

Análise numérica do escoamento a jusante de uma comporta segmento invertida

Numerical analysis of flow downstream of a reverse Tainter gate

Marcelo Dalla Corte¹

Universidade do Vale do Rio dos Sinos, Brasil
marcelodallacorte@gmail.com

Rejane De César Oliveski¹

Universidade do Vale do Rio dos Sinos, Brasil
decesaroo@gmail.com

Marcelo Giulian Marques²

Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil
mmarques@iph.ufrgs.br

Mariane Kempka²

Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil
kempka.mariane@gmail.com

Resumo. As comportas segmento invertida são frequentemente utilizadas no controle de fluxo em sistemas de enchimento e esvaziamento de eclusas de navegação de alta queda. Objetivando um melhor entendimento da dinâmica do escoamento a jusante desse tipo de comporta, vem sendo realizada uma pesquisa que procura associar a modelagem numérica com a análise experimental de forma a identificar as características do escoamento e possibilitar o desenvolvimento de soluções que evitem danos à estrutura, uma vez que as mesmas estão submetidas a fenômenos hidráulicos nocivos. Neste trabalho, são apresentados alguns resultados obtidos nas simulações numéricas do escoamento através de uma comporta segmento invertida. Foram estudados casos em regime de escoamento permanente para diferentes vazões volumétricas e percentuais de abertura da comporta. Os resultados numéricos de pressões médias na base e no teto do conduto a

Abstract. The reverse Tainter gates are frequently used in flow control for filling and emptying systems of high lift navigation locks. In order to better understand the dynamics of the downstream flow of this gate, a research that seeks to associate the numerical modeling with experimental analysis is being conducted in order to identify the characteristics of the flow and to enable the development of solutions that avoid damage to the structure, since they are subject to several harmful hydraulic phenomena. This paper presents some of the results obtained in the numerical simulations of flow through a reverse Tainter gate. Cases in steady flow condition were studied for different volumetric flow rates and percentages of gate opening. The numerical results of average pressures at the bottom and at the top of the downstream conduit of the gate were compared with the results obtained in the experimental model. The results obtained with the

¹ Universidade do Vale do Rio dos Sinos. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. Av. Unisinos, 950, Cristo Rei, 93022-000, São Leopoldo, RS, Brasil.

² Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH). Av. Bento Gonçalves, 9500, 91501-970, Porto Alegre, RS, Brasil.

jusante da comporta são comparados com os resultados obtidos no modelo experimental, apresentando boa concordância entre si.

Palavras-chave: eclusas de navegação, comporta segmento invertida, simulação numérica, CFX.

numerical model are in agreement with the experimental results.

Key words: navigation locks, reverse Tainter gate, numerical simulation, CFX.

Introdução

Eclusas de navegação são estruturas construídas para permitir que embarcações transponham, de forma segura e eficiente, os desníveis gerados por barreiras pontuais, sejam elas de origem natural (quedas de água e istmos) ou de ação antrópica (barramentos). Uma eclusa constitui-se, basicamente, por (USACE, 2006): uma câmara, dentro da qual é possível variar o nível da água segundo as condições externas de montante e jusante, seguindo o princípio de vasos comunicantes; um sistema de distribuição de água; canais de aproximação superior e inferior, conforme mostra o esquema da Figura 1.

As eclusas são classificadas de acordo com o desnível (diferença entre os níveis de água a montante e a jusante), podendo ser de: Baixa queda (≤ 10 metros), Média queda (10-15 metros), Alta queda (≥ 15 metros).

Para transpor grandes desníveis, estudos econômicos têm indicado, como opção de me-

nor custo, a construção do menor número de eclusas, resultando na transposição individual de desníveis significativos. Esse fato contribui para o aumento gradativo das quedas de projeto das eclusas.

Entre os principais problemas de projeto encontrados em eclusa de alta queda, destacam-se as condições de amarração das embarcações na câmara. Para garantir a segurança das embarcações, a movimentação da superfície da água na câmara da eclusa deve ser uniforme, exigindo, para tanto, um sistema de distribuição hidrodinamicamente balanceado.

Outro ponto crítico nas eclusas de alta queda ocorre junto às comportas de controle do enchimento e do esvaziamento. Nessas eclusas, comportas do tipo segmento invertida são frequentemente utilizadas no controle de fluxo. A Figura 2 mostra um esquema desse tipo de comporta, onde se pode observar o conduto principal, a chaminé de equilíbrio e a comporta, assim como a zona de recirculação que se forma após esta.

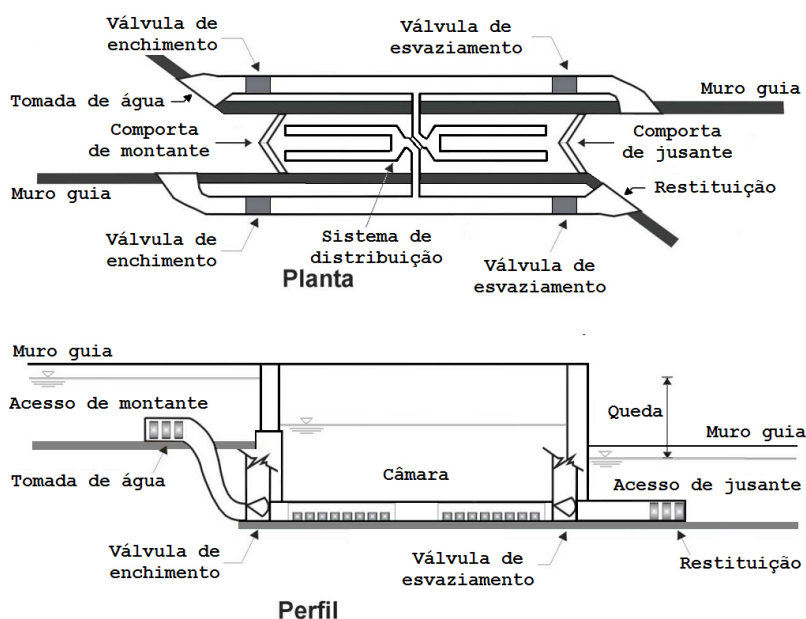


Figura 1. Esquema de uma eclusa de navegação.

Figure 1. Scheme of a navigation lock.

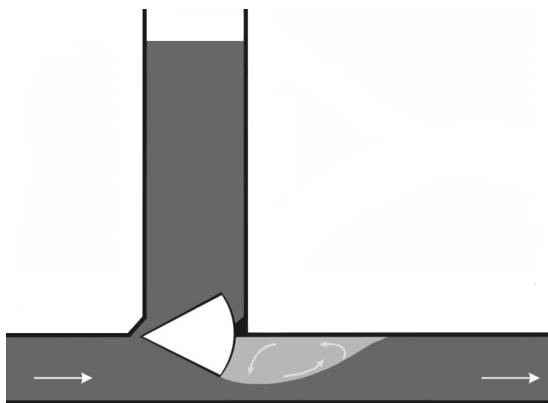


Figura 2. Esquema de funcionamento de uma comporta segmento invertida.

Figure 2. Operation scheme of a reverse Tainter gate.

A grande diferença de pressões entre as faces da comporta e o curto período de tempo exigido para as operações de eclusagem incorrem em altas velocidades, elevadas flutuações de pressão e grandes perdas de carga no escoamento junto às comportas. Estas condições de escoamento aumentam o potencial para a ocorrência de cavitação e erosão nas paredes do sistema de distribuição. Além da erosão e da cavitação, também podem ocorrer vibrações na comporta, esforços espasmódicos na aparelhagem de movimentação e a ampliação dos esforços ligados aos fenômenos de *downpull* e *uplift* (fenômenos que se referem ao empuxo descendente e ascendente da comporta, respectivamente) (Santos, 1998). Porém, a cavitação a jusante das comportas é o problema mais grave e constitui uma das principais limitações para o aumento da altura de projeto das eclusas (Gontijo e Campos, 2005; Ussami, 1980).

Para diminuir o dano causado pela cavitação, algumas técnicas que têm sido utilizadas são: aplicação de revestimentos resistentes, rebaixamento da cota de assentamento da comporta, utilização de leis de manobra especiais para a abertura das comportas, alterações geométricas no conduto e adição controlada de ar (USACE, 1975; Santos, 1998).

A adição de ar é uma das técnicas mais utilizadas para diminuir os danos causados pela cavitação em estruturas hidráulicas. No entanto, sua utilização em eclusas de navegação é limitada a pequenas quantidades, a fim de evitar a formação de bolsões de ar no sistema de distribuição, que quando expelidos na câmara provocam agitação na superfície da água,

aumentando os esforços nas amarras ou até mesmo causando acidentes com as embarcações. A aplicação de revestimentos resistentes e o rebaixamento da cota de assentamento da comporta oneram demasiadamente a obra, e a utilização de leis de manobra especiais pode não ser possível devido a limitações do sistema de acionamento das comportas. Alterações geométricas no conduto a jusante da comporta são uma opção promissora e de baixo custo. Estudos realizados por Pickering (1981 *in* USACE, 2006) e Santos *et al.* (2012) para expansões no teto do conduto mostraram resultados significativos em termos de redução do potencial de cavitação.

Neste trabalho, será apresentada uma análise do escoamento através da comporta segmento invertida, sem adição de ar e sem alterações geométricas no conduto. Este trabalho é resultado de uma parceria entre pesquisadores da Universidade do Vale do Rio dos Sinos (Unisinos) e do Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (IPH-UFRGS). Os resultados numéricos, obtidos pelo PPG em Engenharia Mecânica da Unisinos, são analisados e comparados com os resultados experimentais obtidos pelo IPH-UFRGS. O objetivo é aumentar o conhecimento do comportamento hidráulico desse tipo de sistema e fornecer subsídio para análises futuras sobre alterações geométricas do conduto a jusante da comporta que visem a minimizar o efeito da cavitação.

Metodologia

A investigação do comportamento hidrodinâmico do escoamento a jusante da comporta foi realizada através de duas metodologias complementares: experimental e numérica.

Abordagem experimental

Uma bancada de ensaios foi desenvolvida conforme o esquema da Figura 3, a qual permite controlar a vazão volumétrica (Q) em regime permanente para diferentes condições de operação e abertura da comporta. No conduto principal, a jusante da comporta, foram instaladas tomadas de pressões no teto e na base, de maneira que se pudesse fazer medições com piezômetros e com transdutores eletrônicos de pressão, conforme mostra a Figura 4. Também foi instalado um transdutor na base da entrada da câmara para permitir a análise da perda de carga na comporta. O tempo de aquisição

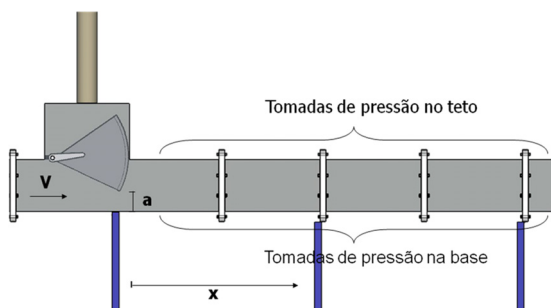


Figura 3. Desenho esquemático da bancada de testes experimentais.

Figure 3. Schematic diagram of the experimental test bench.



Figura 4. Instalação dos transdutores na base e no teto do conduto.

Figure 4. Transducers installed at the base and the top of the conduit.

de dados foi de 10 minutos e a frequência de aquisição dos transdutores de 512 Hz.

Os piezômetros permitem a leitura da pressão média que ocorre em cada tomada. Já com os transdutores eletrônicos pode-se analisar as pressões médias e instantâneas que ocorrem junto às tomadas. A pressão média de cada transdutor foi calculada tomando-se a média aritmética de todos os valores gravados. Também foi calculado o desvio-padrão dos valores registrados de cada transdutor.

O conduto da bancada possui seção quadrada de 0,25 m de lado, com comprimento de 1,7 m a montante da câmara e 4 m a jusante. A câmara possui comprimento de 0,4 m e altura de 0,75 m. A chaminé de equilíbrio possui diâmetro de 0,1 m e 2,5 m de altura. O raio de curvatura da comporta é de 0,38 m, permitindo controlar sua abertura de 0% até 100%. A abertura da comporta (a) é definida em termos percentuais, como a razão entre a distância da borda inferior da comporta até o fundo

do conduto e a altura do conduto a jusante da comporta.

A vazão volumétrica é monitorada por meio de um medidor eletromagnético. As máximas vazões foram limitadas pela máxima carga hidráulica possível de se aplicar a montante da comporta (2,5 m). Já as vazões mínimas foram impostas pela mínima vazão necessária para manter o conduto afogado. Todos os ensaios foram realizados em regime permanente e sem adição de ar.

Mais detalhes sobre a abordagem experimental podem ser obtidos em Mees *et al.* (2008) e Battiston *et al.* (2009).

Modelagem numérica

A simulação numérica do escoamento foi realizada utilizando-se o *software* comercial ANSYS-CFX-11. A geometria do modelo numérico foi simplificada (não foram considerados o eixo e os braços de sustentação da comporta), porém, foram mantidas as mesmas dimensões da bancada experimental. Além disso, foi considerada a condição de simetria do escoamento na direção da largura da bancada. Desta forma, o modelo numérico corresponde à metade do modelo físico, como pode ser observado no esquema mostrado na Figura 5.

A malha espacial é do tipo hexaédrica, construída através da metodologia multibloco. A Figura 6 mostra uma parte da malha computacional na região da comporta. Nesta figura, pode-se observar o refinamento em todas as paredes físicas do domínio computacional. A malha utilizada tem aproximadamente 662000 elementos.

Devido à carga hidráulica a montante da comporta variar de acordo com a condição operacional, foi necessário utilizar um modelo bifásico (água-ar) para permitir que o nível da água na câmara se ajustasse à carga hidráulica correspondente em cada condição. Como a interface é bem definida e não há interação entre as fases, foi utilizado o modelo homogêneo, onde ambas as fases compartilham os mesmos campos de pressão, velocidade e turbulência. As equações resolvidas na simulação são equações para um escoamento monofásico com a massa específica e viscosidade dinâmica variando de acordo com a distribuição das fases no domínio de cálculo. Além disso, não foi considerado o efeito da tensão superficial.

O regime de escoamento em todas as condições operacionais é turbulento. A turbulência é caracterizada por um largo espectro de

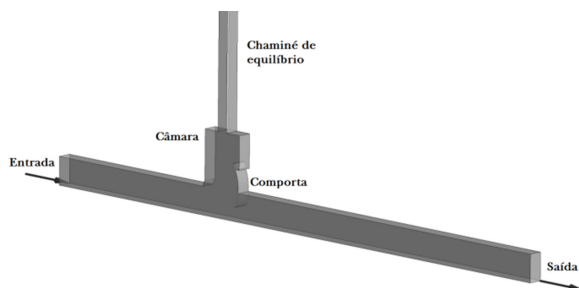


Figura 5. Domínio computacional.
Figure 5. Computational domain.

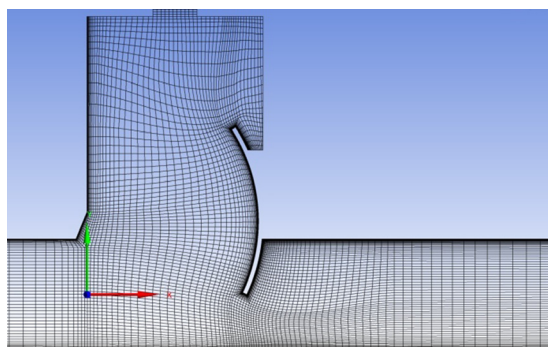


Figura 6. Malha computacional.
Figure 6. Computational mesh.

flutuações espaciais e temporais das variáveis do escoamento. Reproduzir, em uma simulação numérica, todas as escalas de flutuações de um escoamento turbulento somente é possível, atualmente, para casos simples e com baixos números de Reynolds. Porém, na maioria das aplicações práticas de engenharia, é suficiente conhecer apenas o comportamento do campo médio de um escoamento turbulento. Assim, utilizam-se modelos de turbulência que permitem prever o efeito da turbulência no escoamento, utilizando malhas computacionais e passos de tempo exequíveis.

Uma variável em um escoamento turbulento pode ser definida como a soma de um valor médio (no tempo) mais um valor de flutuação em relação ao valor médio. Introduzindo esta definição nas variáveis das equações governantes, tomando a média temporal e eliminando os termos que se anulam, chega-se nas equações do campo médio (RANS). No entanto, nas equações da quantidade de movimento surgem termos que dependem do produto das flutuações de velocidade. Estes termos são as “tensões turbulentas” ou “tensões de Reynolds” e precisam ser modelados em função de quantidades conhecidas (quantidades mé-

dias) para fechar o sistema de equações. Isto é conhecido como o problema do fechamento da turbulência.

Uma forma de resolver esse problema é por meio dos modelos de turbulência baseados na hipótese da viscosidade turbulenta. Esses modelos assumem que os pequenos turbilhões de um escoamento turbulento são continuamente criados e dissipados (hipótese do equilíbrio) e que as tensões turbulentas são proporcionais ao gradiente de velocidades médias por meio da viscosidade turbulenta, de forma análoga à relação entre tensão e taxa de deformação de um escoamento laminar. No entanto, a viscosidade turbulenta não é uma propriedade do fluido e também não é constante, ela é variável, e seu campo é determinado por meio do modelo de turbulência.

As equações que compõem o modelo numérico são as equações da conservação da massa (Equações 1 e 2), equação da quantidade de movimento (Equação 3), equação da fração volumétrica (Equação 4) e as equações do modelo de turbulência. Em cada volume da malha, a soma das frações volumétricas dos fluidos presentes deve obedecer à restrição imposta pela Equação 5 (Ansys, 2009).

$$\frac{\partial(r_\alpha \rho_\alpha)}{\partial t} + \nabla \cdot (r_\alpha \rho_\alpha \mathbf{U}) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial(r_\beta \rho_\beta)}{\partial t} + \nabla \cdot (r_\beta \rho_\beta \mathbf{U}) = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial(\rho_m \mathbf{U})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_m \mathbf{U} \mathbf{U} - \mu_{eff} (\nabla \mathbf{U} + (\nabla \mathbf{U})^T)) = S_M - \nabla_p \quad (3)$$

$$\frac{\partial(r_\alpha)}{\partial t} + \nabla \cdot (r_\alpha \mathbf{U}) = 0 \quad (4)$$

$$r_\alpha + r_\beta = 1 \quad (5)$$

onde r é a fração volumétrica da fase (α para a água e β para o ar), \mathbf{U} é o vetor velocidade, p' é a pressão modificada, definida em função da pressão estática (p) e da energia cinética turbulenta (κ):

$$p' = p + \frac{2}{3} \rho \kappa \quad (6)$$

ρ_m é a massa específica da mistura e μ_{eff} a viscosidade efetiva, definidas como:

$$\rho_m = r_\alpha \rho_\alpha + r_\beta \rho_\beta \quad (7)$$

$$\mu_{eff} = \mu_m + \mu_t \quad (8)$$

sendo μ_m a viscosidade da mistura, definida como:

$$\mu_m = r_\alpha \mu_\alpha + r_\beta \mu_\beta \quad (9)$$

e μ_t é a viscosidade turbulenta, dada pela Equação 14.

S_M é o termo fonte devido à gravidade, definido como:

$$S_M = (\rho - \rho_{ref})g \quad (10)$$

onde g é o vetor aceleração gravitacional e ρ_{ref} é a massa específica de referência, definida como a massa específica do fluido mais leve (ar). Dessa forma, esse termo fonte atua apenas na fase líquida, não havendo variação de pressão hidrostática na fase gasosa.

Por ser simples e robusto, o modelo de turbulência utilizado foi o $k-\varepsilon$, composto por duas equações: uma para a energia cinética turbulenta (Equação 11) e outra para a taxa de dissipação da energia cinética turbulenta (Equação 12).

$$\frac{\partial(\rho_\kappa)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{U} \kappa) = \nabla \cdot \left[\left(\mu_m + \frac{\mu_t}{\sigma_\kappa} \right) \nabla \kappa \right] + P_\kappa - \rho \varepsilon \quad (11)$$

$$\frac{\partial(\rho_\varepsilon)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{U} \varepsilon) = \nabla \cdot \left[\left(\mu_m + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \nabla \varepsilon \right] + \frac{\varepsilon}{\kappa} (C_{1\varepsilon} P_\kappa - C_{2\varepsilon} \rho \varepsilon) \quad (12)$$

onde P_κ é o termo de produção da energia cinética turbulenta, obtida pela seguinte equação:

$$P_\kappa = \mu_t \nabla \mathbf{U} \cdot (\nabla \mathbf{U} + (\nabla \mathbf{U})^T) \quad (13)$$

Com os campos de energia cinética turbulenta e dissipação determinados, a viscosidade turbulenta é então calculada pela seguinte equação:

$$\mu_t = C_\mu \rho \frac{\kappa^2}{\varepsilon} \quad (14)$$

sendo:

$$C_\mu = 0,09; C_{1\varepsilon} = 1,44; C_{2\varepsilon} = 1,92; \sigma_\kappa = 1,0; \sigma_\varepsilon = 1,3$$

As simulações foram realizadas em regime permanente. No entanto, nas equações governantes, aparecem os termos transientes. Devido às características de funcionamento do CFX, os termos transientes são mantidos e funcionam apenas como um fator de sub-rela-

ção. O tamanho do passo de tempo está relacionado com a estabilidade da solução, não tendo um significado físico propriamente dito.

Condições de contorno

- Entrada: perfil desenvolvido de velocidade;
- Saída: equação para variação hidrostática da pressão em função da altura, baseada nos valores de pressão experimentais para cada vazão;
- Paredes: condição de não-deslizamento, exceto nas paredes da chaminé, onde foi aplicada a condição de livre deslizamento para simplificar o modelo;
- Abertura da chaminé: pressão estática igual a 0Pa;
- Simetria.

Condições iniciais

Em todos os casos estudados, foi necessário realizar uma simulação preliminar (com a mesma malha e as mesmas condições de contorno), porém, utilizando passo de tempo do tipo "Local Timescale Factor", sendo este igual a 5. Adicionalmente, foi especificado um fator igual a 0,5 para a equação da fração volumétrica separadamente, para evitar instabilidades na altura da interface água-ar devido ao campo de velocidade nas primeiras iterações ser altamente instável. Após, realizou-se uma segunda simulação utilizando como condição inicial o resultado dessa primeira simulação, porém, agora, aplicando passo de tempo do tipo "Physical Timestep" com valor de 0,005 segundos em todo o domínio e para todas as equações. O número de iterações foi especificado em 1000, e o esquema de resolução aplicado foi o "High Resolution" com um critério de convergência de 10^{-05} .

A condição inicial para a altura do nível da água foi especificada de acordo com a pressão obtida no modelo físico no ponto situado na base do conduto na entrada da câmara. Utilizou-se uma função do tipo tangente hiperbólica para promover uma transição suave das propriedades dos fluidos na interface, a fim de minimizar problemas numéricos nesta região.

Resultados e discussão

Os testes experimentais foram realizados com aberturas da comporta de 10 até 100%. Para cada abertura, os testes tiveram vazões

volumétricas entre 22 e 220 L/s. Já nas simulações numéricas foram considerados casos com aberturas de 30, 50 e 70% e vazões volumétricas de 40, 90 e 180 L/s.

A Figura 7 mostra o resultado numérico para o campo de pressões médias no plano central do domínio (plano de simetria do modelo) para o caso com $a = 50\%$ e $Q = 90$ L/s. Nesta figura, pode-se observar a variação hidrostática da pressão na câmara, a região de estagnação próximo da borda inferior da comporta, a queda de pressão quando o escoamento é acelerado ao passar sob a comporta (e posterior formação da vena-contracta) e o início da recuperação.

Esta figura também mostra um detalhe do campo de pressão na região da borda inferior da comporta. Enquanto as pressões mínimas para a base e para o teto do conduto, a jusante da comporta, são da ordem de 1 kPa e -1,5 kPa, respectivamente, as pressões na borda da comporta são da ordem de -5 kPa. Isto indica que esta região, devido ao formato geométrico da borda da comporta, é um ponto crítico para ocorrência de cavitação no escoamento. Essas características do campo de pressões também são observadas nas Figuras 8 e 9, as quais mostram os resultados numéricos para o campo de pressões médias no

plano de simetria do modelo, para casos com $Q = 90$ L/s e $a = 30$ e 70% , respectivamente.

As Figuras 10, 11 e 12 mostram linhas de corrente no plano de simetria do modelo numérico para casos com $Q = 90$ L/s e $a = 30, 50$ e 70% . Nestas figuras, observa-se a presença de regiões de recirculação, as quais se formam, na câmara, a montante da comporta e, no conduto, a jusante da comporta. Verifica-se, ainda que, à medida que a abertura da comporta aumenta, o comprimento da recirculação a jusante da comporta diminui.

Nas Figuras 13-22 serão analisados os resultados numéricos de pressão média ao longo da base e do teto do conduto, a jusante da comporta. Nestas figuras também são apresentados os resultados experimentais de pressão média acompanhados com a barra do desvio-padrão. Os pontos experimentais que não possuem a barra são tomadas de pressão por piezômetros. As Figuras 13-18 mostram resultados para casos com $Q = 90$ L/s e $a = 30, 50$ e 70% . As Figuras 19-22 mostram os resultados para os casos com $a = 50\%$ e $Q = 40$ e 180 L/s. Em todos os casos, verifica-se a boa aproximação entre os resultados obtidos com o modelo físico e os obtidos com o modelo numérico.

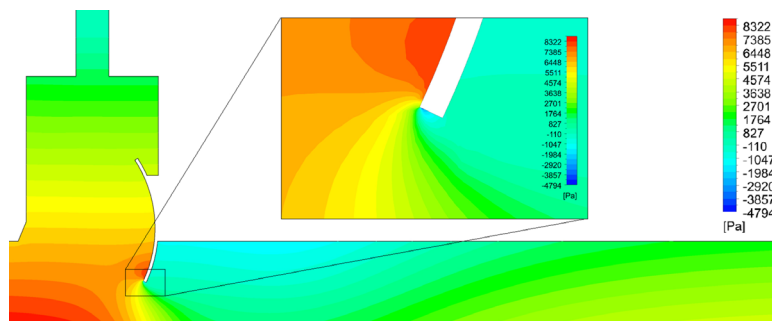


Figura 7. Campo de pressão média (CFX): $a = 50\%$ e $Q = 90$ L/s.

Figure 7. Average pressure field (CFX): $a = 50\%$ and $Q = 90$ L/s.

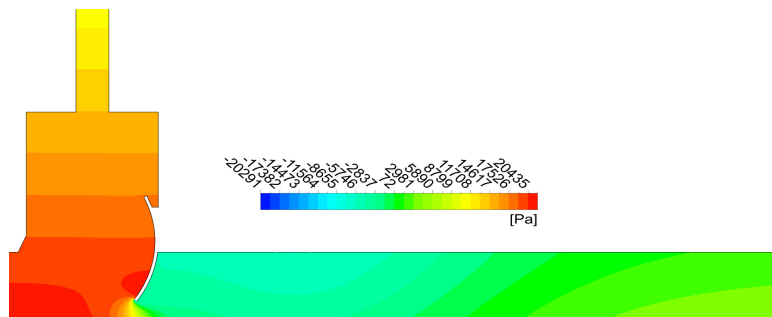


Figura 8. Campo de pressão média (CFX): $a = 30\%$ e $Q = 90$ L/s.

Figure 8. Average pressure field (CFX): $a = 30\%$ and $Q = 90$ L/s.

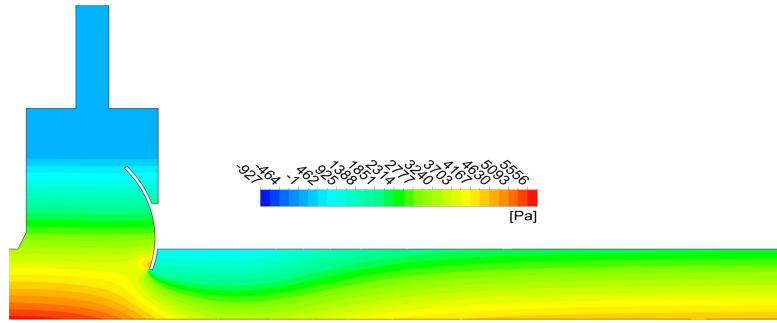


Figura 9. Campo de pressão média (CFX): $a = 70\%$ e $Q = 90$ L/s.

Figure 9. Average pressure field (CFX): $a = 70\%$ and $Q = 90$ L/s.

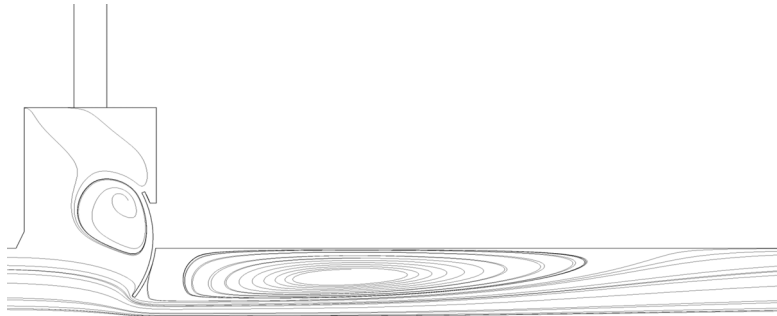


Figura 10. Linhas de corrente (CFX): $a = 30\%$.

Figure 10. Streamline (CFX): $a = 30\%$.

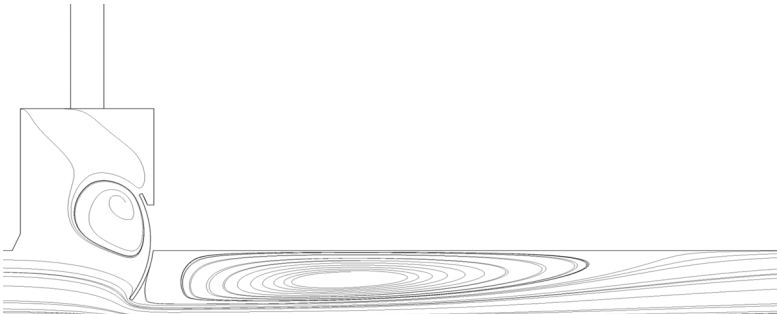


Figura 11. Linhas de corrente (CFX): $a = 50\%$.

Figure 11. Streamline (CFX): $a = 50\%$.

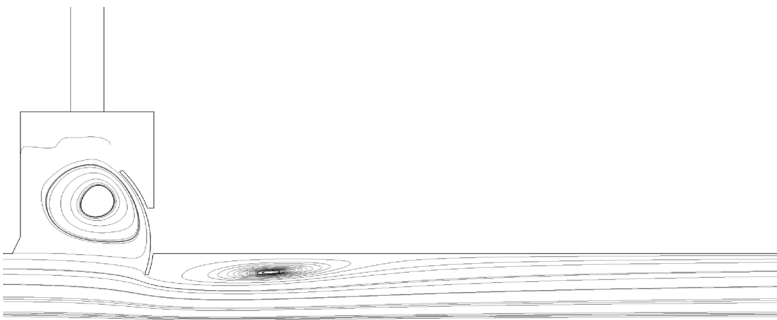


Figura 12. Linhas de corrente (CFX): $a = 70\%$.

Figure 12. Streamline (CFX): $a = 70\%$.

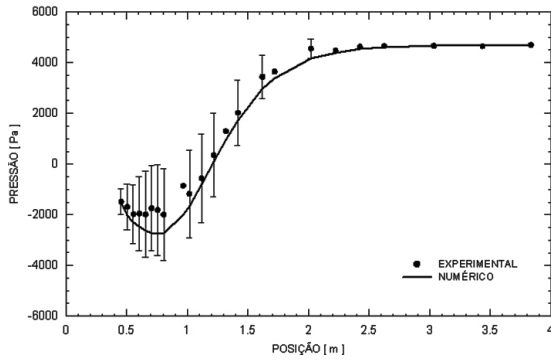


Figura 13. Pressão na base: $a = 30\%$ e $Q = 90$ L/s.
Figure 13. Pressure at the bottom: $a = 30\%$ and $Q = 90$ L/s.

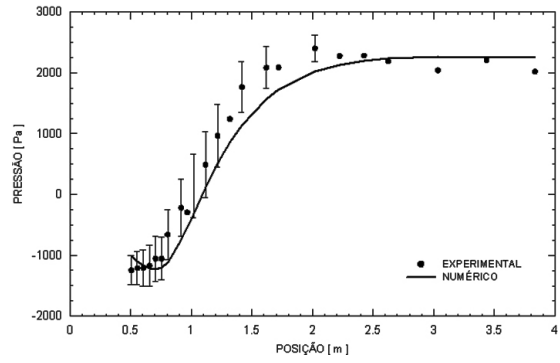


Figura 16. Pressão no teto: $a = 50\%$ e $Q = 90$ L/s.
Figure 16. Pressure at the top: $a = 50\%$ and $Q = 90$ L/s.

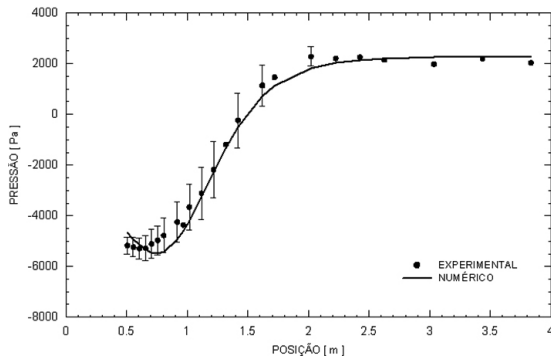


Figura 14. Pressão no teto: $a = 30\%$ e $Q = 90$ L/s.
Figure 14. Pressure at the top: $a = 30\%$ and $Q = 90$ L/s.

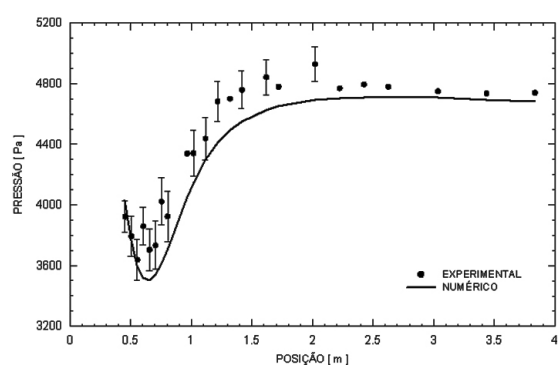


Figura 17. Pressão na base: $a = 70\%$ e $Q = 90$ L/s.
Figure 17. Pressure at the bottom: $a = 70\%$ and $Q = 90$ L/s.

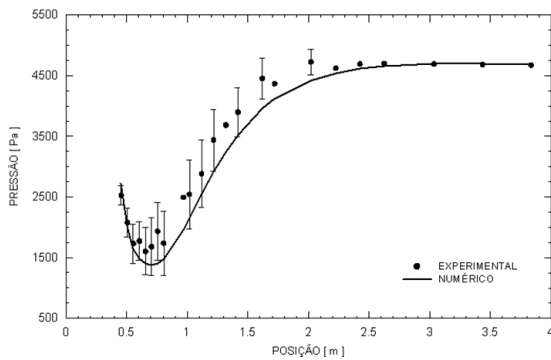


Figura 15. Pressão na base: $a = 50\%$ e $Q = 90$ L/s.
Figure 15. Pressure at the bottom: $a = 50\%$ and $Q = 90$ L/s.

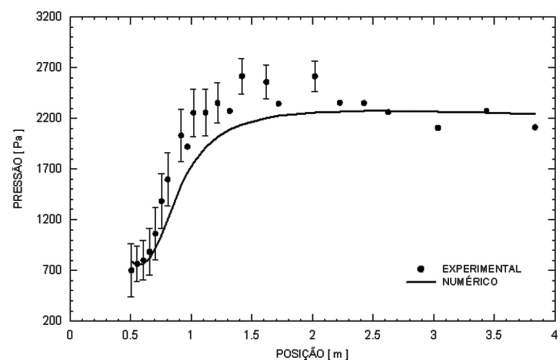


Figura 18. Pressão no teto: $a = 70\%$ e $Q = 90$ L/s.
Figure 18. Pressure at the top: $a = 70\%$ and $Q = 90$ L/s.

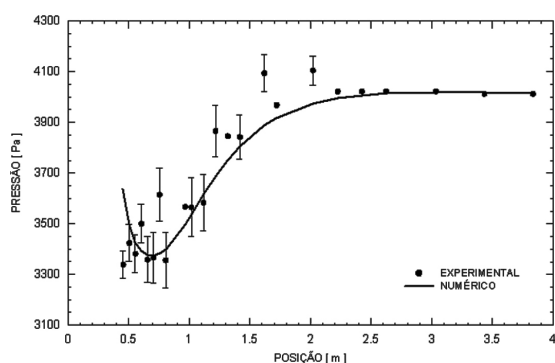


Figura 19. Pressão na base: $a = 50\%$ e $Q = 40$ L/s.
Figure 19. Pressure at the bottom: $a = 50\%$ and $Q = 40$ L/s.

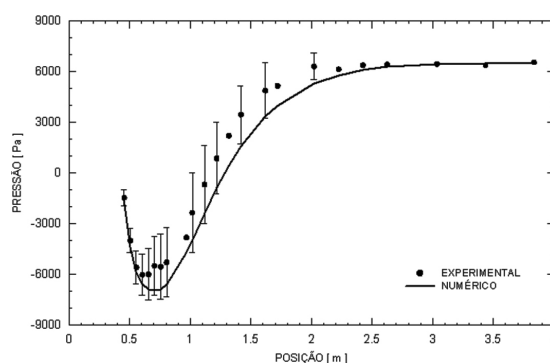


Figura 21. Pressão na base: $a = 50\%$ e $Q = 180$ L/s.
Figure 21. Pressure at the bottom: $a = 50\%$ and $Q = 180$ L/s.

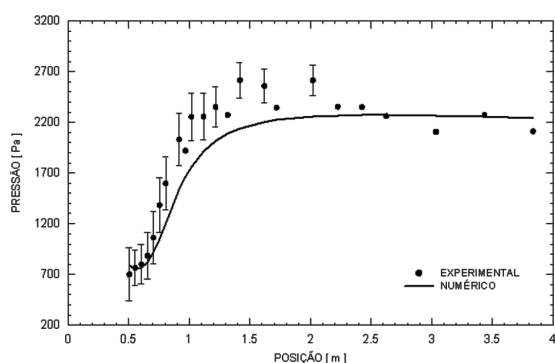


Figura 20. Pressão no teto: $a = 50\%$ e $Q = 40$ L/s.
Figure 20. Pressure at the top: $a = 50\%$ and $Q = 40$ L/s.

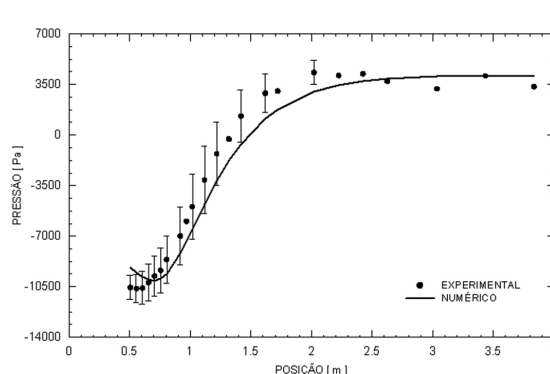


Figura 22. Pressão no teto: $a = 50\%$ e $Q = 180$ L/s.
Figure 22. Pressure at the top: $a = 50\%$ and $Q = 180$ L/s.

O desvio-padrão apresentado nestes gráficos representa o grau de flutuação da pressão medida em cada transdutor. Pode-se observar que, para o caso com $a = 30\%$, o valor do desvio-padrão na base é maior do que no teto (aproximadamente 1,6 vezes). Nos casos com $a = 50\%$, o valor do desvio-padrão no teto e na base são aproximadamente iguais. Já no caso com $a = 70\%$, o valor do desvio-padrão no teto é aproximadamente 1,6 maior que na base. Também se pode observar nestas figuras que na região da vena-contracta ocorre uma queda de pressão mais acentuada na base do que no teto do conduto. Nesta região, devido à aceleração do escoamento, o perfil vertical de pressão não é linear. A partir de certa distância, o perfil vertical de pressão volta a ser linear.

Na Figura 23, são apresentados os perfis de pressão na base do conduto para casos com $Q = 90$ L/s e $a = 30, 50$ e 70% simultaneamente. Observa-se mais claramente nesta figura que, para uma determinada vazão, à medida que

a abertura da comporta diminui, a queda de pressão a jusante da comporta aumenta.

A Figura 24 mostra o comportamento do perfil de pressão na base do conduto para casos com $a = 50\%$ e $Q = 40, 90$ e 180 L/s. Observa-se que a queda de pressão aumenta a jusante da comporta à medida que a vazão aumenta para uma dada abertura. A pressão na saída da seção de testes aumenta à medida que a vazão aumenta devido ao aumento da perda de carga do escoamento no duto que liga a seção de testes e o reservatório de jusante aumentar com o aumento da vazão.

Conclusão

A partir dos resultados obtidos, é possível afirmar que o modelo numérico reproduz com boa aproximação os resultados experimentais de pressões médias na base e no teto do conduto a jusante da comporta. A pressão na borda inferior da comporta apresentou

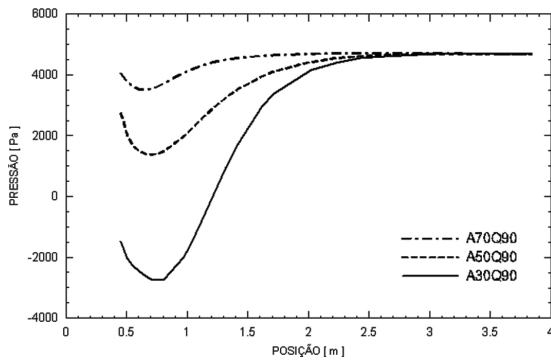


Figura 23. Pressões na base: $Q = 90$ L/s.

Figure 23. Pressure at the bottom: $Q = 90$ L/s.

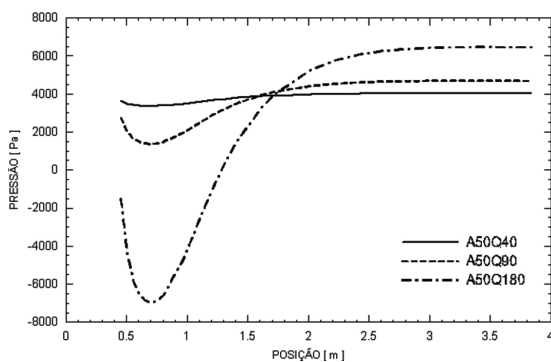


Figura 24. Pressões na base: $a = 50\%$.

Figure 24. Pressure at the bottom: $a = 50\%$.

um valor significativamente menor que os valores obtidos a jusante da comporta, o que indica que esta região é um ponto bastante crítico para a ocorrência de cavitação. Pode-se afirmar também que o modelo de turbulência utilizado é adequado para este tipo de problema. Verificou-se ainda que o comprimento da recirculação a jusante da comporta diminui à medida que a abertura da comporta aumenta.

Por fim, destaca-se a necessidade de continuar o estudo com outros casos, com diferentes aberturas e vazões, a fim de analisar mais detalhadamente o comportamento dos resultados previstos pelo modelo numérico.

Agradecimentos

Os autores agradecem à FURNAS Centrais Elétricas S/A, à FINEP, ao CNPq e à Unisinos pelo suporte financeiro, sem o qual esta pesquisa não seria possível.

Referências

- ANSYS CFX. 2009. *Release 11.0. Ansys CFX-Solver modeling Guide*. Canonsburg, ANSYS Inc., 626 p.
- BATTISTON, C.C.; SCHETTINI, E.B.C.; CANELLAS, A.V.B.; MARQUES, M.G. 2009. Eclusas de navegação: caracterização hidráulica do escoamento a jusante das válvulas de enchimento/esvaziamento. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, XVIII, Campo Grande, 2009. *Anais...* Campo Grande, p. 22-26.
- GONTIJO, N.T.; CAMPOS, R.G.D. 2005. *Estruturas Hidráulicas Seminário: Eclusas*. Belo Horizonte, Universidade Federal de Minas Gerais, 29 p.
- MEES, A.A.A.; BATTISTON, C.C.; MARQUES, M.G. 2008. Downstream flow from reverse Tainter gates in conduits as a hydraulic jump. In: INTERNATIONAL JUNIOR RESEARCHER AND ENGINEER WORKSHOP ON HYDRAULIC STRUCTURES, 2, Pisa, 2008. *Anais...* Pisa, p. 123-128.
- SANTOS, J.B.V.; OLIVESKI, R.C.; MARQUES, M.G.; DAI PRÁ, M.; DALLA CORTE, M.; OLIVEIRA, L.L.M. 2012. Alteração geométrica no teto a jusante de comporta do sistema de enchimento e esvaziamento para eclusa de navegação: simulação numérica do escoamento e análise das pressões no teto do conduto. In: CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA, VII, São Luís, 2012. *Anais...* São Luís, p. 1-8. [CD-ROM].
- SANTOS, S.R. 1998. *Projeto hidráulico de eclusas de alta queda*. São Paulo, SP. Tese de doutorado. Universidade de São Paulo, 225 p.
- UNITED STATES ARMY CORPS OF ENGINEERS (USACE). 1975. Hydraulic design of lock culverts. EM1110-2-1610. Disponível em: <http://www.usace.army.mil/publications/engine-manuals/em1110-2-1610/entire.pdf>. Acesso em: 08/08/2006.
- UNITED STATES ARMY CORPS OF ENGINEERS (USACE). 2006. Hydraulic Design of Navigation Locks. EM 1110-2-2602. Disponível em: <http://www.usace.army.mil/publications/engine-manuals/em1110-2-1604/entire.pdf>. Acesso em: 08/09/2006.
- USSAMI, H. 1980. *Comportamento hidráulico dos sistemas de enchimento e esgotamento de eclusas de navegação*. São Paulo, SP. Dissertação de mestrado. Universidade de São Paulo, 198 p.

Submetido: 03/11/2012

Aceito: 19/03/2013