

ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE MODELOS HIDRÁULICOS PARA DIMENSIONAMENTO DO VERTEDOURO EM UMA USINA HIDRELÉTRICA

Rafael Artur Trentin^{1} & Diego David Baptista de Souza²*

O uso de ferramentas computacionais como auxílio para a resolução de problemas da engenharia hidráulica tem se tornado cada vez mais comum. Em projetos hidrelétricos, a modelagem tridimensional do escoamento tem permitido a abordagem de problemas comumente encontrados como também de situações mais complexas e não convencionais, antes solucionadas com o uso do modelo empírico-analítico ou que dependiam exclusivamente da modelagem física. O modelo empírico-analítico, o modelo físico e o modelo computacional compõem um conjunto de modelos hidráulicos disponíveis para utilização pelos profissionais da área. Contudo, os resultados obtidos por qualquer modelo computacional precisam ser analisados para garantir a correta interpretação da realidade e do fenômeno estudado. Este trabalho propõe um comparativo entre os modelos hidráulicos durante o dimensionamento de um vertedouro em um projeto hidrelétrico, referente ao cálculo da capacidade de descarga da estrutura. O modelo físico foi tomado como base comparativa por fornecer os resultados mais precisos e a melhor aproximação da realidade. Assim, pretende-se fornecer subsídios para o engenheiro hidráulico na tomada das suas decisões relacionadas aos modelos hidráulicos a serem aplicados no dimensionamento de vertedouros.

Palavras-Chave – modelos hidráulicos, capacidade de descarga, vertedouros.

COMPARATIVE ANALYSIS AMONG HYDRAULIC MODELS FOR DESIGNING A SPILLWAY IN A HYDROELECTRIC PROJECT

The use of computational tool as an aid to the solution of hydraulic engineering problems became increasingly common. In hydroelectric designs, tridimensional flow modeling has allowed an approach to the common problems as to more complex and unusual situations, which before were resolved using the empiric-analytical model or that depended exclusively on physical modeling. The empiric-analytical model, the physical model and the computational model comprise a set of hydraulic models available for use by professionals. However, the results from any computational modeling need to be analyzed in order to ensure the right understanding of the reality and of the studied phenomenon. This work proposes a comparison among the hydraulic models for designing a spillway in a hydroelectric project referring to the calculation for the discharge capacity. The physical model was taken as the comparative basis because provides the more accurate results and better approximation of reality. Thus, it is intended to provide subsidies for the hydraulic engineer regarding the decisions to be made related to the hydraulic models that can be used in the spillway design.

Keywords – hydraulic models, discharge capacity, spillways.

¹ Mestrando do Programa de Pós-graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental da Universidade Federal do Paraná.
E-mail: rafaeltrentin@gmail.com.

² Engenheiro Civil e Mestre em Recursos Hídricos e Ambiental pela Universidade Federal do Paraná. Diretor de Energia e Recursos Hídricos da Engevix Engenharia S/A.
E-mail: diego.souza@engevix.com.br.

INTRODUÇÃO

As estruturas hidráulicas tiveram a sua concepção inicial de maneira empírica, utilizando o conhecimento advindo de experimentos e observações. Segundo PINTO *et al* (1998), com o desenvolvimento científico a hidráulica também evoluiu, incorporando um tratamento analítico (um modelo matemático) para generalizar os princípios físicos do movimento dos fluidos, juntamente ao já existente enfoque fortemente empírico, constituindo assim um modelo empírico-analítico. Tem-se atualmente nas equações diferenciais de *Navier-Stokes* a melhor aproximação para a descrição do movimento dos fluidos. Estas equações, no entanto, possuem soluções apenas para casos muito específicos em que diversas simplificações são adotadas (fluido incompressível e ideal, escoamento permanente e unidimensional, por exemplo). De acordo com WENDT (2009) “as equações de *Navier-Stokes* são equações diferenciais parciais de segunda ordem não-lineares, não existindo [...] soluções gerais analíticas [...], mas sim aproximações por discretização utilizando-se métodos numéricos”

Conforme FILL (2011), a imensa maioria dos escoamentos encontrados na prática da engenharia são turbulentos, caracterizados por flutuações aleatórias da velocidade e pressão, provocadas por instabilidades decorrentes deste caráter não linear das equações de *Navier-Stokes* e da sua sensibilidade às condições iniciais e perturbações externas. Assim, a modelagem matemática de escoamentos turbulentos constitui-se em um grande desafio a pesquisadores e engenheiros desde o seu descobrimento em 1883 por O. Reynolds.

Os projetos hidrelétricos são constituídos por diversas estruturas hidráulicas, dentre elas as estruturas vertentes (ou vertedouros), as quais envolvem situações complexas do escoamento. Considerando a dificuldade para retratar alguns fenômenos e comportamentos dos fluidos através da base teórica, os modelos físicos (modelos em escala reduzida) surgem como uma ferramenta necessária na análise do escoamento nestas situações. Estes modelos, em vista do critério de semelhança adotado, tem como grande vantagem a “simulação” do escoamento sem a necessidade da resolução analítica da questão da turbulência, sendo amplamente utilizados e desempenhando um papel importante no dimensionamento e na otimização destas estruturas hidráulicas.

Com o aumento da velocidade e da capacidade de processamento dos computadores, técnicas numéricas tem sido utilizadas através da modelagem computacional para buscar aproximações às equações de *Navier-Stokes*, constituindo uma área de estudos denominada hoje de Dinâmica dos Fluidos Computacional. Esta modelagem requer por parte do engenheiro um bom entendimento dos princípios básicos da hidráulica bem como das simplificações adotadas pelo modelo utilizado, principalmente no que se refere ao modelo de turbulência, evitando interpretações erradas do fenômeno em estudo e fornecendo assim resultados falsos.

Evidencia-se assim que o engenheiro tem hoje à sua disposição diversos modelos hidráulicos para a resolução dos problemas encontrados no seu dia-a-dia. Estes modelos, no entanto, não são excludentes, mas sim, úteis e complementares entre si, cabendo o uso de cada um de acordo com a situação e parâmetro a ser analisado nas diferentes situações. Neste âmbito, tem-se atualmente a técnica da Modelagem Composta, e que consiste na utilização tanto do modelo físico como do modelo numérico, para uma resolução mais efetiva de problemas hidráulicos complexos.

COLOCAÇÃO DO PROBLEMA E OBJETIVOS DO TRABALHO

O vertedouro é uma das estruturas hidráulicas mais importantes no projeto de uma usina hidrelétrica sendo a estrutura responsável por conduzir as enchentes de maneira segura sem danificar a barragem nem as estruturas a ela associadas, além de possibilitar o controle dos níveis de água do reservatório quando for o caso. O seu dimensionamento é multidisciplinar buscando o melhor arranjo do ponto de vista técnico, econômico e ambiental.

Este dimensionamento para obras de grande porte é no geral preliminar, sendo verificado, e não raro modificado, nos modelos físicos. A modificação/otimização da estrutura diretamente no modelo físico demanda, em sua maioria, custos e tempos de realização elevados, situação indesejada em qualquer projeto. A modelagem computacional aparece assim como uma opção para complementar o dimensionamento do vertedouro, encaminhando uma estrutura mais otimizada para representação no modelo físico.

Em obras de médio e pequeno porte, bem como para vertedouros com arranjos “clássicos” e com comportamento bem conhecido, não se costuma fazer modelo físico, devido às questões de custo e prazo. Assim, as simulações computacionais se tornam ferramentas muito interessantes nestes casos, complementando as soluções de projeto obtidas apenas com o modelo empírico-analítico.

Este trabalho propõe uma análise do desempenho do modelo computacional para o dimensionamento de um vertedouro através de um comparativo, e assim fornecer subsídios para balizar o engenheiro nas suas decisões relacionadas à quais modelos hidráulicos aplicar no dimensionamento desta estrutura.

METODOLOGIA E ESTUDO DE CASO

O parâmetro considerado nesta análise foi a capacidade de descarga, calculada utilizando os dois modelos hidráulicos citados. Os resultados foram então comparados com os valores apresentados pelo modelo físico da estrutura, tomados como verdade para os fins deste trabalho assim como os são para execução dos projetos de engenharia. Ressalta-se que todos os modelos possuem limitações e restrições específicas, até mesmo os modelos físicos, como por exemplo aquelas relacionadas com a semelhança adotada e com as imprecisões devido aos chamados efeitos de escala.

O vertedouro analisado é dotado de uma soleira com formato ogiva em situação com abertura total das comportas, ou seja, apesar da existência de controle hidráulico foi feita uma análise do seu funcionamento como escoamento livre ou não controlado. Por questões contratuais o nome do empreendimento utilizado não será divulgado, sendo denominado de maneira genérica como Usina Hidrelétrica (UHE) ABC. Seus principais parâmetros de cálculo constam na Tabela 1.

Tabela 1. Parâmetros de cálculo para o vertedouro da UHE ABC

Número de Vãos =	4	Largura Total Disponível: $L = 4 \times 11,40 = 45,6 \text{ m}$
Altura x Largura dos Vãos =	16,00 m x 11,40 m	
Carga de projeto (H_0) =	13,25 m	
Relação H_e/H_0 máxima adotada =	1,32	
Profundidade da aproximação (P) =	54 m	
Paramento de montante =	Vertical	

Modelo empírico-analítico:

Do ponto de vista hidráulico, o vertedouro é inicialmente dimensionado através do modelo empírico-analítico, utilizando-se de bibliografias consagradas como o *Hydraulic Design of Spillways-HDS* da USACE e o *Design of Small Dams-DSD* do USBR. Este modelo é assim chamado pois há uma base teórica (analítica) junto com coeficientes retirados de ensaios em laboratórios (empíricos) a fim de calibrar os resultados, tendo em vista as simplificações adotadas (unidimensional e distribuições de velocidade, por exemplo).

A equação (1) é utilizada para o cálculo da vazão que passa sobre a crista do vertedouro, sendo Q a vazão [m^3/s], L_e o comprimento efetivo da crista [m], C_d o coeficiente de descarga [$\text{m}^{1/2}/\text{s}$] e H_e a carga efetiva considerada sobre a crista [m].

$$Q = C_d \cdot L_e \cdot H_e^{3/2} \quad (1)$$

O coeficiente C_d é a variável mais sensível de todo processo de dimensionamento, influenciado por fatores como a relação entre a profundidade de aproximação do escoamento e a carga de projeto (P/H_0), a relação entre a carga atuante e a carga de projeto (H_e/H_0) e a declividade da face de montante da estrutura. Seu valor é determinado a partir de ábacos, encontrados nas bibliografias citadas (*HDS* e *DSD*).

Após calcular as vazões para os casos analisados, procedeu-se ao cálculo inverso, considerando o comprimento total L disponível (ou seja, sem considerar as contrações da veia líquida), para se obter o coeficiente de descarga global da estrutura C , conforme a equação (2). Este foi o coeficiente utilizado neste trabalho a fim de possibilitar o comparativo com o coeficiente de descarga global que é obtido do modelo físico.

$$C = L \cdot H^{3/2} / Q \quad (2)$$

Modelo físico

Para estudo do vertedouro da UHE ABC, foi construído um modelo físico na escala geométrica 1/100 utilizando o critério de semelhança de Froude. Este estudo foi realizado pelo laboratório de hidráulica do Centro de Hidráulica e Hidrologia Prof. Parigot de Souza – CEHPAR, localizado no campus da Universidade Federal do Paraná – UFPR em Curitiba. Foram realizados ensaios que puderam verificar, dentre outros aspectos, o desempenho hidráulico do vertedouro através da determinação de sua capacidade de descarga.

O coeficiente de descarga foi calculado de acordo com a equação (2), sendo Q a vazão a ser testada no modelo e H a carga de operação, calculada como a diferença entre o nível de água no reservatório e a cota do topo da crista. O coeficiente C é função do formato da ogiva e da perda de energia na aproximação do vertedouro e já engloba os efeitos de contração dos pilares e dos encontros laterais, ou seja, é o coeficiente global como já referido anteriormente.

Modelo computacional e simulações realizadas

O *software* selecionado para realizar a análise foi o *Flow 3D®*, licenciado para a empresa Engevix Engenharia S/A. Foi utilizado um computador com um processador modelo Intel® Xeon® 2,4 GHz com 4GB de memória DDR3.

O *Flow 3D®* é um *software* baseado na Dinâmica dos Fluidos Computacional, desenvolvido pela Flow Science, Inc, que aproxima soluções numéricas para as equações diferenciais de *Navier-Stokes* e da continuidade nas três dimensões, utilizando o método dos volumes finitos, conforme o *User Manual* (2010). Estas soluções são calculadas pela subdivisão do espaço em um grid de elementos hexaédricos (paralelepípedos) de tamanhos variados, formando o domínio computacional também denominado de malha computacional.

Uma das aplicações mais destacadas deste *software* é a destinada à análise hidráulica, principalmente por conseguir resolver problemas que envolvem escoamentos em superfície livre, o que se consiste em um aspecto importante no caso do escoamento sobre um vertedouro.

A partir da geometria da estrutura do vertedouro foi criado o respectivo modelo tridimensional em escala de protótipo, utilizando-se uma plataforma CAD e então exportado para o *Flow 3D®*.

Após a inserção da geometria a ser simulada procedeu-se para a determinação da malha computacional. Uma análise da influência nos resultados ocasionada pelo tamanho das células na malha, utilizando o *software Flow-3D®*, é apresentada por Fill (2011). Juntamente com as conclusões deste trabalho e a experiência dos autores do presente estudo, através de diversas simulações e estudos de sensibilidade realizados, malhas uniformes com tamanhos variando entre 2 m e 0,25 m, têm-se

demonstrado adequadas para os fins propostos. Optou-se pela simulação com dois blocos de malha com células de tamanho constante nas três direções: um bloco com células maiores para a região de aproximação do fluxo (malha mais grosseira) e outro com células menores na estrutura propriamente dita. Como o vertedouro apresenta simetria no sentido do escoamento, a malha pode ser definida envolvendo apenas metade da estrutura, o que foi possível devido à condição de contorno denominada de “Simetria” disponibilizada pelo *software*. A Figura 1 apresenta o modelo tridimensional utilizado bem como a malha computacional adotada.

Com a geometria e as condições de contorno definidas, procedeu-se para as simulações propriamente ditas.

Primeiramente foram realizadas cinco simulações considerando como condição de montante o nível de água do reservatório, obtido em modelo físico, referente às seguintes vazões ensaiadas: 2.070 m³/s, 3.371 m³/s, 4.491 m³/s, 5.792 m³/s e 7.173 m³/s. Estas simulações foram realizadas utilizando-se a malha com blocos de 1 m para a aproximação e 0,50 m. Com isto, calculou-se o coeficiente de descarga para estas situações e obtiveram-se então dados para caracterizar um comparativo representativo, através de várias cargas atuantes.

Afim de demonstrar o efeito do refinamento da malha computacional nos resultados, duas simulações com bloco de 0,50 m para a região da aproximação e 0,25 m para a região do vertedouro foram feitas, considerando as vazões de 2.070 m³/s e 7.173 m³/s, a menor e a maior vazão ensaiada no modelo físico.

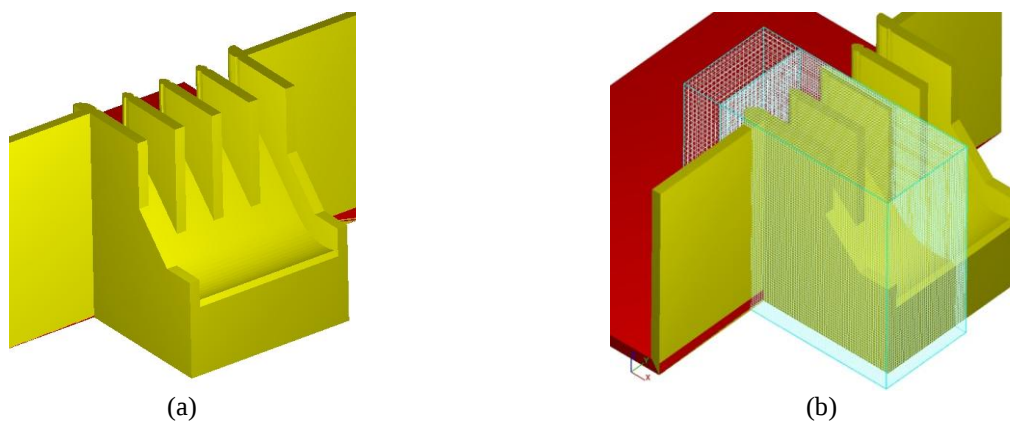


Figura 1 – Modelo tridimensional utilizado: (a) vista de jusante para montante e (b) malha computacional implantada, com um bloco mais grosseiro na aproximação e outro mais refinado na região do vertedouro.

RESULTADOS OBTIDOS

Após a convergência das cinco simulações utilizando a malha de 0,50 m na região do vertedouro, os dados referentes à capacidade de descarga foram calculados e comparados com os do modelo físico e do modelo empírico-analítico. Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 2, que mostra a vazão obtida para cada um dos três modelos utilizados, bem como o seu respectivo coeficiente de descarga. Também são apresentadas as diferenças percentuais e o erro quadrático médio (EQM) entre os valores do modelo computacional e do modelo empírico-analítico, ambos em relação aos respectivos valores do modelo físico.

A partir dos resultados apresentados, pôde-se perceber um bom comportamento do modelo computacional, o qual apresentou valores próximos aos obtidos em modelo físico, com uma diferença média de 3,99% para a vazão e de 3,93% para o coeficiente de descarga. A diferença máxima foi de 4,44% para a vazão e de 4,46% para o coeficiente de descarga, ambas menores do que 5%.

Estas diferenças obtidas em relação ao modelo físico são completamente aceitáveis em vista das simplificações que foram realizadas na modelagem computacional, tais como a representação apenas parcial e não de todo o domínio do modelo físico, a representação da região de aproximação de uma maneira idealizada (plana) e a própria discretização do espaço físico que consiste em uma simplificação da realidade da qual a modelagem numérica faz uso, conformando assim uma diferença intrínseca ao processo.

Com relação aos resultados do modelo empírico-analítico, nota-se uma proximidade muito grande entre os valores, sendo que a diferença média foi de apenas -0,05% para a vazão e -0,07% para o coeficiente de descarga, ao passo que a diferença máxima foi de -0,83% tanto para a vazão como para o coeficiente de descarga. Estas diferenças extremamente pequenas mostram que o modelo físico apenas confirmou a capacidade de descarga da estrutura, previamente calculada pelo modelo empírico-analítico.

Estes resultados atestam a precisão do modelo empírico-analítico para o cálculo da capacidade de descarga. Isto pode ser explicado pelo fato do vertedouro estudado ter um arranjo clássico, não caracterizando nenhum caso específico do qual não se tem estudos mais aprofundados ou ábacos para consulta. Ou seja, a estrutura com as características do vertedouro em questão tem seu comportamento conhecido, pois já foi exaustivamente estudada ao longo dos anos e por isso, consegue retratar os resultados com a precisão demonstrada.

As 2 simulações adicionais mostraram que o refinamento da malha computacional também influencia nos resultados, conforme apresentado na Tabela 3. No entanto, a diminuição entre as diferenças foi menor do que 1%, ou seja, um aumento pequeno na precisão em vista do aumento significativo do tempo de simulação necessário, que foi aproximadamente dez vezes maior. Este é um exemplo de uma situação em que o engenheiro deve balancear os benefícios de se fazer ou não uma modelagem computacional mais refinada, ficando claro neste caso que apesar de trazer um resultado mais preciso, o tempo dispendido a mais inviabilizaria tal decisão.

Para este caso, em que se tem uma geometria clássica do vertedouro, o modelo empírico-analítico se mostrou mais preciso, além de ser mais rápido e simples de utilizar, sendo, portanto, preferível para esta análise. Contudo, os resultados mostraram que o modelo computacional é uma ferramenta que pode ser utilizada para este tipo de avaliação com segurança, apresentando valores bons e próximos aos do modelo físico. Esta constatação é importante, pois o modelo computacional não está limitado, como o modelo empírico-analítico, às situações específicas já analisadas e estudadas previamente, como é o caso do perfil *Creager*.

No mesmo sentido, quando o modelo computacional é feito, e o mesmo se aplica para o modelo físico, a capacidade de vazão é apenas um dos muitos resultados e análises que se buscam. Assim, neste caso mesmo o modelo empírico-analítico apresentando os melhores resultados para o parâmetro analisado, o modelo computacional poderia ser utilizado a fim de proporcionar também a visualização do escoamento, em que possíveis alterações e melhorias poderiam ser feitas com base nesta análise visual, além de que outros parâmetros poderiam ser analisados pela modelagem computacional.

Importa destacar também que, no caso da existência de um modelo físico, este seria utilizado para calibrar o modelo numérico computacional, o qual por sua vez estaria à disposição para outros ensaios no futuro os quais seriam muito demorados ou caros para o modelo físico, ou até mesmo impossíveis de serem realizados em vista do modelo físico em algum momento ter que ser desativado ou desmontado.

É necessário portanto sempre ter em mente que o sucesso de um modelo numérico CFD é medido em grande parte em função dos dados de entrada disponíveis para a calibração e verificação dos resultados. Estes dados podem vir de um modelo físico ou de um protótipo. Assim, o modelo físico se torna crítico para o sucesso do modelo numérico, principalmente para problemas hidráulicos ou obras hidráulicas não triviais.

CONCLUSÃO

O presente trabalho apresentou um comparativo entre os modelos hidráulicos disponíveis na determinação da capacidade de descarga em um vertedouro. O principal objetivo foi analisar se a modelagem computacional fornece bons resultados em relação à modelagem física e teórica.

Os resultados mostraram que a modelagem computacional se apresentou como uma boa ferramenta de auxílio na avaliação da capacidade de descarga, apresentando valores relativamente próximos aos do modelo físico, com uma diferença máxima de 5% entre os valores calculados tanto para o coeficiente de descarga como para as vazões. Além dos bons resultados alcançados, se mostrou de aplicação relativamente rápida e exigindo menos recursos na sua modelagem propriamente dita, quando comparado com o modelo físico.

Assim, como nem todos os projetos podem contar com o auxílio de um modelo físico, seja por questões financeiras (obras de pequeno porte, por exemplo) ou de tempo, e segundo este estudo de caso, o modelo computacional poderia ser utilizado para substituir o modelo físico, com grau quase equivalente de confiabilidade dos resultados para este tipo de análise, considerando uma estrutura vertente amplamente conhecida e estudada, proporcionando também uma análise visual do escoamento que pode resultar em melhorias e otimizações na estrutura e no seu funcionamento geral.

O objetivo não é desqualificar um ou outro modelo, mas sim apresentá-los como ferramentas complementares que devem ser utilizados de maneira conjunta pelo engenheiro hidráulico, no que se denomina atualmente de Modelagem Composta. Assim, a opção por um ou outro modelo, bem como a sua aplicabilidade conjunta para a resolução de um problema específico, estão relacionadas não somente com a capacidade de este modelo fornecer resultados confiáveis e de qualidade (eficácia), mas também, com o tempo e os custos envolvidos e despendidos para realização de tal análise (eficiência). Deste modo, faz-se necessária uma abordagem mais geral a respeito da opção por um modelo, buscando sempre bons resultados, em tempo hábil e a custos aceitáveis. Uma abordagem acerca da eficácia, eficiência e efetividade dos modelos hidráulicos disponíveis é apresentada e proposta por TRENTIN (2013).

Por fim, a continuidade deste trabalho para a análise de outras variáveis e fenômenos hidráulicos envolvidos é sugerida, para que se possa atestar cada vez mais a eficiência e eficácia dos modelos computacionais durante o dimensionamento, não só de vertedouros, mas também de outras estruturas hidráulicas complexas.

REFERENCIAS

FILL, G. C. (2011). Modelagem Hidrodinâmica 3D de Escoamentos em Vertedouros. Curitiba, 2011. 143 p. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental – PPGERHA, Universidade Federal do Paraná.

USER MANUAL. (2010). FLOW-3D®. v 10.

PINTO, N. L. S. et al. (1998). Notas de Aula da Disciplina de Mecânica dos Fluidos. Curitiba, 149 p. Apostila utilizada no Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal do Paraná – UFPR.

TRENTIN, R. A. (2013). Análise Comparativa entre Modelos Hidráulicos para Dimensionamento do Vertedouro em um Projeto Hidrelétrico. Florianópolis, 2013, 106 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação), Universidade Federal de Santa Catarina.

WENDT, T (2009). Aplicação de Modelo Computacional Hidrodinâmico à Jusante de uma Estrutura Hidráulica. Curitiba, 2009. 123 p. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental – PPGERHA, Universidade Federal do Paraná.

Tabela 2. Comparativo entre as vazões e os coeficientes de descarga obtidos pelos modelos físico, empírico-analítico e computacional utilizando a malha de 0,50 m para a região do vertedouro.

Ensaio/ Simulação	Modelo Físico			Modelo Computacional			Modelo Empírico-Analítico			Variação Entre o Modelo Computacional e o Modelo Físico		Variação Entre o Modelo Empírico-Analítico e o Modelo Físico	
	He (m)	Vazão (m³/s)	C (m ^{1/2} /s)	He (m)	Vazão (m³/s)	C (m ^{1/2} /s)	He (m)	Vazão (m³/s)	C (m ^{1/2} /s)	Vazão	Coeficiente	Vazão	Coeficiente
1	8,18	2070	1,940	8,18	2162	2,027	8,18	2076	1,945	4,44%	4,46%	0,28%	0,25%
2	10,99	3371	2,029	10,99	3482	2,096	10,99	3343	2,012	3,29%	3,30%	-0,83%	-0,83%
3	13,16	4491	2,063	13,17	4672	2,144	13,16	4485	2,060	4,03%	3,91%	-0,13%	-0,15%
4	15,40	5792	2,102	15,41	6044	2,191	15,40	5799	2,104	4,35%	4,24%	0,13%	0,10%
5	17,50	7173	2,149	17,51	7448	2,229	17,50	7194	2,155	3,83%	3,73%	0,29%	0,28%
				EQM=	38.535	0,007	EQM=	269	0,000				

Tabela 3. Comparativo entre as vazões e os coeficientes de descarga obtidos pelos modelos físico, empírico-analítico e computacional utilizando a malha de 0,25 m para a região do vertedouro.

Ensaio/ Simulação	Modelo Físico			Modelo Computacional			Modelo Empírico-Analítico			Variação Entre o Modelo Computacional e o Modelo Físico		Variação Entre o Modelo Empírico-Analítico e o Modelo Físico	
	He (m)	Vazão (m³/s)	C (m ^{1/2} /s)	He (m)	Vazão (m³/s)	C (m ^{1/2} /s)	He (m)	Vazão (m³/s)	C (m ^{1/2} /s)	Vazão	Coeficiente	Vazão	Coeficiente
1	8,18	2070	1,940	8,18	2146	2,012	8,18	2076	1,945	3,67%	3,69%	0,28%	0,25%
5	17,50	7173	2,149	17,52	7422	2,219	17,50	7194	2,155	3,47%	3,28%	0,29%	0,28%
				EQM=	33.889	0,005	EQM=	233	0,000				