

ANALISE DO COMPORTAMENTO HIDRODINÂMICO DE SISTEMAS DE ENCHIMENTO E ESVAZIAMENTO DE ECLUSAS DE NAVEGAÇÃO

Marcelo Dalla Corte, marcelodallacorte@gmail.com¹
Rejane Ce Césro Oliveski, decesar@unisinis.br¹
Marcelo Giulian Marques, mmarques@iph.ufrgs.br²
Franco Buffon, francobuffon@gmail.com²

¹Universidade do Vale do Rio dos Sinos – UNISINOS, Av. Unisinis, 950 – São Leopoldo – RS.

²Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, Av. Bento Gonçalves, 9500, 91501-970, CxP 15029 – Porto Alegre – RS.

Resumo: *As comportas segmento invertida são muitas vezes utilizadas como controle de fluxo em sistemas de enchimento e esvaziamento de eclusas de navegação de alta queda. Objetivando o melhor entendimento da dinâmica do escoamento a jusante deste 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 (esforços extremos e cavitação entre outros). A comparação entre os resultados de pressão previstos pelo modelo numérico e os dados experimentais mostra que o modelo numerico reproduz com boa aproximação o escoamento através da comporta.*

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

1. INTRODUÇÃO

As eclusas de navegação são estruturas que visam promover, de forma segura, a transposição de desníveis gerados por barreiras pontuais, naturais (quedas de água e istmos) ou de ação antrópica (barramentos), pelas embarcações. No sistema de enchimento/esvaziamento de alta queda (desnível superior a 15 m) geralmente são adotadas comportas do tipo segmento invertida ("Tainter gates") e podem ocorrer diversos fenômenos hidráulicos nocivos a estrutura, tais como: vibração da comporta; esforços espasmódicos na aparelhagem de movimentação; ampliação dos esforços ligados ao empuxo descendente (sucção da comporta - "downpull") e ascendente (elevação da comporta - "uplift") da comporta e ocorrência de cavitação.

Objetivando o melhor entendimento das características do escoamento a jusante deste tipo de comporta, de forma a se poder aprimorar o projeto e identificar condições críticas de operação, vem sendo desenvolvida uma pesquisa experimental associada à simulação numérica. A abordagem experimental vem sendo desenvolvida no Laboratório de Obras Hidráulicas (LOH) do Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) enquanto que a abordagem numérica, utilizando CFX, vem sendo desenvolvida pela Universidade do Vale do Rio dos Sinos (UNISINOS). O presente trabalho faz parte do projeto de Pesquisa & Desenvolvimento intitulado "Análise do comportamento hidráulico dos sistemas de enchimento e esgotamento de eclusas de navegação", inscrito na ANEEL sob o código 0394-041/2006 para o ciclo 2005-2006 e desenvolvido por FURNAS Centrais Elétricas.

Neste trabalho são apresentados alguns resultados preliminares das comparações entre os resultados da modelagem física com a numérica, visando observar que tipo de ajustes são necessários para se poder reproduzir este tipo de escoamento através de simulação numérica.

2. ABORDAGEM EXPERIMENTAL

2.1 Estrutura Experimental

A investigação experimental das características do comportamento hidrodinâmico a jusante de uma comporta segmento invertida foi desenvolvida em uma bancada de ensaios conforme apresentada nas Fig. 1 e 2. Esta bancada, através do seu sistema de alimentação (1), em circuito fechado com canal de restituição (5), recebe a descarga do reservatório de jusante, restituindo a água ao reservatório de alimentação, permitindo assim controle da vazão em regime permanente através de medidor eletromagnético de vazão (2) para diferentes condições de operação e abertura da comporta (3) e níveis a jusante no reservatório (4). A Fig. 2 apresenta um croqui da condição de escoamento a

jusante da comporta. O nível de água no reservatório de jusante foi fixado pela cota da crista do vertedouro. A saída do conduto principal sempre permaneceu afogada.

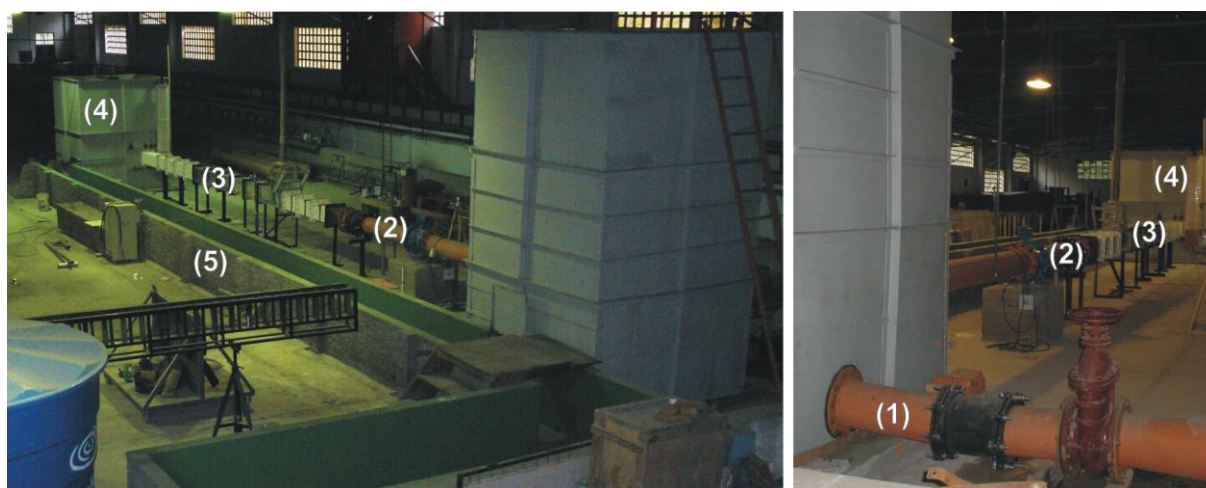


Figura 1. Banca de ensaios para estudo do escoamento a jusante de comportas de eclusas.

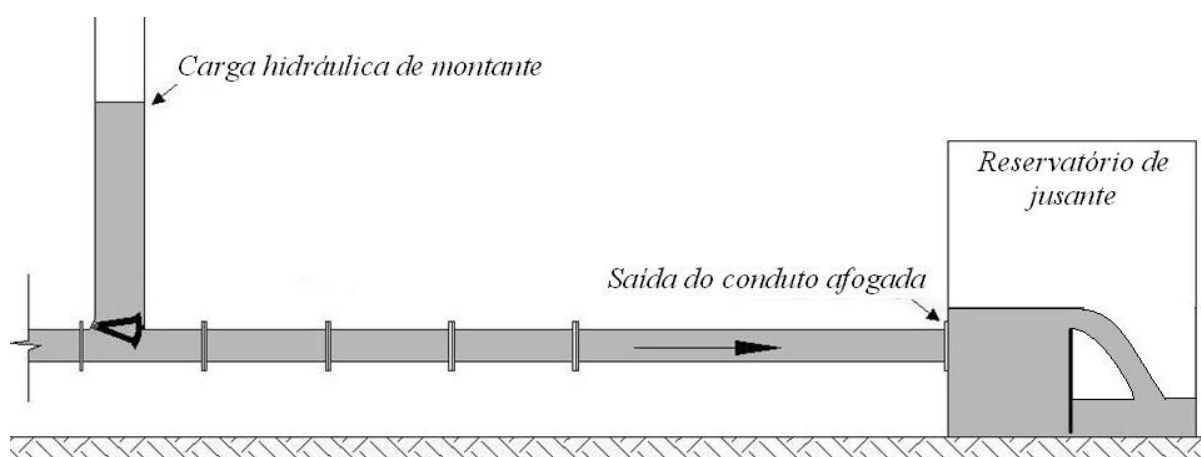


Figura 2. Croqui da bancada de ensaios para estudo do escoamento a jusante comporta segmento invertida.

2.2 Aquisição de Dados

No conduto principal, a jusante da comporta, foram previstas tomadas de pressão no teto na base (Fig. 3 e 4) de maneira que se pudesse fazer medições de pressões com piezômetros e transdutores de pressão (Tabela 1) para as diferentes condições de operação (abertura da comporta e cargas a montante e jusante). Próximo à comporta, os transdutores de pressão foram posicionados com espaçamento de 5 centímetros entre eles, conforme o aumento da distância a partir da comporta, o espaçamento entre os transdutores passava para 10cm, 20cm e 40cm (Fig. 4).

Para cada ensaio, além do registro das medições de pressão, foram verificados a vazão, a carga a montante da comporta, na chaminé de equilíbrio (Fig. 2), a abertura da comporta (Fig. 5) e o nível a jusante. As frequências de aquisição dos dados foram de 512 Hz, com um tempo de aquisição de 120 segundos, superior ao recomendado por Lopardo, que seria de no mínimo 50 Hz e 60s.

Tabela 1. Características dos transdutores de pressão implantados na base do conduto e no teto e utilizados neste trabalho.

Quant.	Marca	Faixa de operação (m.c.a.)		Precisão (%F.E.)	Posição
14	Sitron	-1.5	1.5	0.30%	14 a jusante na base do conduto
1	Hytronic	-2.1	4.9	0.25%	1 a montante na base do conduto



Figura 3. Instalação dos transdutores de pressão no conduto.

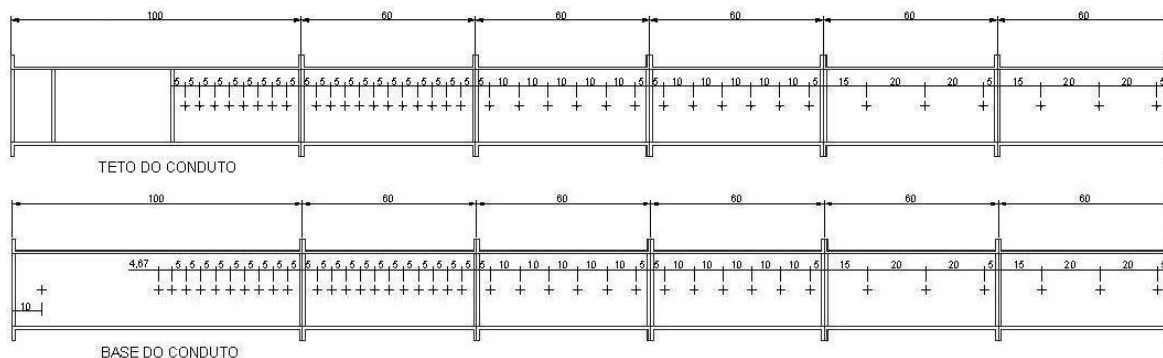


Figura 4. Bancada de ensaios posicionamento das tomadas de pressão.

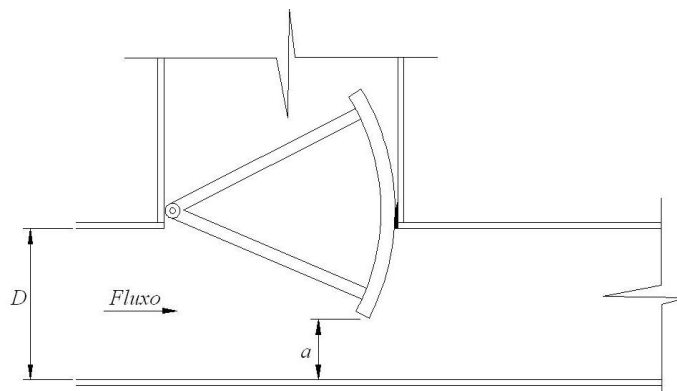


Figura 5. Esquema de instalação da comporta tipo Tainter invertida no conduto ($D=25\text{cm}$; $a=\text{variável}$).

Neste trabalho foi feita uma comparação entre os dados experimentais e os obtidos para as simulações, a Tabela 2 apresenta a condição de contorno dos ensaios analisados.

Tabela 2. Características dos ensaios.

Abertura da comporta (a) [mm]	Percentual de abertura (a/D)	Vazão [m^3/s]
75	0,3	40
75	0,3	90
125	0,5	40
125	0,5	130
125	0,5	180

3. ABORDAGEM NUMÉRICA

A simulação numérica do escoamento foi realizada utilizando-se o programa comercial ANSYS CFX-11. A geometria do modelo segue as mesmas dimensões e características do modelo físico. No entanto, devido à dificuldade de construção da malha, foram feitas algumas simplificações na geometria do modelo computacional: não foram considerados o eixo e os braços de sustentação da comporta. A Fig. 6 mostra um detalhe da malha computacional utilizada nas simulações deste trabalho e o sistema de referência.

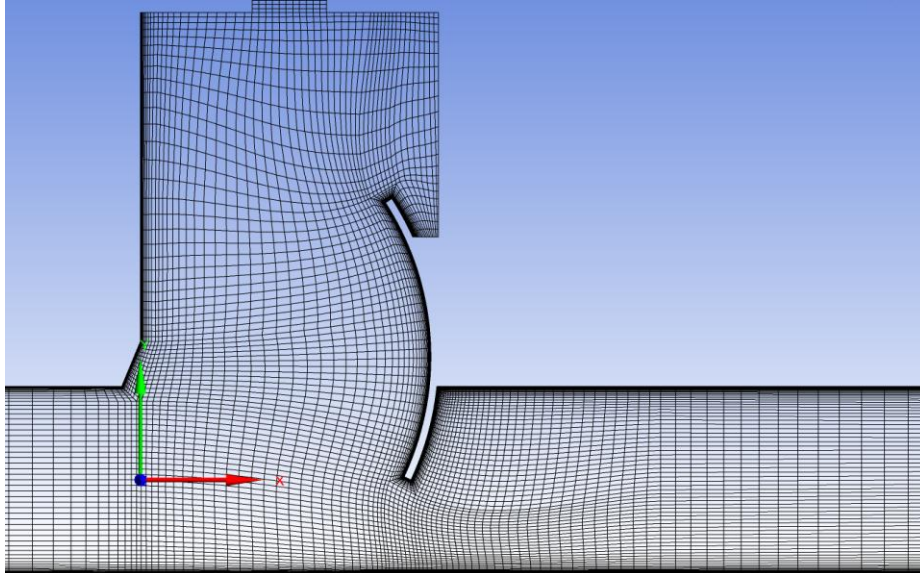


Figura 6. Detalhe da malha computacional.

O modelo é tridimensional, bifásico homogêneo, composto pelas equações da conservação da massa (Eq. 1) e equação da quantidade de movimento (Eq. 2).

$$\frac{\partial U_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\rho \left(\frac{\partial U_i}{\partial t} + U_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \right) = - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \mu \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) + F_{U_i} \quad (2)$$

onde ρ é a densidade do fluido, μ a viscosidade dinâmica, p a pressão, t o tempo e F_{U_i} o termo fonte da Eq. 2. O modelo de turbulência utilizado foi o k- ϵ , por se mais simples e robusto, descrito nas Eq. 3 e 4.

$$\rho \left(\frac{\partial \kappa}{\partial t} + \bar{U}_j \frac{\partial \kappa}{\partial x_j} \right) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_\kappa \frac{\partial \kappa}{\partial x_j} \right) + P_\kappa - \rho \epsilon \quad (3)$$

$$\rho \left(\frac{\partial \epsilon}{\partial t} + \bar{U}_j \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_\epsilon \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right) + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{\kappa} P_\kappa - C_{2\epsilon} \frac{\epsilon^2}{\kappa} \quad (4)$$

onde P_κ é o termo de produção da energia cinética turbulenta, Γ_κ o coeficiente de difusão na equação de κ , Γ_ϵ o coeficiente de difusão na equação de ϵ e μ_t a viscosidade turbulenta. Estes termos são obtidos, respectivamente, pelas seguintes equações

$$P_\kappa = \mu_t \left(\frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{U}_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_j} \quad (5)$$

$$\Gamma_\kappa = \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\kappa} \quad (6)$$

$$\Gamma_\varepsilon = \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \quad (7)$$

$$\mu_t = C_\mu \rho \frac{\kappa^2}{\varepsilon} \quad (8)$$

Estas equações, mais as equações da conservação da massa e quantidade de movimento, podem ser resolvidas numericamente desde que se utilizem valores adequados para as cinco constantes, $C_{1\varepsilon}$, $C_{2\varepsilon}$, C_μ , σ_ε , (número de Prandtl turbulento na equação de κ) e σ_κ , (número de Prandtl turbulento na equação de ε) presentes nas Equações (3) e (4). Os valores para essas constantes são:

$$C_{1\varepsilon} = 1,44 \quad C_{2\varepsilon} = 1,92 \quad \sigma_\varepsilon = 1,3 \quad \sigma_\kappa = 1,0 \quad \text{e} \quad C_\mu = 0,09 \quad (9)$$

Neste modelo são usadas funções de parede para relacionar o contorno do domínio computacional com o limite da sub-camada viscosa, de modo que as equações diferenciais para as variáveis κ e ε só são utilizadas fora da sub-camada viscosa.

3.1 Condições de Contorno

Na entrada do domínio utilizaram-se perfis desenvolvidos de velocidade, energia cinética turbulenta e dissipação, obtidos de uma simulação preliminar de um escoamento em um tubo quadrado de seção constante e comprimento de 50 metros. Na saída utilizou-se uma expressão para variação linear da pressão em função da altura, baseada nos valores de pressão experimentais. Devido à necessidade de se aumentar o refinamento da malha nas regiões próximo das paredes, foi utilizado a condição de simetria no sentido longitudinal do escoamento. Nas paredes foi aplicada a condição de não-deslizamento, exceto nas paredes da chaminé, onde foi aplicada a condição de escoamento livre, para simplificar o modelo.

4. RESULTADOS

As Fig. 7 a 11 apresentam os resultados experimentais e numéricos dos casos estudados. Nestas figuras também é indicada a incerteza das medições experimentais. Em todos os casos os resultados numéricos apresentam boa aproximação com os resultados experimentais, ficando dentro da faixa de incerteza experimental em vários pontos. Observa-se que nos gráficos dos casos com vazão de $40 \text{ m}^3/\text{s}$ (Fig. 7 e 9) os valores experimentais de pressão apresentam um comportamento desorganizado, enquanto que nos gráficos das vazões mais altas estes são mais estáveis, apresentando uma linha de tendência mais definida. No entanto, a medida que a vazão aumenta a incerteza experimental também aumenta, independente do percentual de abertura da comporta. Em todos os casos também se observa que a incerteza é maior na região onde ocorre a recuperação de pressão do escoamento, diminuindo nas duas extremidades do gráfico. Também se pode observar que à medida que a vazão aumenta, os resultados numéricos apresentam um maior afastamento dos resultados experimentais.

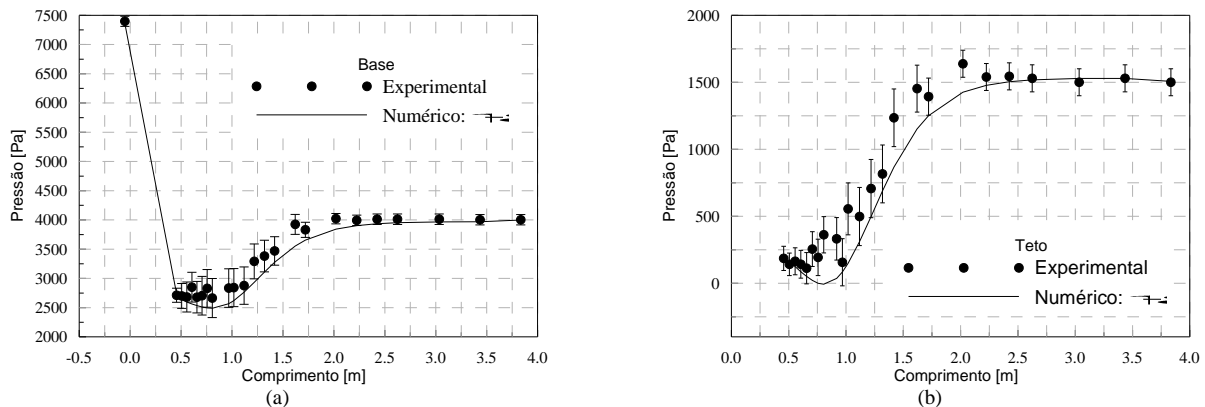


Figura 7. Variação da pressão (Abertura: 30% - Vazão: $40 \text{ m}^3/\text{s}$): (a) Base; (b) Teto.

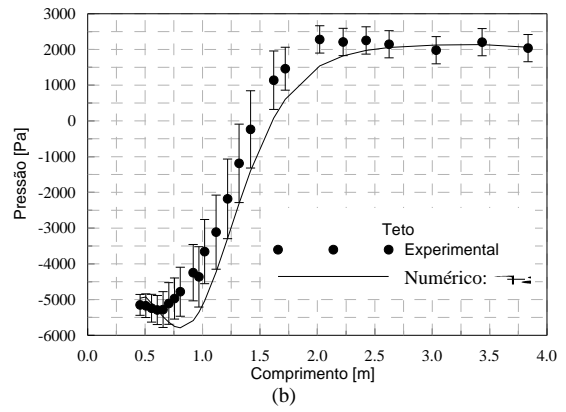
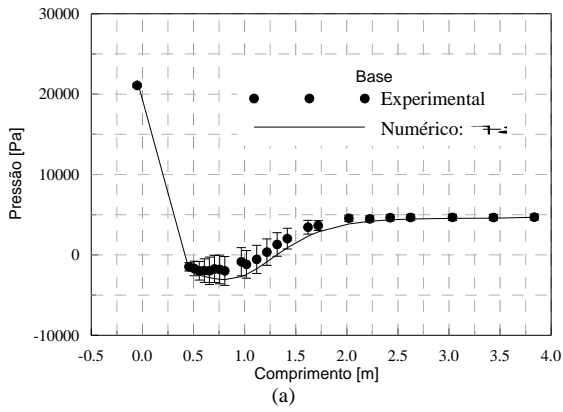


Figura 8. Variação da pressão (Abertura: 30% - Vazão: 90 m³/s): (a) Base; (b) Teto.

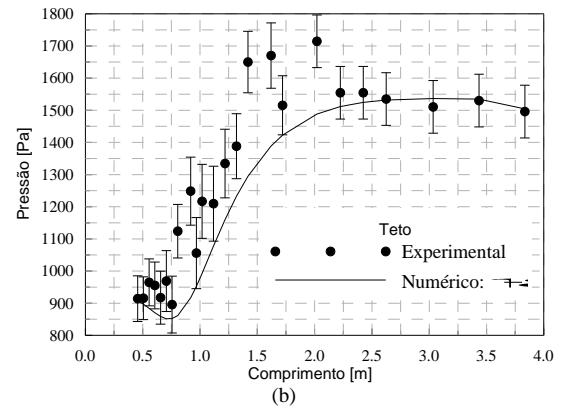
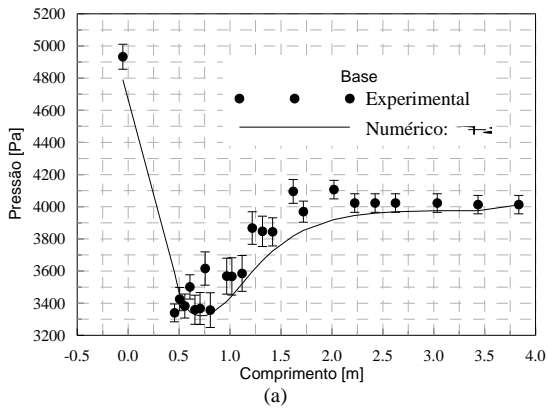


Figura 9. Variação da pressão (Abertura: 50% - Vazão: 40 m³/s): (a) Base; (b) Teto.

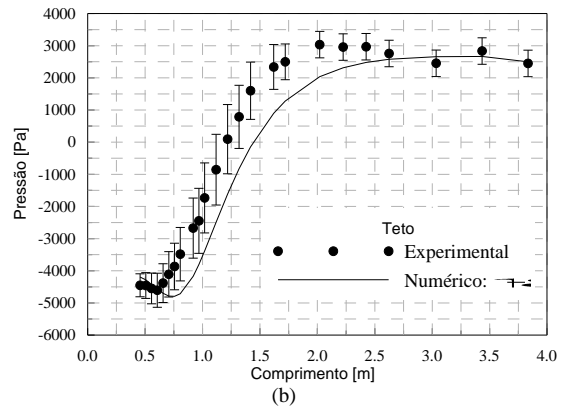
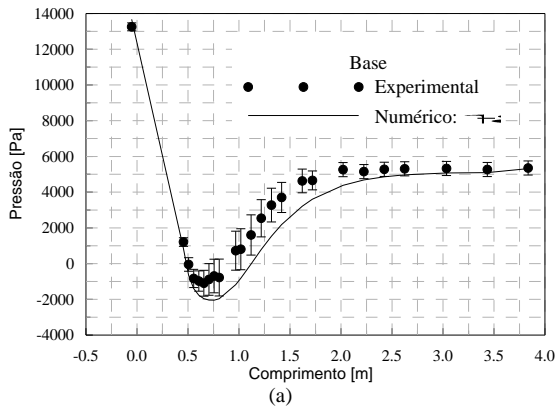


Figura 10. Variação da pressão (Abertura: 50% - Vazão: 130 m³/s): (a) Base; (b) Teto.

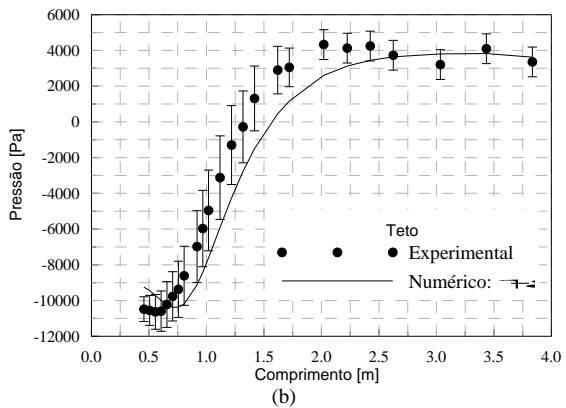
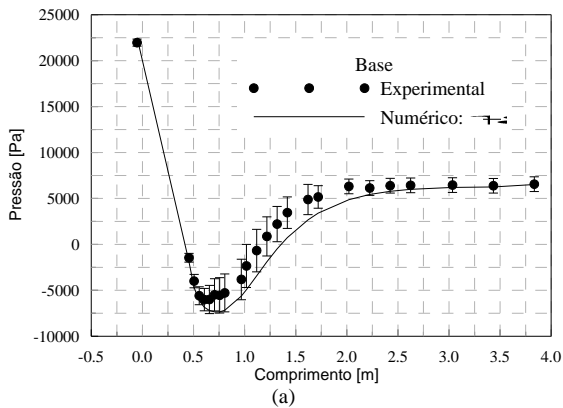


Figura 11. Variação da pressão (Abertura: 50% - Vazão: 180 m³/s): (a) Base; (b) Teto.

5. CONCLUSÃO

O escoamento através de uma comporta segmento invertido foi analisado em modelo físico através da medição da pressão na base e no teto do conduto a jusante da comporta. A incerteza das medições experimentais aumenta à medida que a vazão do escoamento aumenta. Os resultados da simulação numérica realizada no programa comercial Ansys CFX apresentam boa aproximação em relação aos dados experimentais. No entanto a diferença entre os valores de pressão numéricos e experimentais aumenta à medida que a vazão aumenta, independentemente do percentual de abertura da comporta. Apesar disso, o modelo numérico se destaca como uma ferramenta bastante eficiente para estudar este tipo de escoamento. Além disso, condições operacionais que não puderam ser estudadas experimentalmente devido a limitações do modelo físico podem ser analisadas através do modelo numérico. Entretanto, a complexidade do escoamento neste sistema apresenta-se como um enorme desafio à modelagem numérica, sendo necessário ainda um estudo mais detalhado com diferentes condições operacionais, a fim de avaliar a influencia destas sobre os resultados previstos pelo modelo.

6. AGRADECIMENTOS

Este trabalho não seria possível sem a colaboração da equipe do Laboratório de Obras Hidráulicas do IPH, dos professores Paulo K. Souza e Luiz A. M. Endres, dos amigos do LAHE, e sem o suporte de FURNAS Centrais Elétricas S/A e do CNPq.

7. REFERÊNCIAS

- Santos, S.R., 1990, “Efeito de escala no regime de escoamento em eclusas. Previsão do protótipo”. In Anais do XIV Congresso Latinoamericano de Hidráulica. Montevideo, Uruguai.
- USACE, 1975, United States Army Corps Of Engineers, “Hydraulic design of lock culverts”. EM 1110-2-1610. Available at: <<http://www.usace.army.mil/publications/eng-manuals/em1110-2-1610/entire.pdf>>. Acesso em: 08/08/2006.
- CFX-11.0, User Manual

8. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído no seu trabalho.

ANALYSIS OF THE HYDRODYNAMIC BEHAVIOR OF FILLING AND EMPTYING LOCKS NAVIGATION SYSTEMS

Marcelo Dalla Corte, marcelodallacorte@gmail.com¹
Rejane Ce Césro Oliveski, decesaro@unisinis.br¹
Marcelo Giulian Marques, mmarques@iph.ufrgs.br²
Franco Buffon, francobuffon@gmail.com²

¹Universidade do Vale do Rio dos Sinos –UNISINOS, Av. Unisinis, 950 – São Leopoldo – RS.

²Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, Av. Bento Gonçalves, 9500, 91501-970, CxP 15029, Porto Alegre – RS.

Abstract: *sluices are often used as flow control systems for filling and emptying the navigation locks with high drop pressure. Aiming to better understand the outflow dynamics of this device type, is being held research that seeks to associate two types of analysis: numerical and experimental, and so identify the characteristics of flow and enable the development of solutions that avoid damage to the structure, since they are subjected to adverse hydraulic phenomena (efforts extremes, cavitation, etc.). The comparison between the pressure results (numerical and experimental) shows that the numerical model reproduces with good approximation the flow through the gate..*

Keywords: navigation locks, floodgate, numerical simulation, CFX.