



MODELAÇÃO NUMÉRICA 3D DE ESCOAMENTOS EM SUPERFÍCIE LIVRE COM EMULSIONAMENTO DE AR E FOSSA DE EROSIÃO.

Eddy PEREIRA¹, António PINHEIRO²

1. FUTURE PROMAN, S.A, Alameda Fernão Lopes, n.º 16, 10.º piso, 1495-190 Algés, Portugal
eddy.pereira@future.proman.pt

2. CERIS, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, Av. Rovisco Pais, 1, 1049-001 Lisboa, Portugal
antonio.pinheiro@tecnico.ulisboa.pt

RESUMO

Através do presente trabalho pretendeu-se aferir as capacidades de simulação dos submodelos de emulsão de ar e transporte sólido incorporados no modelo de simulação FLOW-3D® numa aplicação ao descarregador complementar da barragem de Salomonde, tendo por base os resultados obtidos por Silva (2013) e em modelo físico. Neste contexto, avaliaram-se as principais diferenças nas características do escoamento ao longo do descarregador e do jato livre que se forma a jusante da estrutura terminal, decorrentes da implementação do modelo de emulsão de ar. Avaliou-se também o submodelo de transporte sólido, mediante análise do desenvolvimento da fossa de erosão na zona de impacto do jato. Aplicou-se, ainda, o Flow-3D® no estudo de geometrias alternativas para a estrutura terminal do descarregador, analisando a forma dos jatos produzidos e as respetivas erosões formadas no leito a jusante. Da implementação do modelo de emulsão de ar, verificaram-se melhorias na reprodução do jato livre da geometria proposta pelo LNEC, bem como o adequado funcionamento hidráulico das geometrias alternativas propostas.

Palavras-Chave: CFD (Flow-3D®); Descarregador de Cheias; Emulsão de ar; Jato livre; Transporte sólido.

1. INTRODUÇÃO

A aplicação de modelos CFD (Computacional Fluid Dynamics) verifica ser atualmente um método de grande utilidade em projetos de engenharia, permitindo a reprodução de soluções alternativas em fase prévia aos ensaios em modelo físico, apoiando as equipas técnicas na tomada de decisão. Comparativamente aos modelos físicos, os modelos CFD permitem a redução de custos e de tempo na elaboração de projetos, para além de permitirem testar diferentes cenários de operação, sem introdução de efeitos de escala à dimensão do protótipo. Os modelos numéricos 1D e 2D apresentam-se limitados na representação das variáveis características dos escoamentos em regime rapidamente variado comparativamente às potencialidades dos modelos CFD 3-D que permitem simular com elevada precisão os efeitos da turbulência associados a este tipo de regime. No domínio das estruturas hidráulicas, os modelos CFD permitem reduzir o recurso a modelos físicos, bem como simular numericamente soluções à escala dos protótipos de forma a evitar efeitos de escala decorrentes da simulação em modelo físico. É o caso dos escoamentos bifásicos, cujos efeitos de escala inerentes aos ensaios em modelo físico à escala reduzida podem ser ultrapassados ou mitigados com recurso à modelação CFD à escala dos protótipos. Assim, os modelos CFD apresentam-se como uma ferramenta adicional no apoio à conceção de estruturas hidráulicas, permitindo complementar os ensaios em modelo físico.

De forma a cumprir os requisitos atualizados do Regulamento de Segurança de Barragens, a EDP procedeu à avaliação de segurança hidráulico-operacional da barragem de Salomonde, incluindo a revisão dos cenários de cheias e avaliação da capacidade dos dispositivos de segurança.

Desta avaliação resultou a necessidade de implementação de algumas medidas corretivas, as quais contemplaram a construção de um descarregador de cheias complementar. Este consiste num túnel escavado na encosta direita, com capacidade de descarga de 1250 m³/s, sendo composto por uma soleira WES composta regulada por duas comportas de segmento, um túnel com 120 m de comprimento e com geometria variável e uma estrutura terminal com contração do lábio de saída.

2. ENQUADRAMENTO

Este trabalho enquadra-se no domínio de uma dissertação de mestrado realizada em 2016, sendo que surge no seguimento do trabalho desenvolvido por Silva (2013), o qual avalia as capacidades da modelação de escoamentos recorrendo ao software FLOW-3D® com calibração do modelo computacional através de análises de sensibilidade à malha de cálculo, modelos de turbulência, método de captação da superfície livre e métodos numéricos de aproximação da equação de transporte da quantidade de movimento, validados através de dados recolhidos em modelo físico.

O principal objetivo deste trabalho prende-se com a implementação do modelo de emulsão de ar integrado no software Flow-3D®, por forma a avaliar as alterações sobre as características do escoamento, nomeadamente, alturas, velocidades e determinar as concentrações de ar no escoamento. Esta análise resulta da recomendação de Silva (2013), o qual destaca a subestimação do alcance do jato livre em 25% por comparação aos valores obtidos em modelo físico.

Para além das simulações incidentes sobre a geometria proposta pelo LNEC, foram ainda objeto de análise neste trabalho a simulação dos escoamentos em três geometrias alternativas por alteração à estrutura terminal e pelo prolongamento do septo de separação do escoamento na estrutura em túnel. Complementarmente, analisou-se o potencial do modelo numérico de erosão e transporte sólido para simulação da erosão resultante da incidência dos jatos livres sobre o leito a jusante da barragem de Salamonde.

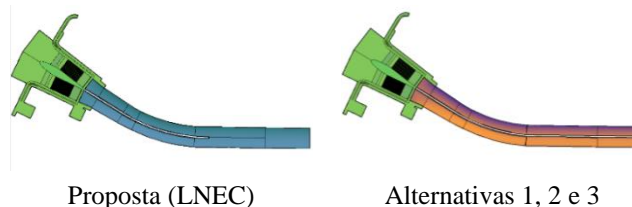


Fig. 1. Estruturas em túnel analisadas (à esquerda: geometria de projeto, à direita: geometria alternativa).

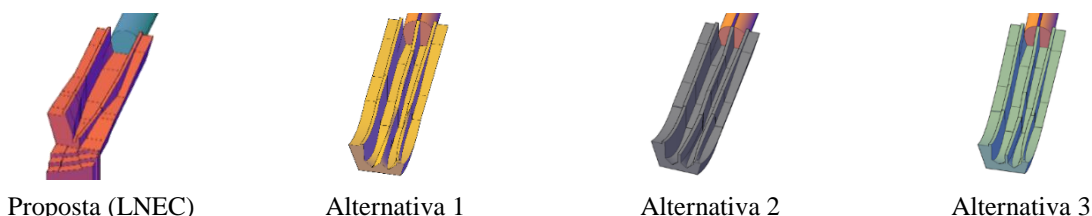


Fig. 2. Estruturas terminais analisadas (à esquerda: geometria de projeto, à direita: 3 geometrias alternativas)

3. CONCEPÇÃO DO MODELO COMPUTACIONAL E SIMULAÇÕES EM FLOW-3D®

A modelação dos escoamentos no descarregador complementar foi realizada na situação correspondente ao caudal de dimensionamento, de 1233 m³/s, decorrente de uma cheia com período de retorno de 1000 anos. A essas condições corresponde o NMC de 270,64 m, associado a um caudal conjunto de dimensionamento de 2828 m³/s com o funcionamento simultâneo dos descarregadores original e complementar, na situação de abertura total das comportas.

Apesar do modelo computacional estabelecido por Silva (2013) se encontrar validado, foram realizados diversos testes de sensibilidade baseados em critérios qualitativos sobre o jato livre, assumindo como elementos de base a documentação complementar de (Teixeira, Couto, Muralha, & De Melo, 2014). A análise de sensibilidade realizada numa primeira fase (Fase1), caracterizada por células de cálculo de 1,00 m no bloco de cálculo do jato livre, tem como propósito a avaliação qualitativa e quantitativa da influência de determinadas opções numéricas na configuração e o alcance do jato, respetivamente. Assim, os testes numéricos incidem na combinação de diversos parâmetros, nomeadamente, modelos de turbulência, *TLEN*, métodos *VOF*, manipulação das condições de fronteira no bloco de cálculo do jato livre e ativação sucessiva do submodelo de emulsão de ar. Dos resultados obtidos nesta fase, realça-se a particular importância em assumir um compromisso entre a qualidade dos resultados e o tempo de cálculo. No seguimento da primeira fase, foi realizada uma segunda análise de sensibilidade para células de cálculo de 0,50 m (totalizando aproximadamente 2,87x10⁶ células de cálculo), através da implementação sucessiva de submodelos e modelos complementares de emulsão de ar. De entre os modelos complementares de emulsão de ar, salientam-se a aplicação dos módulos *Scalar*, *Density*

evaluation, Drift-Flux, Adiabatic bubble e Surface tension. Para além da aplicação do modelo de turbulência RNG $k-\epsilon$ com TLEN fixo e automático, avaliou-se o modelo LES.

Tabela 1. Malha de cálculo (m) adotada em fase de análise de sensibilidade e em fase de validação de resultados.

Fase da análise de sensibilidade / Tempo de simulação	Albufeira	Estrutura de entrada	Estrutura em túnel	Estrutura terminal e jato livre	Restituição
Fase 1* – t=150s	1,00	0,50	0,50	1,00	1,00
Fase 2** – t=30s	Não simulado	Não simulado	Não simulado	0,50	1,00
*Número de células de cálculo ativas: 1,18 x 10 ⁶ Tempo de processamento: 3dias/15h/36min					
**Número de células de cálculo ativas: 1,69 x 10 ⁶ Tempo de processamento: 6h/14min					

A análise de resultados teve como 8 secções (S) na geometria em túnel e 2 secções na estrutura terminal, nomeadamente para avaliação das alturas e velocidades de escoamento, das pressões dinâmicas sobre as paredes do descarregador e das concentrações de ar. Avaliou-se ainda a curva de vazão na estrutura de controlo e o alcance dos jatos livres na geometria proposta e geometrias alternativas.

O modelo computacional do leito a jusante (*packed sediment component*) teve em consideração um tempo de simulação de 250 s, com células de cálculo de 1,00 m em todo o domínio computacional para o escoamento líquido e sólido, e com desativação do modelo de transporte sólido e ativação do modelo de erosão com um coeficiente de sustentação hidrodinâmica de 0,022 e rugosidade equivalente de Nikuradse de 1,0. Refere-se que a ativação do modelo de transporte sólido não permite a ativação do modelo de emulsão de ar.

4. RESULTADOS DA MODELAÇÃO NUMÉRICA DOS ESCOAMENTOS E FOSSAS DE EROSÃO

Em relação às alturas de escoamento para a geometria proposta, verifica-se que a implementação do modelo de emulsão (Proposta #C.E) conduz ao aumento da capacidade de vazão do descarregador de cheia (de 1233 m³/s para 1357 m³/s). Verifica-se o empolamento da veia líquida com um aumento progressivo das diferenças relativas da altura média do escoamento na estrutura em túnel, iniciando-se com uma diferença de +3,9% na S1, +11,3% e + 12,2% na S5 e S6 (zona em curva, coincidente com a zona terminal do septo de separação dos escoamentos), respetivamente, e +26,9% na S8 (zona terminal do túnel). Esta constatação pode ser explicada não só pelo aumento da capacidade de vazão da simulação #C.E, bem como pelo facto da ativação do modelo de emulsão propiciar o empolamento progressivo do escoamento, sendo mais notório ao longo da região de regime de escoamento variado, a jusante da secção de afloramento da camada limite (Chanson, 1989), onde os efeitos da turbulência são mais significativos. Na estrutura terminal, verifica-se que a área molhada que traduz o empolamento é +17,0% na S9 e +27,1% no lábio de saída (zona de contração do escoamento para saída em jato livre). Em relação às velocidades médias do escoamento, verifica-se que a simulação #C.E traduz uma redução progressiva de -1,2% na S1 a -3,8% na S8, por comparação com os resultados #S.E. Esta constatação pode ser explicada pelo empolamento do escoamento. As velocidades máximas na estrutura em túnel verificam um aumento apenas na S1 (em +3,0%), onde se verifica maior gradiente de velocidade associado à estrutura de controlo. Nas restantes secções, verifica-se uma diminuição das velocidades máximas nunca superiores a 1,5%. Relativamente às pressões dinâmicas exercidas nas paredes do descarregador de cheias, verifica-se um reduzido aumento (+0,80%) na simulação #C.E, o qual pode ser justificado pelo facto da capacidade de vazão aumentar com a ativação do modelo de emulsão de ar, com conseqüente aumento das forças hidrodinâmicas na estrutura em túnel. No que diz respeito à concentração média de ar no escoamento, verifica-se o seu aumento progressivo para jusante, desde +1,4% na S1 até + 13,3% na S8, com maior concentração de ar na galeria esquerda onde se verificam maiores valores de TLEN. No que diz respeito ao jato livre, verifica-se que o modelo físico e a simulação #C.E apresentam uma configuração no seu desenvolvimento muito semelhantes, apesar de se verificar uma maior deflexão lateral do jato livre, com reprodução mais ajustada, por comparação à simulação #S.E (Fig. 3). O alcance máximo do jato livre, de 56,3 m na simulação #C.E, apresentou uma redução em -0,7% face ao alcance máximo registado #S.E. A reprodução da configuração da fossa de erosão apresentou ser razoável, com diferenças relativas de erosão da fossa e acreção da barra em -16% e +9%, respetivamente (Fig.4). Julga-se que os efeitos de escala associados à definição do ângulo de repouso apresentam influência na modelação da fossa de erosão.

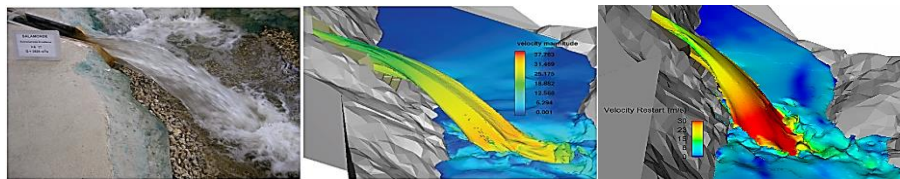


Fig. 3. Simulação do jato livre (à esquerda: modelo físico, ao centro: modelo de Silva (2013), à direita: modelo #C.E)

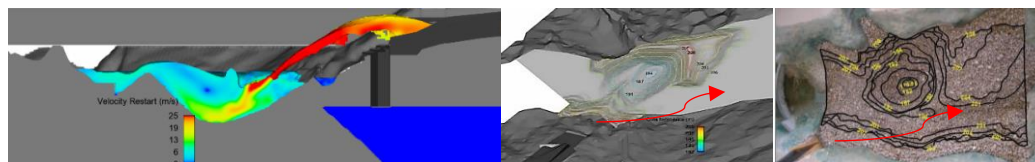


Fig. 4. Simulação da fossa de erosão (à esquerda e ao centro: modelo computacional e à direita: modelo físico).

As geometrias alternativas simuladas numericamente apresentaram resultados muito satisfatórios, verificando-se maior confinamento do escoamento na estrutura em túnel, sem comprometer o funcionamento hidráulico da mesma. Relativamente à modelação dos jatos livres, as estruturas terminais alternativas permitiram o afastamento dos jatos da encosta direita, com dispersão lateral distribuída de forma adequada sobre o leito de jusante (Fig5). A geometria alternativa 2 permitiu uma redução em 11% da profundidade máxima de erosão.

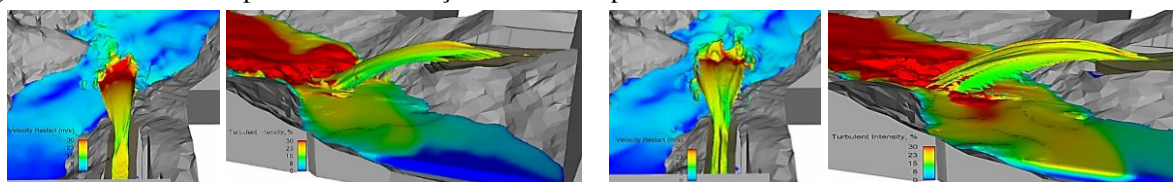


Fig. 5. Simulação dos jatos livres #C.E (à esquerda: geometria proposta (LNEC), à direita: geometria alternativa 2).

5. CONCLUSÕES

A aplicação do software Flow-3D® apresentou resultados adequados à modelação dos escoamentos com emulsão de ar e na formação de fossas de erosão. As diferenças apresentadas entre o modelo físico e numérico #C.E podem ser justificadas pelo facto da modelação numérica do escoamento em protótipo possibilitar a entrada de ar, contrariamente aos modelos físicos à escala de Froude que limitam a reprodução dos efeitos de Morton. A subestimação do alcance máximo face aos resultados em modelo físico pode ser explicada pelo aumento da dissipação da energia cinética do jato com a atmosfera, a qual contempla a reprodução dos efeitos de escala no protótipo. Apesar dos tempos computacionais, esta metodologia revela ser de grande utilidade prática na avaliação da eficiência de configurações de estruturas hidráulicas de grande complexidade em fase previa aos ensaios em modelo físico, permitindo garantir segurança acrescida na escolha das soluções de projeto e garantindo a redução de custos e de tempo de validação das mesmas.

AGRADECIMENTOS

Os autores expressam o seu reconhecimento à Energias de Portugal (EDP) pela disponibilização dos resultados do ensaio em modelo físico do descarregador complementar da barragem de Salamonde, levados a cabo no Laboratório Nacional de Engenharia Civil.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Chanson H (1996) Phénomène d'entraînement d'air. In: La Houille Blanche, No 6-1989
- Silva M (2013) Modelação numérica 3D de escoamentos em descarregadores de cheias com escoamento em superfície livre. Descarregador complementar de Salamonde. In: Tese de mestrado. Técnico Lisboa-Universidade de Lisboa
- Teixeira L, Couto A, Muralha J, & De Melo, F (2014). Descarregador complementar da barragem de Salamonde. Ensaios hidráulicos em modelo reduzido.