente preenchidas de acordo com a fração ocupada por fluidos. Essas células com valores intermediários representam a superfície livre do escoamento. Esse conceito traz a vantagem de diminuir o tempo de simulação. A Figura 6 exemplifica o exposto.

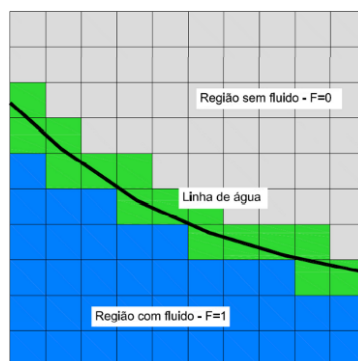


Figura 6 – Exemplo de malha Computacional no Método “VOF – Volume of Fluid”

Fonte: Araújo Filho (2014)

Outro aspecto presente no modelo numérico adotado é a capacidade deste em modelar escoamentos turbulentos através de vários modelos de turbulência: Modelo de Comprimento de Mistura de Prandtl, Modelo de Uma Equação, Modelo de Duas Equações $[(\kappa-\epsilon), (\kappa-\omega)]$, Modelo de Grupo Renormalizado $(\kappa-\epsilon \text{ RNG})$ e Modelo de Simulação de Grandes Vórtices (do inglês, “Large Eddy Simulation Model” - LES).

Os principais dados de entrada do modelo numérico são a geometria da estrutura hidráulica, a malha de volumes finitos para a simulação numérica, as condições de contorno do modelo numérico, as condições iniciais do fluido e a ativação do modelo para simular os fenômenos de turbulência envolvidos.

3.1. Geometria da Estrutura Hidráulica

As várias partes que compõem o modelo (canal de aproximação, estrutura do vertedouro, canal de restituição, comportas radiais) foram definidas com base nos materiais que as compõem, permitindo assim que a rugosidade do material fosse tratada de forma diferente em cada componente do modelo. Buscou-se através da geometria implantada a representação do vertedouro da mesma forma que foi realizada no modelo físico, simulando somente a largura equivalente a dois vãos do vertedouro. Uma vez que o principal objetivo do presente trabalho é comparar os resultados obtidos na simulação numérica com os resultados obtidos no modelo físico, para se eliminar incertezas decorrentes do efeito de escala, se manteve na modelagem numérica a mesma escala geométrica utilizada na modelagem física, ou seja, 1:60. A

rugosidade do modelo numérico também foi baseada na geometria simulada no modelo físico, ou seja, a rugosidade dos canais de aproximação e restituição, os quais são escavados em rocha no protótipo, buscam representar uma superfície mais lisa, uma vez que no modelo físico esses canais foram revestidos com argamassa, que apresenta rugosidade consideravelmente menor.

3.2. Malha de Volumes Finitos para Simulação Numérica

Na criação de um modelo numérico, a definição da malha é uma das etapas mais importantes, uma vez que a discretização da malha definirá a precisão com que a superfície da estrutura será representada. Esse processo é muitas vezes iterativo, sendo que uma malha ótima é aquela capaz de reproduzir da melhor maneira a geometria com o menor número de elementos. Isso pode ser verificado através de comparações sucessivas dos resultados obtidos entre malhas com elementos maiores e malhas mais refinadas: uma vez que o refinamento da malha não interfira nos resultados obtidos, pode-se dizer que para a geometria em estudo a malha é ótima.

Foi utilizada uma malha estruturada triortogonal definida a partir de coordenadas cartesianas devido à natureza da geometria. Embora a malha seja ortogonal, as dimensões dos seus elementos podem ser diferentes em cada direção. Contudo, é indicado no manual do software adotado (Flow Science, 2015) que a relação entre as dimensões em cada direção não exceda o valor de 3, sendo que quanto mais próxima da unidade for essa razão mais uniforme e mais facilmente resolvida será a simulação. O FLOW 3D® também admite que a malha seja feita através de múltiplos blocos, ou seja, que sejam determinadas áreas com refinamento diferenciado, tantas quantas forem necessárias. Conforme apresentado por Dalmora (2016), para garantir a correta compreensão da discretização das malhas, o FLOW 3D® exige que os blocos ortogonais da malha mais discretizada tenham arestas coincidentes com os elementos da malha menos discretizada.

No modelo numérico foram testadas diversas configurações de malhas visando a definição da malha ótima, iniciando com elementos com 0,10 m de dimensão. As características da malha considerada ótima, que apresentou estabilidade dos resultados com menor custo computacional, são apresentadas na Tabela 1. Pode-se notar que na região das comportas do vertedouro foi necessária a adoção de uma malha mais refinada, com elementos menores, buscando-se representar fielmente a geometria da comporta e o controle que ela exerce sobre o escoamento. A Figura 7 apresenta as malhas utilizadas nas simulações.

Tabela 1 – Características da Malha nas Simulações

Bloco	Direção	Mínimo	Máximo	Comprimento Total na Direção (m)	Número de Elementos	Dimensão da Malha na Direção (m)	Número de Elementos da Malha
1	X	2,0000	7,0000	5,00	250	0,020	476000
	Y	0,9834	1,6634	0,68	34	0,020	
	Z	1,3000	2,4200	1,12	56	0,020	
2	X	3,4800	3,6800	0,20	20	0,010	84320
	Y	0,9834	1,6634	0,68	68	0,010	
	Z	1,8000	2,4200	0,62	62	0,010	

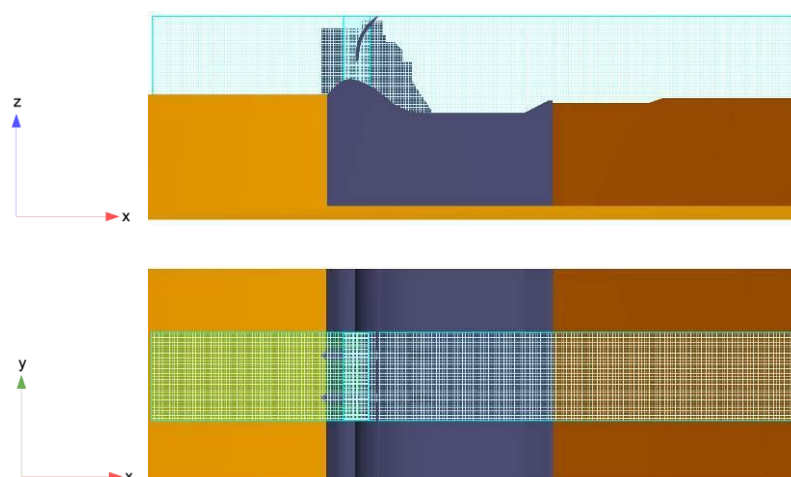
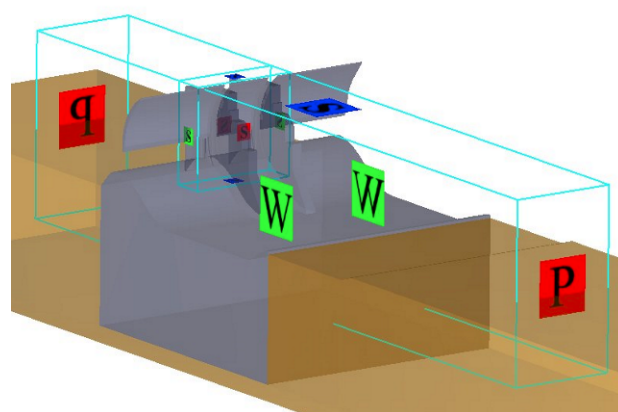


Figura 7 – Malha Utilizada nas Simulações

As condições de contorno foram definidas nas faces dos blocos da malha, ou seja, é necessária a definição de seis condições de contorno em cada bloco. Segundo Dalmora (2016), as condições de contorno dependem dos resultados esperados e das informações disponíveis para a simulação. No estudo desenvolvido foram utilizadas condições de contorno do tipo pressão, simetria e parede.

Existem, tipicamente, dois tipos de condições de contorno do tipo pressão: estática ou de estagnação. Para a condição de pressão de estagnação, assume-se que o fluido entra no domínio da simulação com velocidade zero. Para a condição de pressão estática, a pressão é aproximadamente contínua ao longo do contorno e a velocidade no contorno é computada a partir da vazão e a respectiva área de escoamento. Na condição de contorno do tipo simetria, a face assume uma condição de “free-slip” e não existem velocidades normais à fronteira e, consequentemente, não existe escoamento através da fronteira. A condição de contorno do tipo parede permite definir a não existência de escoamento em uma determinada fronteira, ou seja, não existem velocidades normais à mesma. Contudo, ainda é possível que existam velocidades tangenciais e, consequentemente, tensões tangenciais.

Em função dos dados disponíveis para o presente estudo, foram definidos os tipos de condições de contorno conforme apresentado na Figura 8. Na Tabela 2 são apresentados os níveis de água impostos em cada simulação.



Legenda:
P: Pressão de Estagnação / Nível de Água
S: Simetria
W: Parede

Figura 8 – Condições de Contorno Utilizadas nas Simulações

Tabela 2 – Níveis de Água impostos nas Simulações

Bloco	Local	Nível de Água (m)	
		Protótipo	Modelo
1	Montante	286,77	2,3129
	Jusante	271,15	2,0261

3.3. Condições Iniciais do Fluido

Com o intuito de se promover uma convergência da simulação numérica de forma mais rápida, com base nas condições de escoamento esperadas ao longo da estrutura, definem-se condições iniciais de escoamento. Nas simulações realizadas optou-se por definir duas regiões com níveis de água constantes no modelo: a primeira região a montante da crista do vertedouro e da comporta com o nível de água igual à condição de contorno de montante (Xmin) e a segunda região, a jusante da comporta, no interior da bacia de dissipação e no canal de restituição do vertedouro com o nível de água igual à condição de contorno na extremidade de jusante (Xmáx). A Figura 9 apresenta o modelo com os níveis de água iniciais definidos. Os níveis definidos em cada região são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 – Condições Iniciais

Região	Direção	Limite (m)		Nível de Água (m)	
		Mínimo (Montante)	Máximo (Jusante)	Protótipo	Modelo Numérico
1	X	2,00	3,60	286,77	2,3129
2	X	3,60	7,00	271,15	2,0261

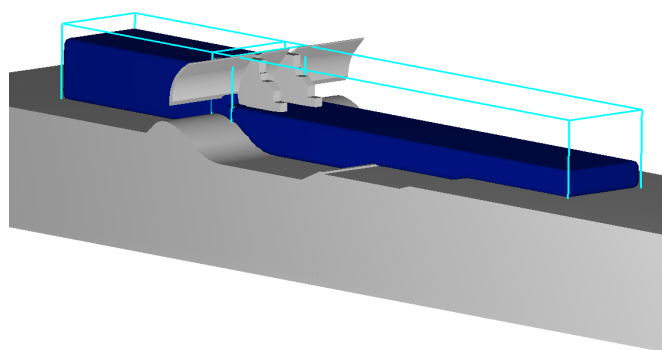


Figura 9 – Condição Inicial do Fluido nas Simulações

3.4. Demais Parâmetros e Premissas Adotados na Simulação

São apresentados de forma resumida os demais parâmetros e premissas adotados nas simulações realizadas.

A geometria das estruturas foi definida de modo a se permitir a diferenciação da rugosidade das diferentes partes. No modelo físico, o vertedouro, a bacia de dissipação e as comportas foram construídos em acrílico, sendo a altura de rugosidade adotada para essas partes igual a 0,01 mm. Os canais de aproximação e restituição tiveram sua superfície revestida em

argamassa para realização dos ensaios, sendo a rugosidade adotada de 5 mm.

Os parâmetros utilizados na modelagem numérica foram definidos previamente à comparação com os resultados experimentais, considerando as características geométricas e construtivas do modelo físico, as condições de ensaio e as referências utilizadas na definição dos parâmetros da simulação. Dessa forma, não foi realizado procedimento de calibração mediante ajuste dos parâmetros do modelo numérico com o objetivo de minimizar as diferenças em relação aos resultados experimentais. Os resultados obtidos no modelo físico foram utilizados posteriormente como referência para avaliação do desempenho das simulações numéricas.

Foram realizadas simulações com dois modelos de turbulência: o modelo κ - ϵ RNG e o modelo κ - ω . Wilcox (2006) apresenta que o modelo de turbulência κ - ϵ RNG é indicado para a simulação de escoamentos com curvatura forte, alta rotação ou geometria complexa e melhor reproduz a dissipação turbulenta de energia nessas situações, como é o caso do escoamento em um vertedouro e bacia de dissipação. Ao mesmo tempo, Wilcox (2006) apresenta que o modelo de turbulência κ - ω tem melhor capacidade de reproduzir escoamentos próximos à parede, com forte gradiente de velocidades, como de fato foi a simulação no modelo físico. Dessa forma, serão comparados os resultados utilizando os dois modelos de turbulência.

Buscando-se uma condição de escoamento estável foram simulados em modelo numérico 150 segundos.

4. Resultados e Discussões

Nesta seção são apresentados os resultados das simulações numéricas. Esses resultados serão comparados com as medições realizadas no modelo físico. Serão analisados os resultados em termos de vazão, pressões ao longo da crista do vertedouro e da bacia de dissipação e níveis de água ao longo do modelo.

Para os resultados em termos de vazão a precisão será avaliada mediante as diferenças percentuais obtidas entre os resultados no modelo físico e no modelo numérico, sendo o erro percentual expresso pela Equação 12.

$$Erro = \frac{Q_{físico} - Q_{simulado}}{Q_{físico}} \quad \text{Eq. [12]}$$

onde $Q_{físico}$ é a vazão em m^3/s imposta no modelo físico e $Q_{simulado}$ a vazão obtida no modelo numérico mediante a imposição dos níveis de montante, níveis de jusante e abertura da comporta observados no modelo físico.

Para as pressões e os níveis de água ao longo do modelo a avaliação da precisão dos resultados obtidos a partir das simulações numéricas, além da comparação dos resultados absolutos medidos, será feita através do cálculo da medida estatística “erro quadrático médio”, ou RMS (do inglês “Root Mean Square”), definido pela Equação 13, e do cálculo do coeficiente de correlação r^2 , definido pela Equação 14.

$$RMS = \frac{\sum_{i=1}^n (X_{físico,i} - X_{simulado,i})^2}{n} \quad \text{Eq. [13]}$$

onde $X_{\text{físico},i}$ é a grandeza medida no modelo físico, $X_{\text{simulado},i}$ é o resultado obtido na simulação numérica e n é o número de pontos medidos.

$$r^2 = \left(\frac{\sum (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum (x_i - \bar{x})^2 \sum (y_i - \bar{y})^2}} \right)^2 \quad \text{Eq. [14]}$$

onde x_i é a grandeza medida no modelo físico e y_i é a grandeza obtida na simulação numérica.

Realizaram-se duas simulações para a condição de protótipo com a vazão de 3172 m³/s passando por dois vãos do vertedouro, equivalente a 9515 m³/s respectivamente quando os seis vãos da estrutura estiverem operando. No modelo físico reduzido essa vazão corresponde a 113,7 L/s.

4.1. Vazão

No modelo numérico foram obtidas vazões em duas seções ao longo do modelo: a primeira na região a montante da ogiva do vertedouro, a 0,30 metros da extremidade de montante do modelo e a segunda a jusante da bacia de dissipação do mesmo, a 0,50 m da extremidade de jusante do modelo, conforme apresentado na Figura 10.

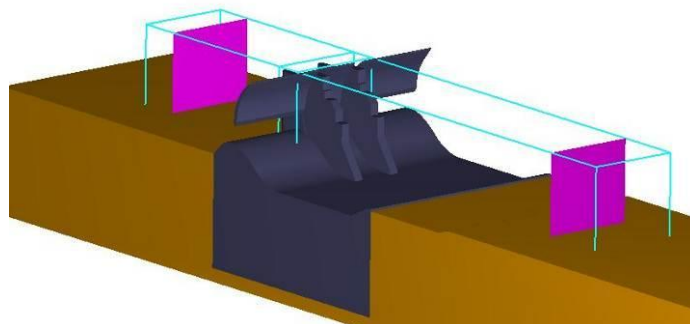


Figura 10 – Locais de Medição de Vazão no Modelo Numérico

Na Figura 11 é apresentada a variação de vazão nos últimos 50 segundos da simulação com o modelo de turbulência κ - ϵ RNG. Adotou-se como vazão representativa da simulação a média das vazões nas duas seções de medição, sendo a vazão em cada seção adotada como a média da vazão observada nos últimos 10 segundos de simulação. Na Figura 12 é apresentada a variação de vazão nos últimos 50 segundos da simulação com o modelo de turbulência κ - ω .

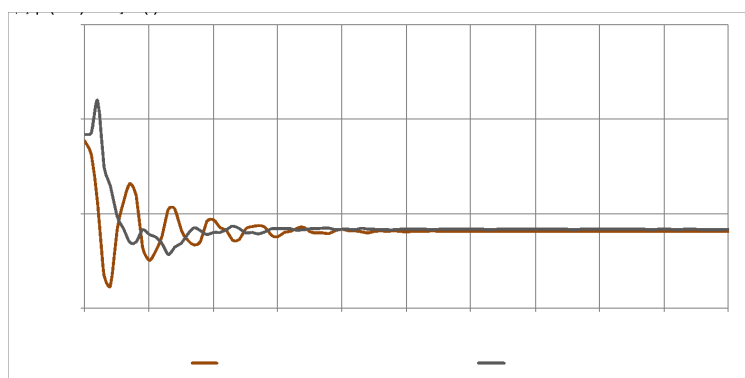


Figura 11 – Variação Temporal da Vazão nos últimos 50 segundos – Modelo de Turbulência $\kappa\text{-}\epsilon$ RNG

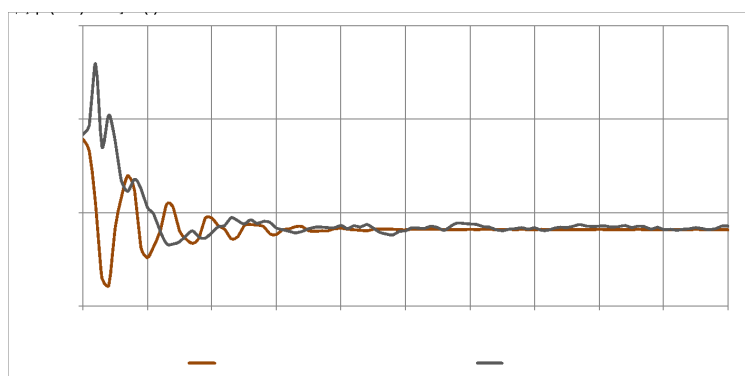


Figura 12 – Variação Temporal da Vazão nos últimos 50 segundos – Modelo de Turbulência $\kappa\text{-}\omega$

Com base na análise dos resultados apresentados na Figura 11 e na Figura 12, pode-se concluir que o modelo numérico apresentou uma condição estável de escoamento ao final do tempo simulado. A Tabela 4 apresenta as vazões correspondentes ao modelo físico e o resultado obtido na simulação numérica e o erro calculado.

Tabela 4 – Vazões no Modelo Físico e Vazões Obtidas no Modelo Numérico

Modelo de Turbulência Utilizado	Vazão no Modelo Físico Parcial (m ³ /s)	Vazão no Modelo Numérico (m ³ /s)	Diferença (m ³ /s)	Erro (%)
$\kappa\text{-}\epsilon$ RNG	0,114	0,128	0,014	12
$\kappa\text{-}\omega$	0,114	0,128	0,014	12

A diferença de 12% entre a vazão obtida no modelo numérico e aquela observada no modelo físico constitui uma fonte de incerteza na comparação dos resultados de pressão e nível de água, uma vez que essas grandezas são diretamente influenciadas pelas condições de escoamento. Dessa forma, os resultados apresentados nas seções seguintes devem ser interpretados considerando que a condição de vazão reproduzida numericamente não foi exatamente igual à condição imposta no modelo físico. A diferença de vazão está associada principalmente à representação da região de controle do escoamento, particularmente à geometria das comportas, cuja discretização foi realizada com elementos de 0,01 m. O refinamento adicional dessa região não foi adotado em razão do aumento significativo do custo computacional.

Apesar dessa diferença, observa-se que os resultados de pressão e nível de água obtidos com o modelo $\kappa\text{-}\epsilon$ RNG apresentaram elevada aderência aos resultados experimentais. Ressalta-se ainda que a diferença de vazão obtida nas simulações com os modelos $\kappa\text{-}\epsilon$ RNG e $\kappa\text{-}\omega$ foi a

mesma, de aproximadamente 12%, enquanto os resultados de pressão e nível de água apresentaram diferenças substancialmente distintas entre os dois modelos. Dessa forma, para a condição analisada, a diferença observada entre os modelos de turbulência não pode ser atribuída exclusivamente à diferença de vazão, indicando que a formulação do modelo de turbulência exerce influência relevante na reprodução das condições hidráulicas no interior da bacia de dissipação.

4.2. Pressões ao Longo da Crista do Vertedouro e da Bacia de Dissipação

As linhas piezométricas obtidas experimentalmente e na simulação em modelo numérico a partir do modelo de turbulência κ - ϵ RNG para a vazão estudada (113,7 L/s) são apresentadas na Figura 13.

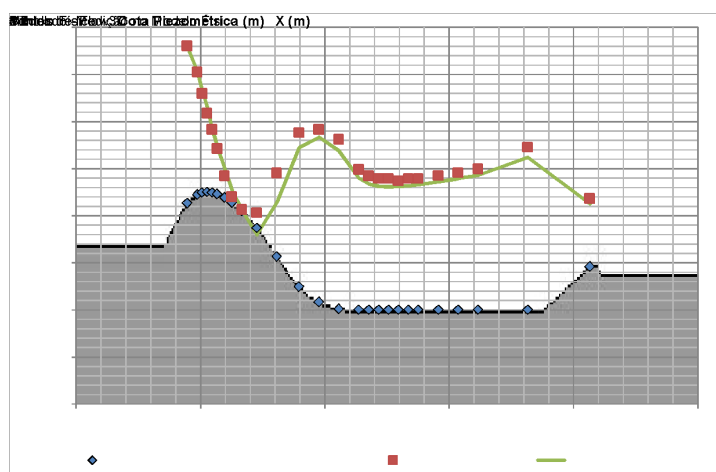


Figura 13 – Pressões ao Longo da Crista do Vertedouro e da Bacia de Dissipação – Modelo de Turbulência κ - ϵ RNG

Conforme pode ser observado, os resultados obtidos no modelo numérico, identificados como “Simulado – Flow3D” na figura são bastante aderentes aos resultados obtidos no modelo físico.

As linhas piezométricas obtidas experimentalmente e na simulação em modelo numérico a partir do modelo de turbulência κ - ω são apresentadas na Figura 14.

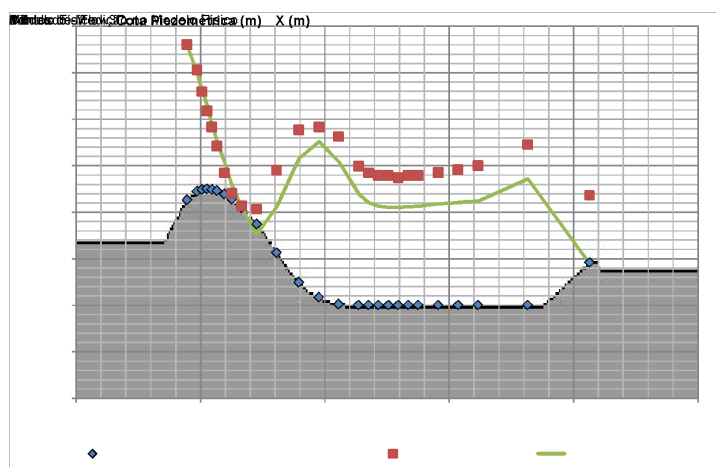


Figura 14 – Pressões ao Longo da Crista do Vertedouro e da Bacia de Dissipação – Modelo de Turbulência κ - ω

Para as simulações realizadas com o modelo de turbulência κ - ω , os resultados obtidos ao

longo da crista do vertedouro (perfil Creager), até aproximadamente a abcissa 3,7 m, são bastante aderentes aos resultados obtidos no modelo físico, entretanto, ao longo da bacia de dissipação (entre as abcissas 3,7 e 5,1 m) são menos aderentes, com os valores de pressão minorados no modelo.

Na Tabela 5 são apresentadas as diferenças máximas obtidas nas pressões entre as simulações numéricas e os ensaios em modelo físico em termos absolutos, além do ponto onde essa diferença foi obtida. Adicionalmente, é apresentada a estatística RMS em cada uma das simulações.

Tabela 5 – Diferenças entre os resultados de Pressões Obtidos no Modelo Físico e na Simulação Numérica - Resumo

Modelo de Turbulência Utilizado	Vazão por 6 Vãos do Vertedouro (m³/s)	Vazão por 2 Vãos do Vertedouro (m³/s)	Vazão no Modelo Físico Parcial (m³/s)	Diferença Máxima (mca)	Diferença Máxima (%)	Tomada de pressão onde foi Obtida a Diferença Máxima	RMS	r²
$k-\varepsilon$ RNG	9515	3172	0,114	-0,061	34,74	11	0,0004	0,9756
$k-\omega$	9515	3172	0,114	-0,148	102,44	26	0,0034	0,8669

A análise da Tabela 5 permite concluir que, em termos de pressões ao longo do modelo, os resultados obtidos com o modelo de turbulência $k-\varepsilon$ RNG apresentaram maior aderência aos resultados obtidos no modelo físico, sendo a estatística RMS calculada para esse modelo aproximadamente 8,5 vezes menor que a obtida para o modelo $k-\omega$ e o coeficiente de correlação r^2 12% maior.

4.3. Perfil da Linha de Água

O perfil da linha de água ao longo do vertedouro obtido experimentalmente e na simulação em modelo numérico com o modelo de turbulência $k-\varepsilon$ RNG para a vazão estudada (113,7 L/s) é apresentado na Figura 15.

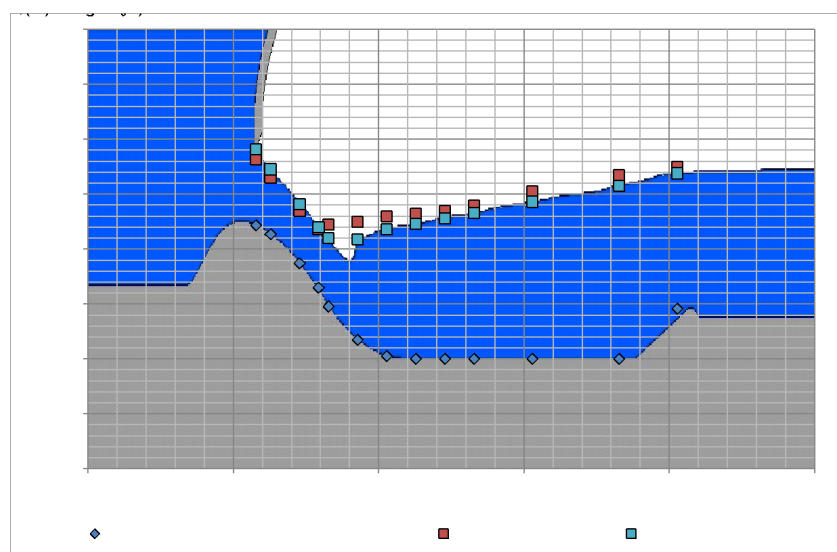


Figura 15 – Perfil da Linha de Água ao Longo do Vertedouro – $\kappa-\varepsilon$ RNG

Da mesma forma que os resultados obtidos em termos de cota piezométrica com o modelo de turbulência $\kappa\text{-}\epsilon$ RNG, os resultados são bastante aderentes aos resultados obtidos no modelo físico.

O perfil da linha de água ao longo do vertedouro obtido experimentalmente e na simulação em modelo numérico com o modelo de turbulência $\kappa\text{-}\omega$ para a vazão estudada (113,7 L/s) é apresentado na Figura 16.

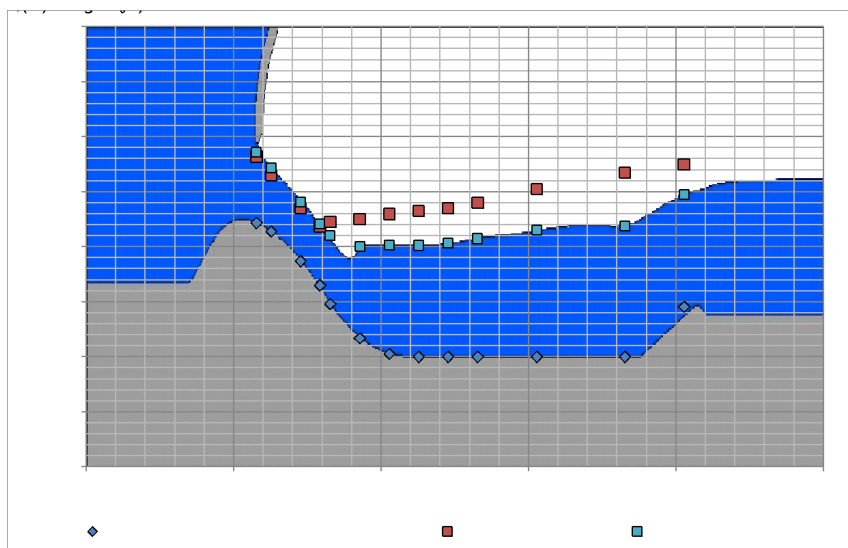


Figura 16 – Perfil da Linha de Água ao Longo do Vertedouro – $\kappa\text{-}\omega$

Para as simulações realizadas com o modelo de turbulência $\kappa\text{-}\omega$, seguindo a mesma tendência dos resultados em termos de cota piezométrica, os resultados obtidos ao longo da crista do vertedouro (perfil Creager), até aproximadamente a abscissa 3,7 m, são bastante aderentes aos resultados obtidos no modelo físico, entretanto, ao longo da bacia de dissipação (entre as abscissas 3,7 e 5,1 m) as diferenças observadas são maiores.

Na Tabela 6 são apresentadas as diferenças máximas obtidas nos perfis da linha de água entre as simulações numéricas e os ensaios em modelo físico em termos absolutos, além do ponto onde essa diferença foi obtida. Adicionalmente, é apresentada a estatística RMS em cada uma das simulações.

Tabela 6 – Perfil da Linha de Água ao Longo do Vertedouro – Diferenças Máximas e Erro Médio Quadrático - Resumo

Modelo de Turbulência Utilizado	Vazão por 6 Vãos do Vertedouro (m³/s)	Vazão por 2 Vãos do Vertedouro (m³/s)	Vazão no Modelo Físico Parcial (m³/s)	Diferença Máxima (m)	Diferença Máxima (%)	Ponto onde foi Obtida a Diferença Máxima	RMS	r²
$k - \epsilon$ RNG	9515	3172	0,114	-0,0323	1,657	6	0,0003	0,9171
$k - \omega$	9515	3172	0,114	-0,0967	4,751	12	0,0028	0,5610

A análise da Tabela 6 permite concluir que o modelo de turbulência $\kappa\text{-}\epsilon$ RNG apresentou resultados mais aderentes aos encontrados no modelo físico que o modelo de turbulência $\kappa\text{-}\omega$, sendo a estatística RMS calculada para o modelo de turbulência $\kappa\text{-}\epsilon$ RNG cerca de 9 vezes menor que a calculada para o modelo de turbulência $\kappa\text{-}\omega$ e o coeficiente de correlação r^2 cerca de 63% maior.

4.4. Limitações do Estudo

Apesar da boa aderência observada entre os resultados numéricos e experimentais para as grandezas analisadas, algumas limitações devem ser consideradas na interpretação dos resultados. A primeira está relacionada à discretização espacial do domínio. Embora tenham sido avaliadas diferentes configurações de malha, o refinamento na região das comportas foi limitado a elementos de 0,01 m em razão do aumento significativo do custo computacional associado à utilização de elementos menores. Essa região é particularmente relevante por atuar como controle do escoamento e pode contribuir para as diferenças observadas entre a vazão simulada e a vazão medida no modelo físico.

Outra limitação está relacionada ao tempo de simulação. Foram simulados 150 s e os resultados foram avaliados após a estabilização do escoamento, sendo utilizadas médias temporais para a determinação das vazões. Embora o comportamento das vazões tenha indicado estabilidade ao final das simulações, não foi realizado um estudo sistemático de independência dos resultados em relação ao tempo total de simulação. Dessa forma, os resultados devem ser interpretados considerando essa limitação.

Quanto à modelagem da turbulência, foram avaliados apenas os modelos κ - ϵ RNG e κ - ω . Assim, a conclusão de que o modelo κ - ϵ RNG apresentou melhor aderência aos resultados experimentais está restrita aos modelos de turbulência e à condição hidráulica investigados neste estudo, não sendo possível generalizá-la para todas as condições de escoamento em bacias de dissipação.

Por fim, embora tenha sido buscada a reprodução da geometria do modelo físico no modelo numérico, a representação computacional está sujeita às limitações impostas pela discretização espacial e pela representação das superfícies e elementos de controle. Essas limitações devem ser consideradas em aplicações futuras, especialmente em regiões de elevada complexidade geométrica e forte variação das condições de escoamento.

5. Conclusões

Foram realizadas simulações com dois modelos de turbulência distintos: 1) κ - ϵ RNG e 2) κ - ω .

A simulação realizada com o modelo de turbulência κ - ϵ RNG resultou em condições de escoamento muito próximas às observadas no modelo físico, com a vazão obtida no modelo numérico 12% superior à vazão observada no modelo físico. A maior diferença de pressão observada ao longo da estrutura do vertedouro e da bacia de dissipação foi de -0,061 mca (34,7%), com erro quadrático médio de 0,0004 mca e coeficiente de correlação r^2 igual a 0,9756. Para os níveis de água, a maior diferença observada ao longo da estrutura foi de -0,0323 m (1,66%), com erro quadrático médio de 0,0003 m e coeficiente de correlação r^2 igual a 0,9171. Embora a vazão obtida no modelo numérico tenha sido 12% superior à observada no modelo físico, os perfis de pressão e nível de água apresentaram elevada aderência aos resultados experimentais.

A simulação realizada com o modelo de turbulência κ - ω resultou em uma vazão 12% maior que a observada no modelo físico. Embora a diferença de vazão tenha sido semelhante àquela obtida na simulação com o modelo de turbulência κ - ϵ RNG, as diferenças observadas nos resultados de pressão e níveis de água foram consideravelmente maiores. Nos resultados relativos às pressões ao longo do modelo, a maior diferença encontrada foi de -0,148 mca (102,44%), sendo o erro médio quadrático calculado igual a 0,0034 mca e o coeficiente de correlação igual 0,8669. Em termos de níveis de água ao longo do modelo a maior diferença encontrada foi de -0,0967 m (4,75%), o respectivo erro médio quadrático igual a 0,0028 m e o coeficiente de correlação igual 0,5610.

As diferenças encontradas na simulação numérica com o modelo de turbulência κ - ϵ RNG foram menores, indicando maior aderência aos resultados obtidos no modelo físico.

Wilcox (2006) apresenta que as melhorias do modelo RNG em comparação aos modelos clássicos de turbulência com duas equações proporcionaram maior capacidade de reprodução da dissipação turbulenta em escoamentos livres de alta curvatura, como é o caso de um perfil Creager com uma bacia de dissipação por ressalto hidráulico a jusante. Dessa forma, os resultados apresentados corroboram essa afirmação.

As análises permitiram concluir que, para a condição hidráulica investigada, a simulação realizada com o modelo de turbulência κ - ϵ RNG reproduziu de forma mais satisfatória os resultados de pressão e níveis de água observados no modelo físico quando comparada à simulação realizada com o modelo κ - ω , sendo os resultados obtidos com o modelo de turbulência κ - ϵ RNG bastante aderentes aos resultados obtidos no modelo físico.

Do ponto de vista prático, os resultados demonstram o potencial da modelagem numérica tridimensional como ferramenta de apoio ao projeto e à avaliação de vertedouros e bacias de dissipação. A possibilidade de obter distribuições de pressão e níveis de água em diferentes regiões do domínio permite ampliar a compreensão das condições hidráulicas da estrutura e pode auxiliar na identificação de regiões críticas para o dimensionamento. Contudo, sua aplicação deve considerar cuidadosamente aspectos como discretização da malha, representação geométrica, condições de contorno e escolha do modelo de turbulência.

6. Referências Bibliográficas

- ARAÚJO FILHO, M. F. *Modelagem Computacional Tridimensional de Escoamentos em Vertedouros de Baixa Queda*. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2014.
- AMORIM, J. C. C.; RODRIGUES, R. C.; MARQUES, M. G. A numerical and experimental study of hydraulic jump stilling basin. *Advances in Hydro-Science and Engineering*, 2004.
- BATES, P. D.; LANE, S. N.; FERGUSON, R. I. *Computational fluid dynamics: applications in environmental hydraulics*. Inglaterra: John Wiley & Sons, 2005.
- BLAZEK, J. *Computational fluid dynamics: principles and applications*. Oxford: Elsevier, 2001.
- CEHPAR. *Projeto HL-120a: Estudos Hidráulicos em Modelo Reduzido do Vertedouro da UHE São Salvador – Relatório n° 01*. Curitiba, 2002.
- DALMORA, C. T. *Construção de ensecadeiras em água corrente: estudo de estabilidade de material lançado em ponta de aterro*. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2016.
- FLOW SCIENCE. *FLOW 3D® v11.1 User manual*. 2015.
- JOHNSON, M.; SAVAGE, B. *Physical and numerical comparison of flow over ogee spillway in the presence of tailwater*. Journal of Hydraulic Engineering, v. 132, n. 12, p. 1353–1357, 2006.
- LAISHRAM, K.; DEVI, T. T.; SINGH, N. R.; KUMAR, P. A. Numerical and experimental study on energy dissipation in hydraulic jump: a comparison between horizontal and sloping rough channel bed. In: IAHR INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON HYDRAULIC STRUCTURES, 9., 2022, Roorkee. *Proceedings of the 9th IAHR International Symposium on Hydraulic Structures*. Roorkee, India, 2022. DOI: 10.26077/cb4c-fdc3.
- PRANDTL, L. Bericht über Untersuchungen zur ausgebildeten Turbulenz. *Zeitschrift für Angewandte Mathematik und Mechanik*, v. 5, n. 2, p. 136–139, 1925. DOI: 10.1002/zamm.19250050212.
- WILCOX, D. C. *Turbulence modeling for CFD*. 3. ed. La Cañada, CA: DCW Industries, 2006.