

MODELAÇÃO NÚMERICA DO ESCOAMENTO NO DESCARREGADOR DE CHEIAS DA BARRAGEM DA CANIÇADA

Numerical Modelling of the Flow over the Spillway of Caniçada Dam

ANDREIA MOREIRA ⁽¹⁾ e FRANCISCO TAVEIRA-PINTO ⁽²⁾

⁽¹⁾ Mestre em Engenharia Civil, FEUP,
Rua do Dr. Roberto Frias, s/n, 4200-465 Porto, up200706631@fe.up.pt

⁽²⁾ Professor Catedrático, FEUP,
Rua do Dr. Roberto Frias, s/n, 4200-465 Porto, fpinto@fe.up.pt

Resumo

Apesar de o dimensionamento de estruturas hidráulicas ser ainda bastante baseado em experiências laboratoriais, os últimos trabalhos nesta área estão cada vez mais a integrar modelos numéricos neste processo. Este artigo aborda a aplicação de um modelo 2D, baseado no Método dos Volumes Finitos, para a análise das características do escoamento no descarregador de cheias da barragem da Caniçada. O modelo computacional ANSYS Fluent foi utilizado, tendo-se numa etapa inicial calibrado o modelo numérico em relação à resolução da malha, condições de fronteira e extensão do domínio computacional. Posteriormente, o modelo numérico foi validado com dados experimentais provenientes do modelo físico testado no Laboratório Nacional de Engenharia Civil. A comparação entre os resultados numéricos e experimentais revelou uma concordância razoável no caudal descarregado e nas pressões na crista e ao longo do descarregador, no entanto, os efeitos 3D existentes no trecho em salto de ski limitaram a extrapolação de resultados nesta zona em particular.

Palavras-chave: Aproveitamento hidroelétrico, descarregador de cheias, Mecânica dos Flúidos Computacional, Método dos Volumes Finitos, modelo bidimensional, modelos RANS.

Abstract

Although the design of hydraulic structures is still based on laboratory experiments, the latest works in this field are increasingly integrating numerical models into the process. This paper addresses the application of a 2D finite volume-based numerical model to investigate the hydraulic characteristics of the flow over the spillway of Caniçada dam. The numerical model has been calibrated towards mesh resolution, boundary conditions and extension of the computational domain and validated with experimental data. A reasonably good agreement was found for the discharges and pressures in the crest and spillway chute, yet, 3D effects existent on the circular-shaped flip bucket limited the extrapolation of results in this particular stretch.

Keywords: Hydropower plant, spillway, Computational Fluid Dynamics, Finite Volume Method, 2-dimensional model, RANS models.

1. Introdução

O descarregador de cheia com soleira tipo WES tem sido uma temática bastante abordada, dada a sua eficiência em descarregar os caudais de forma eficiente e segura, ser corretamente dimensionado. Savage and Johnson (2001) foram dos primeiros autores a demonstrar as capacidades dos modelos Computacionais de Flúidos Dinâmicos, CFD, para simular o escoamento em descarregadores de cheias. Determinaram as características da descarga e a distribuição de pressões sobre um descarregador de soleira WES, sem nível de água a jusante, usando o Método dos Volumes Finitos (MVF). Mais tarde, Johnson and Savage (2006) estenderam o estudo anterior para avaliar a distribuição de pressões sobre a estrutura quando existe um nível de água a jusante da estrutura. Outros autores também focaram a sua atenção na avaliação do escoamento em descarregares, incluído, por exemplo, Ho *et al.*, (2001), Kim e Park (2005), Kirkgoz *et al.*, (2009) em 2D, Dargahi (2006) e Morales *et al.*, (2012) em 3D.

A literatura publicada mostra que os modelos numéricos são capazes de produzir resultados precisos, não apenas para estudos realizados com geometrias simples, mas também para casos complexos e reais de descarregadores de cheias.

A aplicação de códigos de modelos CFD para modelar casos de estudo reais foi abordada por Dargahi (2010), Bhajantri *et al.*, (2006), Kim *et al.*, (2010), Kumcu (2016), entre outros. Kim *et al.*, (2010) usaram o modelo comercial FLOW-3D para rever o dimensionamento da barragem de Karian, na Indonésia. A simulação realizada para o dimensionamento revisto, o qual sugeriu que a elevação das paredes do canal de aproximação fosse aumentada, mostrou que o escoamento no descarregador estava estável e uma boa concordância foi obtida entre os resultados numéricos e experimentais. Kumcu (2016) também aplicou o FLOW-3D para avaliar as condições hidráulicas na barragem de Kavsak, em construção na Turquia, uma vez que o estudo realizado em modelo físico sugeriu a necessidade de diversas modificações ao projeto de dimensionamento inicial - a velocidade de entrada no descarregador era excessiva e existia risco de cavitação.

Para melhorar a performance do descarregador os pilares foram prolongados no sentido do reservatório de montante e o seu formato alterado, e foi igualmente incluída uma estrutura promotora do arejamento do escoamento, a qual reduz o risco de cavitação.

Os resultados do modelo CFD para a elevação da superfície livre e velocidade concordaram de modo geral com os resultados experimentais. Alguns dos estudos mencionados abordaram questões como o efeito da resolução da malha de cálculo, modelo de turbulência e tratamento da camada limite junto às fronteiras sólidas, nos resultados numéricos.

Uma vez que as primeiras grandes barragens foram construídas com informação hidrológica limitada, muitos dos descarregadores existentes estão subdimensionados para descarregar a cheia máxima provável revista, o que pode resultar em problemas de cavitação, entre outros.

O novo descarregador de cheias da barragem da Caniçada foi dimensionado após estudos de segurança, realizados em 2006, terem concluído que seria necessária uma estrutura adicional para se obter uma maior capacidade de descarga de caudais, e assim cumprir o novo Regulamento de Segurança de Barragens (RSB). De facto, é muito provável que, nos próximos anos, a maior parte do trabalho a ser realizado pelos engenheiros seja maioritariamente de reabilitação e renovação das estruturas existentes. Seguidamente descreve-se o estudo numérico, bidimensional, do novo descarregador de cheias da barragem da Caniçada.

Para garantir a validade do modelo numérico, este foi calibrado e validado utilizando dados relativos a caudais e pressões medidos em modelo físico. Este estudo procura avaliar a capacidade de um modelo 2D, baseado no MVF, simular o escoamento rapidamente variado em uma estrutura de elevada complexidade, em um curto período de tempo.

2. Caso de Estudo

A barragem da Caniçada está localizada no norte de Portugal, no rio Cávado, 17 km a jusante da barragem de Salamonde.

Esta barragem, construída em 1955, é uma barragem em arco, de betão, com uma altura máxima de 76 m relativamente à fundação. O reservatório tem uma capacidade de 153 hm³ para nível de pleno armazenamento (NPA) de 152.50 m. A barragem da Caniçada faz parte do sistema hidroelétrico Cávado-Rabagão-Homem explorado pela EDP Produção. O descarregador de cheias original é implantado na parte central do corpo da barragem (Figura 1), próximo do coroamento, sendo constituído por quatro orifícios retangulares, equipados com comportas. A máxima capacidade de descarga deste descarregador é de 1700 m³/s, para o máximo nível de cheia de 153.00 m.



Figura 1. Barragem da Caniçada (vista de jusante) (revista Visão, 2012).

Após estudos de análise de segurança realizados pela EDP Produção em 2006, no âmbito RSB, conclui-se que seria necessária uma estrutura de descargas de caudais de cheia adicional. Tal resultou no projeto e construção do descarregador de cheias complementar da barragem da Caniçada, o qual é o objeto de estudo do presente artigo.

O descarregador de cheias da barragem da Caniçada compreende: uma estrutura de entrada, constituída por uma soleira WES e equipada com duas comportas de superfície; um túnel de declive constante, localizado sob o encontro esquerdo da barragem, com cerca de 200 m de extensão; e uma estrutura terminal em salto de ski (Figura 2). O descarregador encontra-se dividido em dois vãos (dois canais). O caudal de dimensionamento desta estrutura é de 2062 m³/s, para um nível máximo de cheia de 152.83 m.

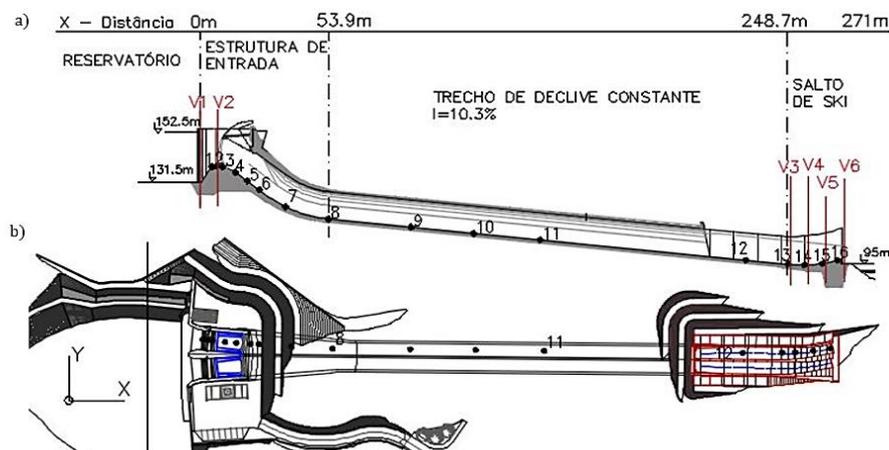


Figura 2. Descarregador da barragem da Caniçada. (a) perfil longitudinal - os pontos representam os 16 pontos de medição de pressão e V1 a V6 representam as secções de medição de velocidades, no modelo físico. (b) Vista em planta (modificado de Brandão, 2015).

3. Trabalho Experimental

Para validar e ajustar o projeto original para o descarregador de cheias complementar da Caniçada, foi construído e testado um modelo físico à escala reduzida no Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC).

O modelo físico foi construído com uma escala geométrica de 1/62, usando a semelhança de Froude (Figura 3). Para além do descarregador, o modelo físico também representa a barragem em arco, uma extensão significativa do reservatório a montante e o leito do rio a jusante.



Figura 3. Vista de jusante do modelo físico (Brandão, 2015).

A campanha experimental compreendeu a medição de várias grandezas ao longo de várias secções do descarregador, tais como, elevação da superfície livre, pressão, velocidade do escoamento e alcance do jato. Estas medições representam uma ferramenta valiosa para a validação do modelo numérico desenvolvido neste artigo. Foram testadas 5 condições hidrodinâmicas no modelo físico, definidas pelo caudal de dimensionamento e por quatro outros caudais inferiores a este, correspondendo a diferentes aberturas das comportas.

O caudal de dimensionamento de $2062\text{m}^3/\text{s}$ corresponde a uma situação em que as comportas estão totalmente abertas. Em todos os testes, o nível de água de montante foi mantido em 152.50m. O quociente entre a carga de água no reservatório, H , e a carga de dimensionamento do descarregador, H_d , é de H/H_d é 1.13.

Foram colocados 16 tubos piezométricos ao longo do descarregador, nomeadamente ao longo do eixo médio do perfil longitudinal do vão esquerdo do descarregador (Figura 2).

Os 7 primeiros pontos de medição localizam-se na estrutura de entrada, os 4 pontos de medição centrais localizam-se ao longo do trecho com declive constante, e os últimos 5 pontos de medição localizam-se ao longo da estrutura de saída do descarregador – o salto de ski.

Foram também medidas velocidades com recurso a um molinete, à profundidade correspondente a metade da elevação da superfície livre, em ambos os vãos do descarregador.

A localização dos pontos de medição de velocidades difere entre os dois vãos do descarregador: no vão esquerdo as medições de velocidade foram realizadas na estrutura de entrada, nas secções V1 e V2, e nas secções V4 e V6 no trecho final do descarregador; e no vão direito as medições de velocidade foram realizadas no início do descarregador, nas secções V1 e V2, e mais a jusante do mesmo, nas secções V3 e V5. Foram usadas duas hélices diferentes, calibradas para diferentes intervalos de velocidades, em particular 0.06ms a 5ms e 0.05m/s a 1m/s.

Mais pormenores sobre a campanha experimental estão descritos em Muralha *et al.*, (2014).

4. Modelo Numérico

O modelo computacional comercial ANSYS Fluent foi aplicado para estudar o escoamento ao longo do descarregador da barragem da Caniçada, para o caudal de dimensionamento sob o (NPA), o que corresponde a uma carga hidráulica sobre a crista do descarregador WES de 21m. Inicialmente, foi realizada uma análise de sensibilidade relativamente à resolução da malha, condições de fronteira e extensão do reservatório (L). Esta análise de sensibilidade foi restrita à estrutura de entrada do descarregador, como se pode observar na Figura 4.

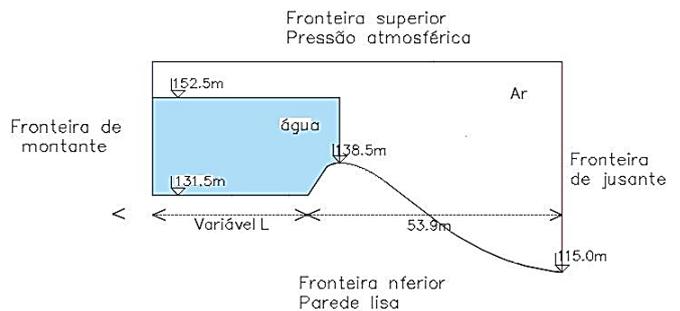


Figura 4. Esquema do domínio computacional e condições de fronteiras aplicadas.

Posteriormente, foi simulada a totalidade do descarregador. A geometria do modelo numérico foi desenhada a uma escala de 1:1.

A influência da resolução da malha nos resultados foi investigada com a simulação de 3 malhas não estruturadas com um número variável de elementos. Todas as malhas foram refinadas junto às fronteiras sólidas. A mínima resolução de malha foi definida tendo por base os requisitos de distância entre a fronteira sólida e a primeira camada de elementos e de parâmetros de qualidade da malha.

Relativamente à condição de fronteira (CF) de montante, considerou-se a possibilidade de implementar um perfil de velocidade, um caudal constante ou uma altura de água constante (pressão). A jusante do modelo computacional considerou-se uma condição de fronteira de pressão.

A influência da extensão do reservatório foi igualmente investigada. Para tal considerou-se um aumento de 75% e de 150% sobre o valor base de 33m. Esta modificação procurou investigar a influência das condições de entrada. O Quadro 1 sumariza a definição das 7 simulações realizadas.

Quadro 1. Calibração do modelo numérico.

Teste ID	CFDE MONTANTE	L (M)	Q (M ³ /s/M)
SIM1	Velocidade	33	117,6
SIM2	Velocidade	33	117,5
SIM3	Velocidade	33	117,6
SIM4	Caudal	33	117,8
SIM5	Pressão	33	135,1
SIM6	Caudal	57.75	119,2
SIM7	Caudal	82.5	117,8

Para resolver a turbulência, foi aplicado o modelo RNG $k-\epsilon$ uma vez que tem um custo computacional reduzido e já demonstrou produzir resultados precisos para o presente tipo de escoamentos. Sempre que existe uma fronteira convexa, tal como em um descarregador com soleira em WES, a assunção de que a distribuição de pressões é hidrostática não é válida, uma vez que as linhas de corrente são curvilíneas.

O modelo de turbulência RNG $k-\epsilon$ é uma versão modificada do modelo de turbulência standard $k-\epsilon$ que considera a influência da curvatura das linhas de corrente, permitindo uma maior precisão nos resultados numéricos, nomeadamente os resultados de pressões.

A camada limite foi resolvida utilizando uma *wall function* incorporada no código CFD utilizado. A utilização desta *wall function* evita a utilização de malhas extremamente finas junto das fronteiras sólidas, o que aumentaria significativamente o esforço e tempo computacional. A condição inicial foi definida tal que para o instante inicial existe uma coluna de água com 21m de altura tal como ilustrado na Figura 4.

O modelo *Volume of Fluid* (VOF), inicialmente aplicado por Hirt e Nichols (1981), foi usado para definir a superfície livre. O modelo VOF assume que cada fase (ar e água) são imiscíveis e, portanto, não considera o emulsãoamento.

Todas as simulações foram realizadas com um *time-step* variável, o qual é automaticamente determinado pelo código CFD, de forma a cumprir a condição de máximo número de *Courant-Friedrichs-Lewy* (CFL) de 1. O número CFL está relacionado com o quão depressa o fluido atravessa uma célula da malha. Se o CFL for maior que 1, a velocidade do fluido é tão elevada que passa através de uma célula em menos de um *time-step* (Haun *et al.*, 2011), o que não é recomendável.

O tempo total de simulação foi de 120s. Este período de tempo foi considerado suficiente para obter uma solução convergida, o que foi avaliado com base no balanço de massa que entra e sai do domínio computacional, assim como na variação da energia cinética do sistema ao longo da simulação.

A avaliação do balanço de massa refere-se à lei da conservação da massa. Devido às várias fontes de erros associadas à modelação numérica, a massa que entra na fronteira de montante do modelo computacional e a massa que sai na fronteira de jusante não serão exatamente iguais.

A Figura 5 compara as pressões obtidas experimentalmente com as pressões obtidas numericamente para os pontos P1 a P4. Para o caudal de dimensionamento testado não existem registos de velocidade na secção V2, apenas na secção V1 (na estrutura de entrada do descarregador).

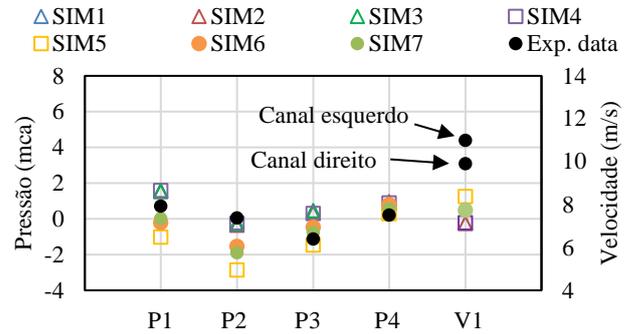


Figura 5. Pressões e velocidades determinadas experimental e numericamente.

Com esta análise de sensibilidade realizada, concluiu-se que a malha com a resolução SIM 1 é adequada, uma vez que as diferenças observadas relativamente às demais malhas foram pouco significativas.

Em relação à condição de fronteira aplicada a montante do modelo, os resultados mostram que a aplicação de um perfil de velocidades constante ou de um caudal constante tem uma performance muito semelhante.

Quando uma altura de água constante é prescrita nesta fronteira os resultados são menos precisos, comparativamente aos resultados do modelo computacional (Quadro 1), pelo que esta condição de fronteira não foi considerada adequada para simular o presente sistema hidráulico. Um aumento de 75% na extensão do reservatório demonstrou ter influência nas pressões numericamente determinadas na crista do descarregador, especialmente P1 e P2. Contudo, quando a extensão do reservatório é aumentada 150% poucas diferenças são observadas, em comparação com o aumento de 75%.

Os desvios encontrados entre as pressões na crista do descarregador determinadas experimentalmente e numericamente são provavelmente devidas à rápida variação das características do escoamento nesta zona (velocidade e pressão). A existência do pilar na entrada do descarregador pode também justificar estes desvios, uma vez que o mesmo não é representado no modelo numérico 2D. De facto, para P3 e P4 estes desvios já se encontram suavizados.

5. Análise de Resultados

A análise previamente descrita auxiliou na definição de um *setup* final para o modelo numérico, o qual garante uma melhor adequabilidade do mesmo aos dados experimentais disponíveis. Como anteriormente referido, nesta fase o descarregador foi simulado na sua extensão total, desde o reservatório até ao trecho em salto de ski. A condição de fronteira de montante foi definida como um caudal constante e o reservatório foi considerado com uma extensão de 57.75 m.

O domínio computacional foi discretizado em 274678 células. Os resultados numéricos obtidos para pressões e velocidades foram comparados com os dados experimentais correspondentes.

5.1. Pressões

O escoamento ao longo do descarregador, nos primeiros segundos, está ilustrado na Figura 6. Esta figura mostra os contornos de pressão nos *time-steps* iniciais, nomeadamente 0.5 s, 1 s, 2 s e 3 s. Em $t=0.5$ s a massa de água inicialmente em repouso começa a fluir ao longo da crista do descarregador e em $t=2$ s a frente da onda já alcançou uma velocidade da ordem de grandeza de 17.5-26.3 m/s. A pressão hidrostática prevalece no reservatório, enquanto que o descarregador está sujeito a pressões não-hidrostáticas devido à variação rápida das características do escoamento ao longo da superfície convexa. À medida que o escoamento progride ao longo do descarregador, as pressões sobre o fundo do canal aumentam, no entanto, na crista do descarregador ocorrem pressões negativas. Aproximadamente após 10s de simulação, o escoamento atinge a fronteira de jusante. O caudal descarregado no modelo numérico foi de 118.6 m³/s/m enquanto que no modelo físico este foi de 117.8 m³/s/m.

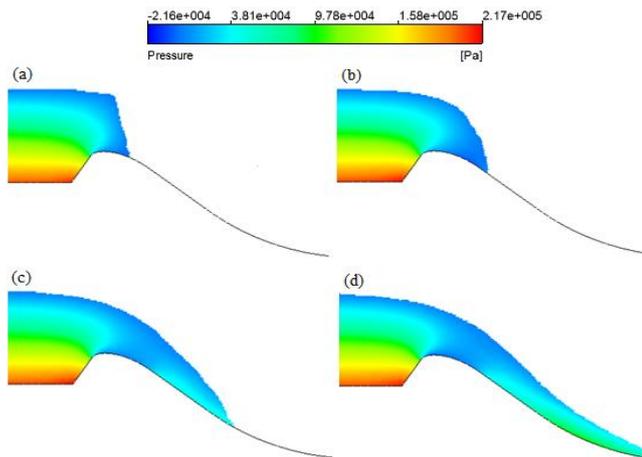


Figura 6. Contornos de pressão na estrutura de entrada do descarregador (0m < x < 53.9m), nos time-steps iniciais: (a) 0.5s; (b) 1s; (c) 2s; e (d) 3s.

A análise do campo de pressões sobre o descarregador é de grande interesse. Comumente, os descarregadores têm na sua geometria duas superfícies curvas – uma curva convexa, na crista do descarregador, e uma curva concava, na zona do salto de ski. A curvatura das linhas de corrente induz uma aceleração normal à direção do escoamento considerável, de tal forma que a distribuição de pressões é não hidrostática. Numa superfície convexa, esta aceleração tem a direção oposta às forças de gravidade, enquanto numa superfície côncava acontece o oposto. Quando o nível do reservatório está acima do nível de dimensionamento, o que acontece no caso ($H/H_d=1.12$), pode ocorrer pressão excessiva sub-atmosférica na crista do descarregador. Neste caso o potencial de dano e instabilidade no descarregador aumenta devido à possibilidade de cavitação. Contudo, cargas hidráulicas superiores à de dimensionamento permitem maior vazão, pelo que o risco de cavitação deve ser avaliado.

Os dois fatores que influenciam a ocorrência de cavitação são a pressão e a velocidade do escoamento. Estes, combinados com a densidade do fluido definem o número de cavitação, Ca, que permite avaliar o risco de cavitação. Quanto menor o valor de Ca, maior o risco de cavitação. Um valor de Ca de 0.2 é normalmente considerado para superfícies de betão lisas (Falvey, 1990).

A Figura 7 mostra as pressões determinadas numericamente e compara-as com as experimentais, mostrando o erro relativo associado.

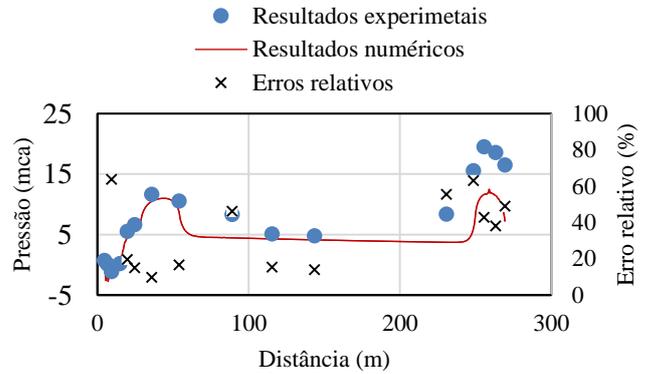


Figura 7. Pressões determinadas experimental e numericamente ao longo do descarregador.

Analisando as pressões na zona inicial do descarregador, verifica-se a ocorrência de pressões negativas na crista do descarregador ($P_2=-1.5$ mca). No modelo físico, o ponto de medição em que foi registado um valor de pressão negativo foi em P_3 (-1.13 mca). Uma vez que a velocidade do escoamento é nula junto a fronteira sólida, a velocidade para a determinação do número de cavitação foi avaliada no final da camada limite. O número de cavitação determinado para P_2 foi de 0.68, portanto segundo os resultados numéricos não se prevê a ocorrência de cavitação. Contudo, as incertezas relacionadas com os valores numéricos determinados não tornam tal consideração apropriada para efeitos de dimensionamento final da estrutura. Para tal, um modelo 3D deverá ser construído e simulado. Os erros relativos determinados para os primeiros quatro pontos de medição (P_1 a P_4) foram superiores a 100%. Nesta zona, a crista do descarregador, as pressões variam muito rapidamente e qualquer imprecisão relacionada com o ponto de medição e sua localização pode conduzir a erros muito significativos. Possíveis perturbações do escoamento na aproximação do descarregador podem igualmente justificar as diferenças observadas. Nos pontos de medição seguintes (P_5 a P_7), o erro relativo foi, em média, aproximadamente 15%.

Relativamente às pressões determinadas no trecho de declive contante, a máxima pressão foi registada em P_8 o que é consistente com os resultados. No entanto, em P_9 existe uma diferença significativa entre os resultados experimentais e numéricos, de tal forma que o modelo numérico subestima a pressão. Esta diferença poderá dever-se à mudança de secção transversal que ocorre imediatamente a montante deste ponto (Figura 2). Este fato é igualmente suportado pelo facto de o modelo físico mostrar uma significativa elevação da superfície livre nesta zona.

Ao longo do trecho de declive constante as pressões decrescem até ao início da estrutura em salto de ski, e os resultados do modelo 2D aproximam-se dos experimentais. A ordem de grandeza das pressões determinadas na zona do salto de ski é substancialmente inferior às experimentais. Uma avaliação dos dados experimentais revela que, nesta zona, os efeitos 3D são consideráveis, existindo uma assimetria na elevação superfície livre, junto às paredes do canal – as pressões medidas junto à parede lateral direita do canal são superiores aquelas medidas junto a parede lateral esquerda do mesmo. Tal deve-se à existência de uma curva em planta nesta zona do descarregador, cujo objetivo é direcionar os jatos para o curso de água natural. Este efeito 3D justifica os erros relativos significativos (aproximadamente 50%, em média). Ainda assim, o máximo valor de pressão foi registado em P14 quer no modelo numérico, quer no modelo experimental. De um modo geral, é relevante mencionar que o modelo 2D representou razoavelmente a evolução genérica das pressões ao longo do descarregador.

5.2. Velocidades

Para o caudal de dimensionamento existem medições experimentais de velocidade nas secções V1, V3, V5 e V6, em diferentes vãos do descarregador. O Quadro 2 sumariza os resultados experimentais e numéricos obtidos.

Quadro 2. Velocidades determinadas experimental e numericamente ao longo do descarregador.

Secção ID	EXPERIMENTAL		NUMÉRICO
	CVD	CVE	
V1	9,9	11	7,8
V3	-	27	32
V5	-	38,8	31,5
V6	22,4	-	32

Os resultados experimentais mostraram que as velocidades no vão direito do descarregador são superiores à do vão esquerdo. Muralha *et al.* (2014) afirmou que a imprecisão das medições devido a dificuldades em estabilizar e orientar o molinete é possível. Estes factos dificultam a análise de resultados. Ainda, o tamanho da hélice do molinete (desconhecido) em comparação com a profundidade de água do modelo físico poderá não ser negligenciável.

De forma a avaliar os processos hidrodinâmicos ao longo do descarregador 2D procedeu-se à medição dos perfis verticais de velocidade em 16 localizações, as mesmas onde as pressões foram medidas, (Figura 2), agora designadas de VEL1 a VEL16.

A Figura 8 mostra os perfis verticais de velocidade derivados do modelo numérico. Pode verificar-se que a velocidade do escoamento vai aumentando gradualmente após a crista do descarregador, de tal forma que é visível uma mudança na forma do perfil.

À medida que o escoamento progride para jusante verifica-se a formação e gradual aumento da camada limite turbulenta, bem como uma diminuição da elevação da superfície livre.

Na zona mais a jusante do descarregador, o perfil de velocidades aproxima-se da distribuição logarítmica de velocidades. No trecho do salto de ski, a forma do perfil altera-se, apesar de as alterações serem pouco significativas.

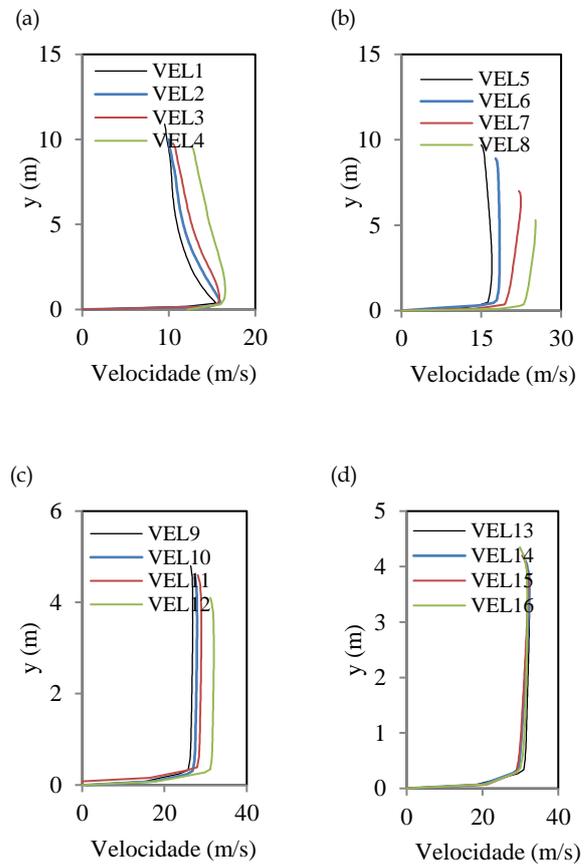


Figura 8. Perfis de velocidade determinados experimentalmente.

6. Conclusões

O modelo numérico ANSYS Fluent, baseado no Método dos Volumes Finitos, foi aplicado para investigar o escoamento no descarregador de cheias complementar da barragem da Caniçada. A construção de um modelo 2D para o estudo desta complexa estrutura hidráulica permitiu a obtenção de resultados rapidamente, uma vez que o esforço computacional requerido foi limitado. No entanto, a não consideração dos efeitos 3D existentes em protótipo requer que a análise de resultados do modelo 2D seja feita com reservas.

As comparações realizadas entre as pressões obtidas experimental e numericamente mostraram que o presente modelo reproduz razoavelmente o comportamento hidráulico geral do descarregador, especialmente na zona da estrutura de entrada e sequente trecho de declive constante, à exceção da zona em que existe variação da secção transversal do descarregador. Para a pressões registadas no trecho do salto de ski foram verificadas diferenças muito significativas.

Os perfis de velocidade avaliados ao longo do descarregador mostram as principais alterações que ocorrem nas características do escoamento, nomeadamente, a formação e gradual espessamento da camada limite turbulenta, o aumento progressivo da velocidade e diminuição da elevação da superfície livre.

O estudo bidimensional apresentado constituiu uma tentativa preliminar de avaliar o comportamento hidráulico deste descarregador, sob o caudal de dimensionamento. As diferenças registadas entre resultados numéricos e experimentais devem-se à não consideração dos efeitos 3D. Para tal, a construção de um modelo 3D será realizada futuramente.

Agradecimentos

O primeiro autor recebeu uma Bolsa de Doutoramento da Fundação para a Ciência e Tecnologia (FCT) com a referência SFRH/BD/102192/2014.

Referências

- Bhajantri, M.R., Eldho, T.I. e Deolalikar, P.B. (2006). *Hydrodynamic modelling of Flow Over a Spillway Using a Two Dimensional Finite Volume Based Numerical Model*, Sadhana, 31(6), 743-754.
- Brandão, L. (2015). *Modelação numérica 3D de escoamentos em descarregadores de cheia - Aplicação ao descarregador de cheias complementar do aproveitamento hidroelétrico da Caniçada*, Tese de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal
- Dargahi, B. (2006). *Experimental study and 3D numerical simulations for a free-overflow spillway*, Journal of Hydraulic Engineering, 132(9), 899-907.
- Dargahi, B. (2010). *Flow characteristics of bottom outlets with moving gates*, Journal of Hydraulic Research, 48(4), 476-482.
- Falvey, H. T. (1990). *Cavitation in chutes and spillway*, Engineering Monograph No.42, US Department of the Interior, Bureau of Reclamation, Denver, Colorado.
- Haun, S., Olsen, N. R. B., e Feurich, R. (2011). *Numerical modeling of flow over trapezoidal broad-crested weir*, Engineering Applications of Computational Fluid Dynamics, 5(3), 397-405.
- Hirt, C.W. e Nichols, B.D. (1981). *Volume of Fluid (VOF) Method for the Dynamics of Free Boundaries*, Journal of Computational Physics, 39, 201-225.
- Ho, D. K. H., Boyes, K.M., e Donohoo, S. M. (2001). *Investigation of spillway behaviour under increased maximum flood by computational fluid dynamics technique*, 14th Australasian Fluid Mechanics Conference, Adelaide University, Adelaide, Australia.
- Johnson, M. C. e Savage B. M. (2006). *Physical and numerical comparison of flow over ogee spillway in the presence of tailwater*, Journal of Hydraulic Engineering, 132(12), 1353-1357.
- Kim, S., Lee, H., e An, S. (2010). *Improvement of hydraulic stability for spillway using CFD model*, International Journal of the Physical Sciences 5(6), 774-780.
- Kim, D. G. e Park, J. H. (2005). *Analysis of flow structure over ogee-spillway in consideration of scale and roughness effects by using CFD model*, KSCE Journal of Civil Engineering, 9(2), 161-169.
- Kirkgoz, M. S., Akoz, M. S. e Oner, A.A. (2009). *Numerical modeling of flow over a chute spillway*, Journal of Hydraulic Research, 47(6), 790-797.
- Kumcu, S. (2016). *Investigation of flow over spillway modelling and comparison between experimental data and CFD analysis*, KSCE Journal of Civil Engineering, 1-10.
- Morales, V., Torkeyay, T. E., & García, M. H. (2012). *Numerical modeling of Ogee crested spillway and tainter gate structure of a diversion dam on Cañar River, Ecuador*, XIX International Conference on Water Resources, Urbana-Champaign, USA.
- Muralha, A., Brandão, L. e Couto, L. T. (2014). *Barragem de Caniçada. Descarregador de cheias complementar: Medições em modelo hidráulico reduzido para calibração de modelo numérico*, Nota técnica 04/2014, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, Portugal.
- Savage, B. M. e Johnson, M. C. (2001). *Flow over Ogee Spillway: Physical and Numerical Model Case Study*, Journal of Hydraulic Engineering, 127(8), 640-649.