

UNIVERSIDADE DO VALE DO RIO DOS SINOS - UNISINOS
UNIDADE ACADÊMICA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA
NÍVEL MESTRADO

SIMULAÇÃO NUMÉRICA TRIDIMENSIONAL DO CAMPO MÉDIO DO
ESCOAMENTO EM UMA COMPORTA SEGMENTO INVERTIDA

MARCELO DALLA CORTE

Dissertação de Mestrado

São Leopoldo, Agosto de 2013.

Simulação numérica tridimensional do campo médio do escoamento em uma comporta
segmento invertida

Marcelo Dalla Corte

Trabalho submetido ao Programa de Pós-Graduação
em Engenharia Mecânica da Universidade do Vale do
Rio dos Sinos - UNISINOS como pré-requisito parcial
para a obtenção do título de Mestre em Engenharia
Mecânica.

Mestre em Engenharia Mecânica

Orientadora: Prof^ª Dr^ª Rejane de César Oliveski

Co-orientadora: Prof^ª Dr^ª Edith Beatriz Camaño Schettini

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Mauricio Dai Pra

Prof. Dr. Conrad Yuan Yuen Lee

Prof^ª Dr^ª Flávia Schwarz Franceschini Zinani

São Leopoldo, Agosto de 2013.

D144s Dalla Corte, Marcelo
Simulação numérica tridimensional do campo médio do escoamento em uma comporta segmento invertida / Marcelo Dalla Corte. -- 2013.
59 f. : il. ; color; 30cm.

Dissertação (mestrado) -- Universidade do Vale do Rio dos Sinos. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, São Leopoldo, RS, 2013.
Orientadora: Profa Dra Rejane de Césaro Oliveski; Coorientadora: Profa Dra Edith Beatriz Camaño Schettini.

1. Engenharia hidráulica. 2. Eclusas - Navegação. 3. Comporta. 4. Segmento invertida. 5. Simulação numérica I. Título. II. Oliveski, Rejane de Césaro. III. Schettini, Edith Beatriz Camaño.

CDU 626/627

AGRADECIMENTOS

À minha família, em especial meus pais Ibanor e Geneci pelo apoio e amor incondicional.

À minha namorada Carina pelo amor, carinho e incentivo durante a realização deste trabalho.

Às Professoras Rejane de Césaroliveski e Edith Beatriz Camaño Schettini pela orientação na realização deste trabalho e pelo exemplo profissional como docentes e pesquisadoras.

À Capes pela concessão da bolsa de estudos.

À FINEP e à Furnas Centrais Elétricas pelo apoio financeiro para a realização de parte da pesquisa.

Ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da UNISINOS pelo suporte e estrutura acadêmica.

Aos amigos e colegas do PPG em Engenharia Mecânica da UNISINOS e do Laboratório de Obras Hidráulicas do IPH-UFRGS pela amizade e companheirismo.

RESUMO

Comportas segmento invertidas são frequentemente utilizadas no controle do enchimento e esgotamento de eclusas de navegação de alta queda. Durante o período de abertura, altas velocidades e flutuações de pressão ocorrem a jusante destas comportas, o que aumenta o potencial para a ocorrência de cavitação no escoamento. Neste trabalho buscou-se analisar por meio de simulação numérica as características do escoamento a jusante de uma comporta segmento invertida. O modelo matemático é bifásico, tridimensional e composto pelas equações da conservação da massa, quantidade de movimento, fração volumétrica e equações do modelo de turbulência. O modelo computacional foi desenvolvido com o software comercial ANSYS-CFX, com malha computacional do tipo hexaédrica. Perfis de pressões no teto e na base do conduto a jusante da comporta foram utilizados para validação do modelo numérico com resultados experimentais, provenientes de estudos realizados pelo IPH-UFRGS (Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul). A comparação entre os resultados mostrou que o modelo numérico reproduz com boa precisão as principais características do escoamento médio observado no modelo experimental. Os coeficientes hidráulicos calculados para os resultados numéricos também mostraram boa concordância com os resultados do modelo experimental e com os disponíveis na literatura. A análise do campo de pressões mostrou que as pressões mínimas encontram-se sob a borda da comporta. Além disso, verificou-se por meio do campo de tensões cisalhantes na base do conduto e por meio de vetores de velocidade um padrão de escoamento tridimensional no jato a jusante da comporta, caracterizado pela presença de regiões de rotação próximo da base e das paredes.

Palavras-Chave: eclusas de navegação; comporta segmento invertida; simulação numérica; CFD; CFX.

ABSTRACT

Reversed Tainter gates are often used to control the filling and emptying of high lift navigation locks. During the opening period, high velocities and pressure fluctuations occur downstream the gates, which increases the potential for the occurrence of cavitation in the flow. In this work we seek to analyze by means of numerical simulation the characteristics of the flow downstream of a reversed Tainter gate. The computational model was validated by comparing the profiles of pressure of the roof and at the base of the conduit downstream of the gate with the average pressure profiles obtained in an experimental model from studies conducted by IPH-UFRGS. A comparison of the results showed that the model reproduced with good accuracy the main flow characteristics observed in experimental medium. The hydraulic coefficient calculated for the numerical results also showed good agreement with experimental results and those available in the literature. The analysis of the pressure field showed that the minimum pressures are under the edge of the gate. Furthermore, it was found by means of the shear stress at the base of the conduit and through velocity vector a three-dimensional pattern in the jet flow downstream of the gate, characterized by the presence of vortex near the base and walls.

Keywords: navigation locks; reversed Tainter gate; numerical simulation; CFD; CFX.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Esquema de uma eclusa de navegação: (a) vista superior e (b) vista lateral.....	19
Figura 2.2 – Eclusa 1 de Tucuruí, rio Tocantins, Brasil.....	20
Figura 2.3 – Eclusa Willow Island, rio Ohio, EUA.....	20
Figura 2.4 – Exemplos de sistemas de enchimento e esgotamento de eclusas de navegação: (a) cabeceiras; (b) portas laterais; (c) galeria lateral e (d) longitudinal.....	22
Figura 2.5 – Percentual de abertura da comporta, taxa de elevação e nível d’água na câmara vs. tempo: (a) enchimento e (b) esgotamento.	23
Figura 3.1 – Esquema de uma comporta plana.....	25
Figura 3.2 – Esquema de uma comporta segmento convencional.....	26
Figura 3.3 – Esquema de uma comporta segmento invertida.....	26
Figura 3.4 – Parâmetros hidráulicos e geométricos do escoamento.....	27
Figura 3.5 – C_c vs. a para comporta segmento invertida.	29
Figura 3.6 – C_d vs. a para comporta segmento invertida.....	30
Figura 3.7 – K_v vs. a para comporta segmento invertida.	31
Figura 4.1 – Modelo experimental.	33
Figura 4.2 – Modelo experimental: transdutores eletrônicos de pressão instalados no teto e na base do conduto a jusante da comporta.	34
Figura 4.3 – Domínio computacional.	35
Figura 4.4 – Distribuição dos blocos para geração da malha espacial.	35
Figura 4.5 – Malha computacional.	36
Figura 5.1 – Pressão vs. posição para $a = 30\%$ e $Q = 90$ l/s: (a) teto e (b) base.....	41
Figura 5.2 – Pressão vs. posição para $a = 50\%$ e $Q = 90$ l/s: (a) teto e (b) base.....	42
Figura 5.3 – Pressão vs. posição para $a = 70\%$ e $Q = 90$ l/s: (a) teto e (b) base.....	42
Figura 5.4 - Pressão vs. posição para $a = 50\%$ e $Q = 40$ l/s: (a) teto e (b) base.	42
Figura 5.5 - Pressão vs. posição para $a = 50\%$ e $Q = 180$ l/s: (a) teto e (b) base.	42
Figura 5.6 – Pontos para $Q = 90$ l/s: (a) $a = 30\%$; (b) $a = 50\%$ e (c) $a = 70\%$	44
Figura 5.7 – Distâncias adimensionais vs. a	45
Figura 5.8 – C_c vs. a	46
Figura 5.9 – C_d vs. a	46
Figura 5.10 – K_v vs. a	47
Figura 5.11 – Campo de pressão no plano de simetria para $Q = 90$ l/s: (a) $a = 30\%$, (b) $a = 50\%$, (c) $a = 70\%$	48

Figura 5.12 – Detalhe do campo de pressão na região da borda inferior da comporta para $a = 30\%$ e $Q = 40$ l/s: (a) plano de simetria e (b) parede.....	49
Figura 5.13 – Detalhe do campo de pressão na região da borda inferior da comporta para $a = 50\%$ e $Q = 90$ l/s: (a) plano de simetria e (b) parede.....	49
Figura 5.14 – Detalhe do campo de pressão na região da borda inferior da comporta para $a = 70\%$ e $Q = 180$ l/s: (a) plano de simetria e (b) parede.....	49
Figura 5.15 – Campo de velocidade no plano de simetria para $Q = 90$ l/s: (a) $a = 30\%$, (b) $a = 50\%$, (c) $a = 70\%$	50
Figura 5.16 – Linhas de corrente no plano de simetria: (a) $a = 30\%$, (b) $a = 50\%$, (c) $a = 70\%$	51
Figura 5.17 – Tensão de cisalhamento X na base para $Q = 90$ l/s: (a) $a = 30\%$, (b) $a = 50\%$, (c) $a = 70\%$	52
Figura 5.18 – Tensão de cisalhamento Z na base para $Q = 90$ l/s: (a) $a = 30\%$, (b) $a = 50\%$, (c) $a = 70\%$	53
Figura 5.19 – Vetores de velocidade na seção do conduto a jusante da comporta para $Q = 90$ l/s: (a) $a = 30\%$; (b) $a = 50\%$; (c) $a = 70\%$	54
Figura 5.20 – Tensão de cisalhamento na parede para $Q = 90$ l/s: (a) $a = 30\%$, (b) $a = 50\%$, (c) $a = 70\%$	55

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Classificação das eclusas quanto à queda.....	21
--	----

LISTA DE ABREVIATURAS

ANA – Agência Nacional de Águas.

IPH-UFRGS – Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio grande do Sul.

RANS – Reynolds Averaged Navier-Stokes Equations – Equações de Navier-Stokes para o Campo Médio do Escoamento.

UNISINOS – Universidade do Vale do Rio dos Sinos.

LISTA DE SÍMBOLOS

- a – percentual de abertura da comporta [-]
- b – abertura da comporta [m]
- B – altura da galeria [m]
- C_c – Coeficiente de contração [-]
- C_d – Coeficiente de descarga [-]
- $C_\mu, C_{1\varepsilon}, C_{2\varepsilon}, \sigma_\kappa$ e σ_ε - constantes do modelo de turbulência [-]
- d_f – sobre-elevação do nível da água na câmara. [m]
- dz/dt – taxa de elevação do nível d'água na câmara [m/s]
- g – aceleração da gravidade [m/s²]
- H – diferença de carga entre os níveis d'água de montante e o da câmara [m]
- H_L – perda de carga [Pa]
- K – parâmetro de cavitação [-]
- K_i – índice de cavitação [-]
- K_v – coeficiente de perda de carga [-]
- p – pressão [Pa]
- P_κ – termo de produção da energia cinética turbulenta
- Q – vazão volumétrica [m³/s]
- r – fração volumétrica da fase [-]
- S_M – termo fonte devido à gravidade [kg/(m·s²)]
- t – tempo [s]
- t_f – instante de tempo onde a taxa de elevação do nível da água na câmara é nula. [s]
- t_m – instante de tempo onde ocorre a máxima taxa de elevação do nível da água na câmara [s]
- t_v – instante de tempo onde a válvula está completamente aberta [s]
- \mathbf{V} – vetor velocidade [m/s]
- V – velocidade média [m/s]
- W – largura da galeria [m]
- Δh – queda de pressão através da comporta [Pa]

Símbolos gregos

- μ – viscosidade cinemática [Pas]
- ρ – massa específica [kg/m³]

κ – energia cinética [m^2/s^2]

ε – taxa de dissipação da energia cinética turbulenta [m^2/s^3]

Super-índices

' – modificada

Sub-índices

a – atmosférica

eff – efetiva

κ – energia cinética turbulenta

m – mistura

ref – referência

t – turbulenta

v –vapor

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
1.1 OBJETIVOS	17
1.2 METODOLOGIA.....	17
1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO	18
2 ECLUSAS DE NAVEGAÇÃO	19
2.1 SISTEMAS DE ENCHIMENTO E ESGOTAMENTO.....	22
2.2 CICLO DE ENCHIMENTO E ESGOTAMENTO.....	23
3 VÁLVULAS DE CONTROLE DE FLUXO	25
3.1 COEFICIENTES HIDRÁULICOS	28
3.1.1 Coeficiente de contração	28
3.1.2 Coeficiente de descarga	29
3.1.3 Coeficiente de perda de carga.....	30
4 MODELAGEM COMPUTACIONAL	32
4.1 ANSYS CFX	32
4.2 APRESENTAÇÃO DO MODELO EXPERIMENTAL.....	33
4.3 GEOMETRIA E MALHA COMPUTACIONAL.....	34
4.4 EQUAÇÕES GOVERNANTES	37
4.5 CONDIÇÕES INICIAIS E DE CONTORNO	39
5 RESULTADOS	41
5.1 VALIDAÇÃO NUMÉRICA	41
5.2 COEFICIENTES HIDRÁULICOS	43
5.3 CAMPOS DE PRESSÃO, VELOCIDADE E TENSÕES DE CISALHAMENTO	47
6 CONCLUSÕES.....	56
7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	58

1 INTRODUÇÃO

O Brasil possui um grande potencial hidrográfico. No entanto, o principal aproveitamento dos rios brasileiros destina-se à geração de energia elétrica por meio de usinas hidrelétricas. A navegação como meio de transporte foi bastante utilizada no período colonial e do Império. Porém, nas últimas décadas os investimentos governamentais no setor de transportes foram direcionados para a construção de rodovias. Em contrapartida, observa-se que países desenvolvidos da Europa e da América do Norte aproveitam ao máximo seus recursos hídricos para a navegação (ANA, 2004).

O transporte hidroviário é três vezes mais eficiente energeticamente que o transporte rodoviário e cerca de 40% mais eficiente que o transporte ferroviário. Outra vantagem do transporte hidroviário é o descongestionamento das rodovias. Segundo PIANC (2011), os custos decorrentes do congestionamento das rodovias, apesar de não serem medidos diretamente, possuem impactos significativos em termos de aumento da poluição do ar, consumo de recursos energéticos, geração de gases de efeito estufa e acidentes. Deste modo, a navegação fluvial apresenta uma oportunidade para avançar em direção a um sistema de transportes mais sustentável. No entanto, apesar do menor consumo de combustível e emissão de poluentes, o transporte hidroviário pode causar impactos ambientais, como por exemplo, no caso de acidentes com as embarcações. Neste caso, a gravidade do impacto ambiental associa-se principalmente ao potencial poluidor ou contaminante da carga transportada. Outra forma de dano ambiental ocorre quando as embarcações colidem com as margens dos rios nos trechos sinuosos, provocando a queda de árvores e o desbarrancamento das margens. As ondas superficiais geradas pela passagem das embarcações também colaboram no processo de erosão das margens dos rios. Outros problemas ambientais e socioeconômicos são decorrentes das atividades de melhorias nas hidrovias. O derrocamento (fragmentação e retirada de rochas no leito do rio) e a dragagem (retida de areias do fundo da calha do rio) podem aumentar a turbidez e a quantidade de sólidos em suspensão da água. A construção de barragens ou canais de desvios, juntamente com obras de transposição (como as eclusas, por exemplo), permite a continuidade da navegação em trechos de rios que apresentem quedas d'água ou corredeiras. Nestes casos, o impacto ambiental é gerado principalmente pela área alagada. No entanto, o impacto destas barragens é relativamente menor quando comparado ao impacto produzido pelas barragens construídas pelo setor elétrico (ANA, 2004).

Para que o transporte hidroviário funcione de maneira adequada e seja competitivo, é fundamental que ele esteja conectado com as demais modalidades de transporte (ANA, 2004). Neste cenário, a construção de eclusas de navegação e outras obras de infraestrutura, como portos e terminais, são importantes para a expansão da navegação interior no Brasil. Um dos problemas encontrados na construção de uma eclusa de navegação consiste em dimensioná-la corretamente e garantir o seu funcionamento de modo seguro e eficiente. Para tanto, conforme afirma De Mulder (2011), é necessário dispor de ferramentas que possuem uma acurácia aceitável e conhecida e com um custo adequado.

Neste sentido, USACE (2006) comenta que modelos experimentais em escala reduzida têm sido utilizados extensivamente, tanto na fase de projeto como para analisar problemas específicos em eclusas já construídas. Estudos em modelos experimentais devem ser realizados para eclusas com quedas maiores que 40 ft (~12 m) devido às características particulares de cada projeto. Modelos em escala 1:25 são os mais utilizados atualmente, pois permitem fazer observações da turbulência do escoamento, além de facilitar a instrumentação para medições. Stockstill (2009) ressalta a importância de se testar em modelos experimentais propostas de inovações ou alterações em sistemas de enchimento e esgotamento de eclusas para assegurar critérios de desempenho e segurança. Stockstill e Berger (2009) também comentam que na construção ou reabilitação de uma eclusa, ou na alteração de suas condições operacionais, novas ideias a respeito do sistema de enchimento/esgotamento são propostas, as quais geralmente diferem dos padrões usuais recomendados e, mesmo que algumas destas sejam viáveis economicamente, estas podem não satisfazer critérios de segurança de operação da eclusa. Por isso, cada novo conceito de projeto precisa ser cuidadosamente estudado em modelos físicos, os quais, em geral, demandam tempo e recursos.

Menéndez *et al.* (2010) também ressalta que, historicamente, os estudos de sistemas hidráulicos de eclusas de navegação têm sido desenvolvidos em modelos experimentais. Porém, modelos experimentais estão sujeitos a efeitos de escala, os quais provocam desvios no comportamento do escoamento no modelo em escala reduzida em relação ao comportamento observado no protótipo. Estes desvios ocorrem porque alguns efeitos, em especial aqueles associados à dissipação de energia, não obedecem à relação de escala aplicada na geometria. Neste sentido, um modelo numérico tridimensional provê um meio mais econômico, tanto em relação ao tempo quanto aos custos da análise, para a avaliação detalhada da eclusa e seus componentes. Além disso, modelos numéricos provêm informações sobre todas as variáveis relevantes do escoamento e em todo o domínio de interesse, enquanto modelos experimentais provêm informação apenas nos pontos de medição (os quais devem

ser escolhidos com antecedência e são de difícil alteração), permitindo assim analisar áreas em que as medições experimentais podem não ser possíveis. Adicionalmente, modelos computacionais permitem alterar a geometria ou condições operacionais rapidamente. Outra vantagem dos modelos numéricos é a possibilidade de se estudar casos com geometria em escala real (protótipo), evitando assim os efeitos de escala aos quais os modelos experimentais estão sujeitos. Neste caso, as limitações ou desvios que podem ser observados nos resultados de um modelo numérico em relação ao protótipo são decorrentes ou da resolução (espacial e/ou temporal) insuficiente, ou de limitações do modelo de turbulência. Nessa perspectiva, a utilização de modelos numéricos tridimensionais tende a aumentar na área de projeto de eclusas de navegação, sem diminuir, contudo, a utilização de modelos experimentais e modelos numéricos uni ou bidimensionais (Stockstill, 2009; Stockstill e Berger, 2009; Hammack e Stockstill, 2009b; Scheffermann e Stockstill, 2009; Menéndez *et al*, 2010; De Mulder 2011; Hammack e Stockstill, 2011).

De Mulder (2011) comenta sobre a potencialidade de se utilizar modelos experimentais e numéricos em conjunto no projeto de eclusas de navegação, e define esta abordagem como “metodologia híbrida”. Desta forma, pode-se atingir os critérios de desempenho desejados a um custo menor. Além disso, a verificação cruzada das informações obtidas em cada modelo contribui para aumentar a confiabilidade do projeto. De Mulder (2011) comenta ainda que um ingrediente fundamental para o sucesso da modelagem numérica é o conhecimento que o usuário de CFD possui sobre o “solver” e sobre o fenômeno físico em estudo. Também ressalta que são necessários maiores esforços no sentido de verificação das incertezas para que se possam usar modelos numéricos com mais confiança em situações de projeto que não dispõem de modelos experimentais.

Stockstill (2009) utilizou o código ADH para simular o escoamento em uma eclusa de navegação. O modelo numérico reproduz parte do canal de aproximação de montante, as tomadas d’água, galerias, as porta laterais e a câmara da eclusa. Através de simulação de escoamento em regime permanente, o autor pode determinar o coeficiente de perda de carga de cada componente do sistema de distribuição de água. Um modelo algébrico de viscosidade turbulenta foi utilizado para modelar as tensões de Reynolds das equações da quantidade de movimento do campo médio. O autor observou que o coeficiente de perda de carga das portas laterais obtido na simulação numérica foi significativamente menor do que o valor encontrado na literatura e atribui esta diferença a uma deficiência no modelo de turbulência utilizado na simulação. Resultados de simulação em regime transiente do enchimento da câmara mostraram as oscilações na superfície da água da câmara, com as quais o autor determinou os

esforços máximos de amarração das embarcações. Nos primeiros 4 minutos os esforços máximos ultrapassaram os valores estabelecidos como admissíveis para aquele caso.

Scheffermann e Stockstill (2009) avaliaram a aplicabilidade do software comercial STAR-CD para analisar a distribuição de pressões a jusante de uma válvula de controle de fluxo de eclusa durante a operação de abertura desta. A comparação dos resultados de pressões com resultados obtidos em modelo experimental apresentou diferenças de 1 a 2% enquanto as vazões apresentaram diferenças de até 15%.

Hammack e Stockstill (2009a; 2009b) utilizaram um modelo numérico tridimensional elaborado no software ADH para resolver as equações do campo médio do escoamento, juntamente com as equações do modelo de turbulência, para analisar o escoamento em uma comporta segmento invertida da eclusa John Day, instalada no rio Columbia, EUA. Hammack e Stockstill (2009a) utilizaram um valor constante de viscosidade turbulenta enquanto que Hammack e Stockstill (2009b) utilizaram o modelo de turbulência κ - ϵ . Segundo Hammack e Stockstill (2009a), esta comporta vinha apresentando problemas desde o início da operação da eclusa. Ruído e vibração provocavam trincas na estrutura da comporta, as quais tinham que ser constantemente reparadas. Inspeções recentes recomendaram a substituição da comporta. Porém, os autores comentam que antes de substituí-la é necessário entender os fatores que provocam ruído e vibração para poder propor soluções para o projeto da nova comporta. Diferentes aberturas da comporta para a mesma carga hidráulica foram simuladas em regime permanente. A partir dos resultados obtidos, pôde-se observar a formação do jato e a região de recirculação a jusante da comporta. Foram determinados os valores dos coeficientes de descarga e de perda de carga para cada abertura da comporta, os quais mostraram boa concordância com os valores obtidos em modelos experimentais e em protótipos. Os autores também calcularam a força exercida pelo escoamento sobre a comporta por meio da integração do campo de pressão na superfície da comporta (Hammack e Stockstill 2009a). Por meio do coeficiente de pressão, os autores avaliaram as zonas de baixas pressões a jusante da comporta. Estas regiões de baixas pressões aumentam o potencial para a ocorrência de cavitação, a qual pode causar danos para a estrutura (Hammack e Stockstill, 2009b).

Menéndez *et al.* (2010) utilizaram o software OpenFOAM para desenvolver um modelo numérico tridimensional para analisar o escoamento no sistema de enchimento/esgotamento de uma eclusa de navegação. A partir dos resultados os autores determinaram os coeficientes de perda de carga de cada componente do sistema para utilizá-los em um modelo numérico unidimensional para avaliar o enchimento/esgotamento da câmara da eclusa. Os resultados obtidos para o coeficiente de perda de carga e perfis de

velocidade em determinados trechos do sistema mostraram boa concordância com resultados disponíveis de medições feitas em modelos experimentais. Menéndez *et al.* (2010) também utilizaram um modelo numérico para analisar o escoamento em um sistema de enchimento/esgotamento de uma eclusa de navegação com as dimensões do protótipo e também com as dimensões do modelo em escala reduzida, com o objetivo de avaliar a influência dos efeitos de escala. Os resultados obtidos no modelo numérico do protótipo mostraram uma divisão praticamente igual do escoamento no partidor de fluxo, enquanto que o modelo experimental em escala reduzida apresentava uma assimetria significativa, também verificada nos resultados do modelo numérico com a geometria do modelo em escala reduzida. Os autores afirmam que o modo mais adequado de extrapolar os resultados de um modelo experimental para protótipo é por meio do modelo numérico do protótipo. Segundo os autores, isto constitui um novo paradigma na área de estudos hidráulicos, onde modelos físicos e modelos numéricos tornam-se complementares.

Hammack e Stockstill (2011) utilizaram o software comercial Ansys Fluent para analisar o escoamento em uma comporta segmento invertida da eclusa John Day, no rio Columbia, EUA. O modelo de turbulência utilizado foi o κ - ϵ . Por meio de contornos e linhas de corrente os autores analisaram os campos de pressão e velocidade e também as regiões de recirculações do escoamento. Os autores também determinaram os valores dos coeficientes de descarga, de contração e de perda de carga da comporta, os quais ficaram dentro da variação observada nos dados disponíveis na literatura e aqueles obtidos em ensaios de laboratório. As maiores diferenças observadas foram nos casos com pequenos e grandes percentuais de abertura da comporta.

Stockstill e Hammack (2013) utilizaram um modelo numérico tridimensional no software comercial Ansys Fluent para determinar os campos de pressão e velocidade em distribuidores de água de eclusas de navegação. Segundo os autores, o formato e o arranjo dos distribuidores em eclusas difere consideravelmente dos distribuidores convencionais encontrados na literatura. Construir e testar modelos experimentais para determinar o coeficiente de perda de carga de cada geometria pode ser dispendioso. Utilizando um modelo numérico tridimensional os autores puderam determinar o coeficiente de perda de carga de um distribuidor sob diferentes condições operacionais. Os valores deste coeficiente podem ser utilizados em modelos numéricos unidimensionais para dimensionar o sistema de enchimento/esgotamento de eclusas de navegação. Os autores observaram que os casos simulados utilizando o modelo de turbulência κ - ω apresentaram valores de coeficiente de perda de carga praticamente idênticos aos medidos em modelo experimental enquanto que os

mesmos casos testados com o modelo de turbulência κ - ϵ apresentaram valores ligeiramente menores.

Em eclusas de navegação de alta queda, comportas segmento invertida são frequentemente utilizadas no controle do enchimento e esgotamento. Devido às altas velocidades e flutuações de pressão que ocorrem no escoamento à jusante destas comportas, fenômenos hidráulicos nocivos à estrutura podem ocorrer, como por exemplo, vibração e cavitação. Por este motivo, faz-se necessário conhecer as características do escoamento nesse componente, de modo a projetar corretamente o sistema de enchimento e esgotamento e garantir o seu funcionamento de forma segura e eficiente. Hammack e Stockstill (2009b) comentam ainda que para determinar o desempenho de uma válvula de controle de fluxo é necessário compreender a complexa interação entre o escoamento e a válvula parcialmente aberta.

1.1 OBJETIVOS

Este trabalho tem como objetivo geral desenvolver um modelo numérico com o software comercial ANSYS CFX que reproduza o escoamento médio a jusante de uma comporta segmento invertida. Como objetivos específicos podem-se citar: (a) validar o modelo desenvolvido com diferentes condições operacionais através da comparação entre resultados numéricos de perfil de pressão com resultados experimental, obtidos pelo IPH-UFRGS; (b) analisar condições fluidodinâmicas, tais como campos de velocidades e de pressão e (c) obter coeficientes hidráulicos para a comporta.

1.2 METODOLOGIA

A metodologia consiste em reproduzir numericamente o modelo experimental de uma comporta segmento invertida existente no IPH-UFRGS, incluindo condições geométricas e operacionais. Para tal, cria-se a geometria no software Ansys ICEM-CFD, assim como uma malha computacional do tipo hexaédrica, por meio da metodologia multibloco. No módulo de pré-processamento do Ansys CFX (CFX-Pre) é construído o modelo numérico, o qual consiste das equações de conservação da conservação da massa, quantidade de movimento e do modelo de turbulência, acrescentando-se ainda as devidas condições iniciais e de contorno, bem como a definição de parâmetros de controle de simulação, os quais serão explorados nos próximos capítulos. No módulo de processamento (CFX-Solver) são executados os cálculos e

no módulo de pós-processamento (CFX-Post) são extraídos os valores de pressões nos pontos correspondentes as tomadas de pressões do modelo experimental para compará-los e validar o modelo numérico. Também são calculados os valores dos coeficientes hidráulicos para o modelo numérico, os quais também são comparados com os resultados do modelo experimental e com resultados disponíveis na literatura.

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

O Capítulo 2 apresenta uma visão geral do funcionamento de uma eclusa de navegação, suas classificações e principais componentes. O Capítulo 3 aborda as válvulas de controle do enchimento e esgotamento, assim como os coeficientes hidráulicos utilizados para avaliar o seu desempenho. No Capítulo 4 é apresentado o modelo experimental que será utilizado como referência, assim como o modelo numérico utilizado. O Capítulo 5 apresenta os resultados da validação do modelo numérico e outros resultados da análise dos campos de pressão, velocidade e tensões de cisalhamento. O Capítulo 6 apresenta as conclusões e sugestões de trabalhos futuros.

2 ECLUSAS DE NAVEGAÇÃO

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 de barragens). Uma eclusa de navegação é composta basicamente por quatro componentes: uma câmara, dentro da qual é possível variar o nível da água segundo as condições externas de montante e jusante, segundo o princípio de vasos comunicantes; um sistema de distribuição de água; um canal de aproximação superior; e um canal de aproximação inferior, conforme mostra o esquema da Fig. 2.1(a e b) (USACE, 2006).

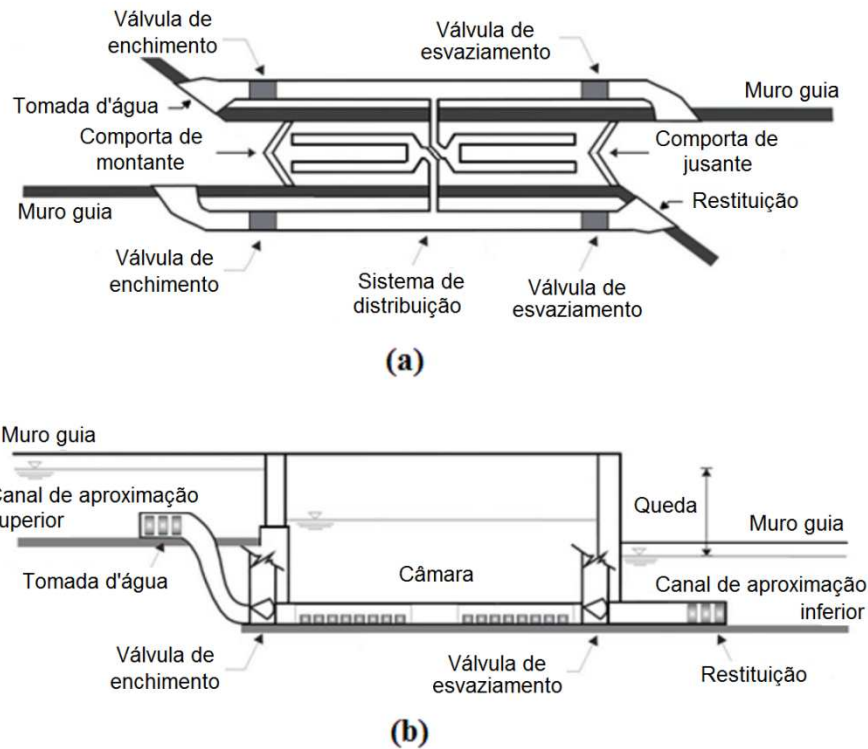


Figura 2.1 – Esquema de uma eclusa de navegação: (a) vista superior e (b) vista lateral.
Fonte: Adaptado de USACE (2006).

Como exemplos de eclusas, é mostrado na Fig. 2.2 uma imagem da Eclusa 1 de Tucuruí, construída no rio Tocantins, no Brasil, e na Fig. 2.3, uma imagem da Eclusa Willow Island, construída no rio Ohio, no EUA.



Figura 2.2 – Eclusa 1 de Tucuruí, rio Tocantins, Brasil.
Fonte: Eletronorte, 2011.

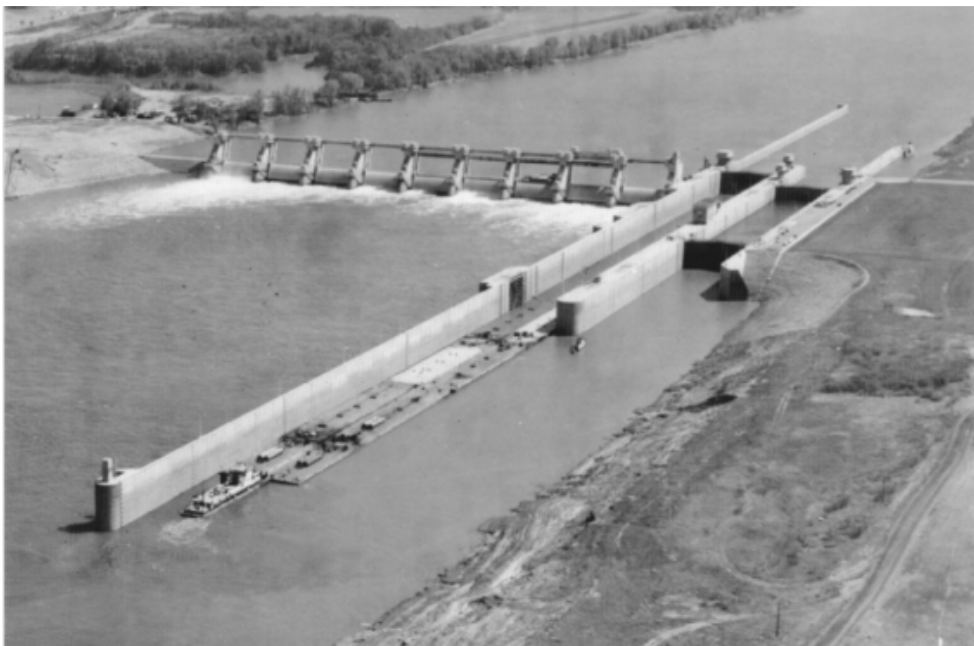


Figura 2.3 – Eclusa Willow Island, rio Ohio, EUA.
Fonte: (USACE, 2006).

A câmara é o local onde as embarcações são elevadas ou abaixadas, dependendo da direção que trafegam na hidrovia. A câmara possui um portão superior e outro inferior que permitem a passagem das embarcações entre a câmara e os acessos de montante e jusante. A diferença entre os níveis de montante e jusante é denominada de queda. O sistema de enchimento e esgotamento é o conjunto de tomadas d'água, galerias, válvulas e distribuidores

por onde a água escoar para encher ou esvaziar a câmara da eclusa. Existem diversos tipos de configurações possíveis quanto ao número, forma e localização dos distribuidores e do sistema em geral. O acesso de montante é o canal imediatamente a montante da eclusa, delimitado pelo muro-guia e pelo muro de proteção. O muro-guia tem a função de alinhar e guiar as embarcações para entrarem na eclusa e geralmente é uma prolongação de uma das paredes da câmara da eclusa. O muro de proteção tem a função de evitar que as embarcações entrem em áreas onde existam correntes perigosas ou que possam causar danos às embarcações e às estruturas. O acesso de jusante é o canal imediatamente a jusante da eclusa e possui muros-guia e de proteção semelhantes aos do acesso de montante.

As eclusas são classificadas em função do desnível que transpõem, conforme mostra a Tab. 2.1 (USACE, 2006).

Tabela 2.1 – Classificação das eclusas quanto à queda.

CLASSIFICAÇÃO	DESNÍVEL DE PROJETO
Baixíssima queda	0 a 10 ft (0 a ~3 m)
Baixa queda	10 a 30-40 ft (~3 a 9-12 m)
Alta queda	30-40 a 100 ft (~9-12 m a 30 m)
Altíssima queda	Acima de 100 ft (>30 m)

Fonte: USACE (2006)

Características como tamanho e quantidade de câmaras na eclusa, profundidade das soleiras, detalhes específicos dos muros guias e do sistema de enchimento e esgotamento são determinados com base em estudos sobre o tipo de embarcação que irá utilizar a via, além de fatores econômicos e ambientais. Fatores ambientais ou econômicos também podem requerer características de projeto direcionadas a minimizar a quantidade de água utilizada durante a eclusagem (por exemplo, em períodos de estiagem, em vias com tráfego intenso ou com múltiplos usos da água, ou eclusas alimentadas com água de lagos). Neste sentido, eclusas menores ou até mesmo elevadores mecânicos podem ser instalados para realizar a transposição de pequenas embarcações. Câmaras de armazenamento de água (ou câmaras recuperadoras) podem ser utilizadas para acumular uma parte da água que sai da câmara da eclusa durante o esgotamento para ser utilizada na operação de enchimento posterior. Eclusas com câmaras múltiplas (eclusas com vários degraus consecutivos, onde a porta de jusante da câmara superior é a porta de montante da câmara inferior e o enchimento da câmara inferior é feito com a água proveniente do esgotamento da câmara superior) ou eclusas em escada (eclusas com canais intermediários onde embarcações podem trafegar nos dois sentidos)

utilizam menos água para a eclusagem do que eclusas de câmara simples, mas possuem custo e tempo operacional maiores. A análise de fatores econômicos, construtivos, operacionais e ambientais determina as características de cada sistema de transposição (USACE, 2006; ANA, 2012).

2.1 SISTEMAS DE ENCHIMENTO E ESGOTAMENTO

O desnível a ser transposto na eclusa determina o tipo de sistema de enchimento e esgotamento mais adequado. No entanto, além da queda, fatores econômicos, operacionais e outros fatores de projeto também influenciam na escolha do tipo de sistema. Na Fig. 2.4(a-d) são mostrados alguns exemplos de sistemas de enchimento e esvaziamento.

Em eclusas de baixíssima queda, sistemas de enchimento e esgotamento pelas cabeceiras são adequados (Fig. 2.4a). O enchimento pode ser feito pelos portões da câmara ou por meio de válvulas instaladas nos próprios portões. Eclusas de baixa queda geralmente utilizam sistemas com galerias nos muros laterais, com portas laterais (Fig. 2.4b). Também podem utilizar sistemas com uma única galeria e distribuidores transversais no fundo da câmara (Fig. 2.4c). Este tipo de sistema também é adotado em casos em que o custo de escavação é elevado para utilizar um sistema de distribuição longitudinal. Já as eclusas de alta queda utilizam sistemas de distribuição longitudinal balanceado (Fig. 2.4d) (USACE, 2006).

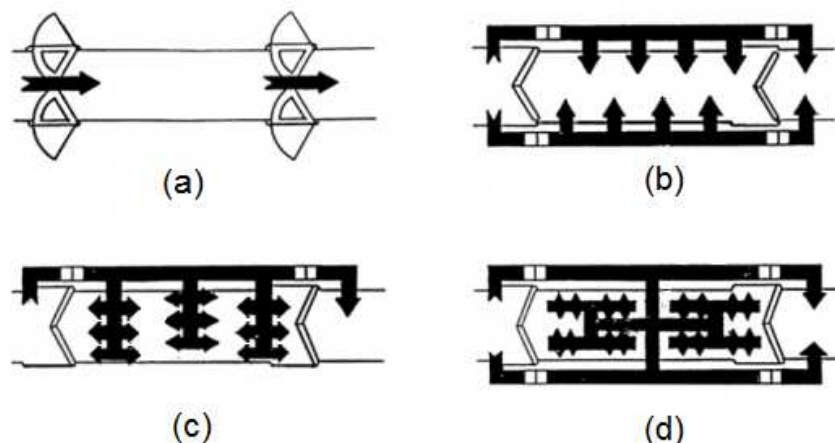


Figura 2.4 –Exemplos de sistemas de enchimento e esgotamento de eclusas de navegação: (a) cabeceiras; (b) portas laterais; (c) galeria lateral e (d) longitudinal.

Fonte: Adaptado de USACE (2006).

Durante a fase de projeto do sistema de enchimento/esgotamento de uma eclusa, os principais objetivos são: o rápido ciclo de enchimento e esgotamento, a segurança das

embarcações (por meio do critério da força de amarração (*hawser/mooring force*) que limita o deslocamento das embarcações na câmara e os esforços causados nos cabos de ancoragem), das estruturas e de pessoal, construção econômica, manutenção mínima, operação suave e ininterrupta (USACE, 2006; De Mulder, 2009).

2.2 CICLO DE ENCHIMENTO E ESGOTAMENTO

A Fig. 2.5(a-b) mostra a variação do percentual de abertura da comporta, da taxa de elevação do nível da água e do nível da água na câmara em função do tempo, para o ciclo de enchimento e esgotamento, respectivamente.

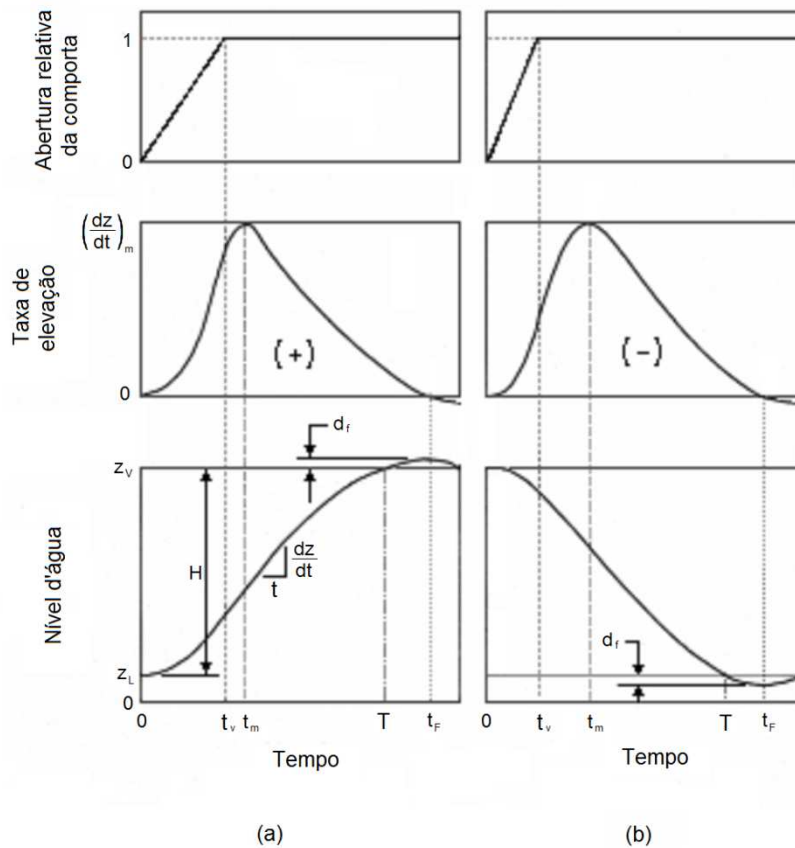


Figura 2.5 – Percentual de abertura da comporta, taxa de elevação e nível d'água na câmara vs. tempo: (a) enchimento e (b) esgotamento.

Fonte: Adaptado de USACE (2006).

Durante a operação de enchimento, as válvulas de esgotamento estão fechadas e as de enchimento iniciam a movimentação de abertura no tempo $t = 0$. H é a diferença inicial entre os níveis d'água de montante e da câmara. A taxa de elevação do nível d'água na câmara

(dz/dt) cresce até um valor máximo no tempo t_m , e em seguida diminui continuamente até zero no tempo t_f . A válvula está completamente aberta no tempo t_v . A inércia da água no sistema de enchimento causa um sobre-enchimento da câmara, elevando o nível da água até uma distância d_f , a qual ocorre no tempo t_f . Os parâmetros no processo de esgotamento da câmara são análogos aos do processo de enchimento (USACE, 2006).

Conforme USACE (2006), o tempo total de eclusagem consiste no tempo transcorrido desde a chegada da embarcação no ponto de espera, até o momento em que a mesma, após a transposição do desnível, atinge uma posição afastada o suficiente da eclusa que não interfira no tráfego das demais embarcações. Os tempos de aproximação, de entrada e de saída das embarcações na câmara da eclusa dependem da capacidade da embarcação e da habilidade do piloto. Já os tempos de abertura dos portões e de enchimento e esgotamento dependem exclusivamente do tipo de projeto da eclusa. Estes dois últimos tempos somam entre 24 a 40% do tempo de eclusagem. ANA (2012) recomenda que nas vias que possuam várias eclusas, o tempo de eclusagem deve ser o mesmo em todas as eclusas, a fim de evitar congestionamentos e garantir a regularidade do fluxo de navegação. A programação antecipada do tráfego na via também contribui para reduzir os tempos de eclusagem.

O projeto hidráulico da eclusa deve prever um tempo de eclusagem igual ou menor do que os valores estabelecidos como aceitáveis para a via. A redução do tempo de eclusagem tem benefícios econômicos, principalmente em vias com tráfego mais intenso. No entanto, cuidados especiais devem ser dados ao projeto das tomadas d'água, pois o escoamento nestes componentes podem causar ondulações na superfície da água e a indução de correntes nos acessos de montante e jusante. Além disso, flutuações no nível da água no interior da câmara podem causar esforços excessivos nas amaras das embarcações. Aumentando a profundidade da câmara, o tempo de entrada das embarcações e o tempo de enchimento/esgotamento são reduzidos, além de melhorar a segurança das embarcações, mas em contrapartida, o custo da obra aumenta (USACE, 2006).

3 VÁLVULAS DE CONTROLE DE FLUXO

As válvulas de controle de fluxo são responsáveis por controlar o enchimento e o esgotamento da câmara da eclusa de navegação. Os tipos de válvulas mais utilizados são a comporta plana (*lift gate*), a comporta segmento convencional e a comporta segmento invertida.

A Fig. 3.1 mostra um esquema de uma comporta plana em uma galeria. Estas comportas possuem menor custo, porém requerem consideravelmente mais manutenção nas partes móveis do que as comportas segmento. Eclusas de alta queda modernas raramente utilizam este tipo de comporta. Além disso, comportas planas são mais suscetíveis a apresentar problemas com vibração devido à separação do escoamento na borda inferior da comporta. Stockstill, Hammack e Hite (2011) recomendam utilizar ângulo de borda de 45° para reduzir a tendência à vibração da comporta. Outro fator que restringe a utilização deste tipo de comporta é que elas são encaixadas em fendas nas paredes das galerias. Estas descontinuidades nas paredes podem provocar a ocorrência de cavitação no escoamento, principalmente em eclusas de alta queda.

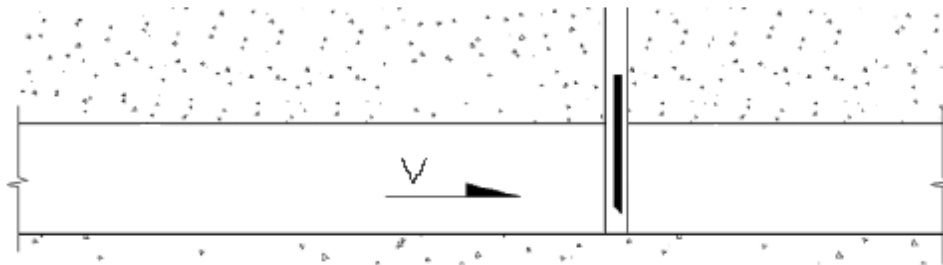


Figura 3.1 – Esquema de uma comporta plana.
Fonte: adaptado de Stockstill, Hammack e Hite (2011).

A orientação convencional das comportas segmento, também chamadas de comportas Tainter (uma adaptação das comportas desenvolvidas por Jeremiah B. Tainter e patenteada por ele em 1885 para controlar a vazão em vertedores), é similar a comporta segmento instalada em vertedores. Nesta posição a face convexa da comporta fica contra o escoamento e os braços de sustentação ficam sob compressão. As primeiras comportas segmento utilizadas em eclusas foram instaladas na posição convencional. No entanto, testes em modelos mostraram que durante o período de abertura, a pressão a jusante da comporta caía abaixo do nível do teto da galeria, provocando a entrada de grandes volumes de ar nas

galerias. Este ar acumulava-se em grandes bolsões restringindo o escoamento até que a pressão aumentasse e o expulsasse de maneira abrupta dentro da câmara da eclusa, provocando perturbações perigosas no nível da água. Por este motivo as comportas segmento convencionais não são utilizadas em eclusas de alta queda. No entanto, em situações em que a submergência é suficiente para prevenir a entrada de ar na galeria, ou em situações em que a entrada descontrolada de ar nas galerias não provoca problemas significativos (por exemplo, nas galerias do sistema de esgotamento), a comporta segmento pode ser utilizada na posição convencional, pois simplifica o projeto estrutural (USACE, 1975; Stockstill, Hammack e Hite, 2011). A Fig. 3.2 mostra um esquema de uma comporta segmento convencional utilizada em eclusas de navegação.

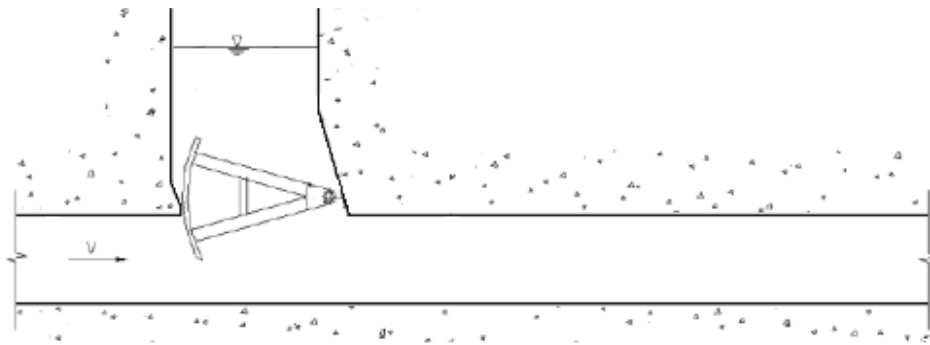


Figura 3.2 – Esquema de uma comporta segmento convencional.
Fonte: adaptado de Stockstill, Hammack e Hite (2011).

Por volta de 1930 em diante, os sistemas hidráulicos das maiores eclusas da América do Norte têm utilizado quase que exclusivamente a comporta segmento invertida para o controle do enchimento e esgotamento. Instalando a comporta segmento na posição invertida evita-se a entrada descontrolada de ar na galeria (USACE, 1975). A Fig. 3.3 mostra um esquema de uma comporta segmento invertida.

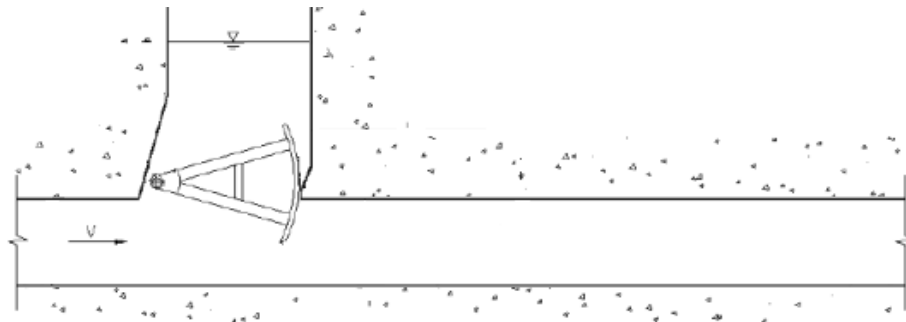


Figura 3.3 – Esquema de uma comporta segmento invertida.
Fonte: adaptado de Stockstill, Hammack e Hite (2011).

A Fig. 3.4 apresenta alguns parâmetros hidráulicos e geométricos do escoamento em uma comporta segmento invertida. O escoamento chega até a comporta com uma velocidade média (V) por uma galeria com altura B e largura W . Neste caso, a galeria a jusante da comporta possui as mesmas dimensões que a galeria de montante. Nesta figura, a comporta é mostrada parcialmente aberta, estando a borda inferior desta a uma altura b em relação ao fundo da galeria. O escoamento é forçado a passar pela abertura da comporta, formando um jato que se contrai até uma determinada distância, e em seguida se expande até ocupar toda a seção da galeria a montante da comporta. Acima do jato, logo a jusante da comporta forma-se uma região de recirculação. O local onde o jato apresenta a máxima contração é chamado de *vena contracta* e possui velocidade média V_2 e uma altura b_2 .

A linha piezométrica representa a variação da pressão estática ao longo da galeria. Quando o escoamento passa sob a comporta ocorre uma queda de pressão devido ao aumento da velocidade e da perda de carga. A diferença entre a pressão a montante da comporta e a pressão mínima a jusante desta é chamado de Δh . A linha de energia representa a variação da energia mecânica do escoamento ao longo da galeria. A transformação de parte da energia mecânica em energia térmica que ocorre devido às irreversibilidades do escoamento, quando este passa sob a comporta é chamada de perda de carga (H_L).

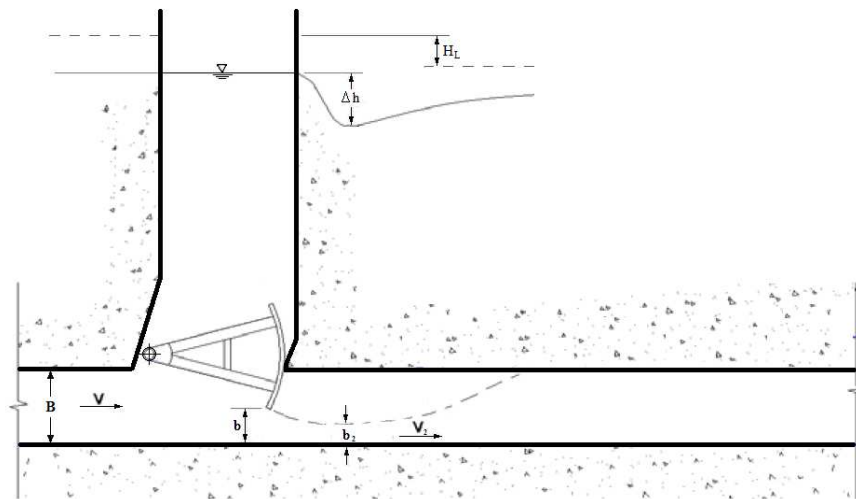


Figura 3.4 – Parâmetros hidráulicos e geométricos do escoamento.
Fonte: adaptado de Hammack e Stockstill (2011).

Durante o período de abertura das comportas, altas velocidades e baixas pressões são induzidas no escoamento imediatamente a jusante destas, podendo atingir a pressão de vapor da água e formar pequenas cavidades ou bolhas de vapor. Estas cavidades colapsam rapidamente ou implodem na água ou contra superfícies quando entram em regiões de pressão

mais alta. A implosão destas bolhas contra as paredes da galeria provoca deterioração do concreto. Em algumas situações, ruídos semelhantes a trovões ou tiros de canhão podem ser ouvidos. Em casos extremos, estes ruídos podem até mesmo sacudir as paredes da eclusa (USACE, 2006). Scheffermann e Stockstill (2009) comentam que baixas velocidades de manobras das comportas podem induzir a formação de jatos de alta velocidade e conseqüentemente baixas pressões a jusante das válvulas. No entanto, na maioria dos casos não é possível aumentar a velocidade de manobra da comporta, pois poderia induzir a formação de vórtices nas tomadas d'água ou ondulações indesejáveis na superfície da água na câmara da eclusa. Ensaio em modelos experimentais em escala reduzida ou modelos numéricos são necessários para determinar a velocidade ótima de manobras das válvulas.

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, alterações geométricas no conduto e adição controlada de ar (USACE, 1975). 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 aplicação de revestimentos resistentes e o rebaixamento da cota de assentamento da comporta podem onerar demasiadamente a obra. Alterações geométricas no conduto a jusante da comporta são uma opção promissora e de baixo custo. Estudos realizados por Pickering (1981 apud USACE, 2006) e por Santos (2012) para expansões no teto do conduto mostraram bons resultados em termos de redução do potencial de cavitação.

3.1 COEFICIENTES HIDRÁULICOS

3.1.1 Coeficiente de contração

O coeficiente de contração (C_c) representa a razão entre a altura mínima do jato que se forma a jusante da comporta (b_2) e a altura da borda inferior da comporta (b). A Fig. 3.5 mostra a variação do coeficiente de contração em função do percentual de abertura da comporta, para escoamento sob comporta segmento invertida. Os dados foram obtidos em diversos ensaios em modelos experimentais, modelo numérico e protótipos. Pode-se observar que os valores do coeficiente de contração apresentam uma considerável dispersão. Segundo Stockstill, Hammack e Hite (2011), esta dispersão se deve, em partes, ao fato de o coeficiente

de contração não poder ser medido diretamente, mas ser determinado a partir de outras quantidades observáveis.

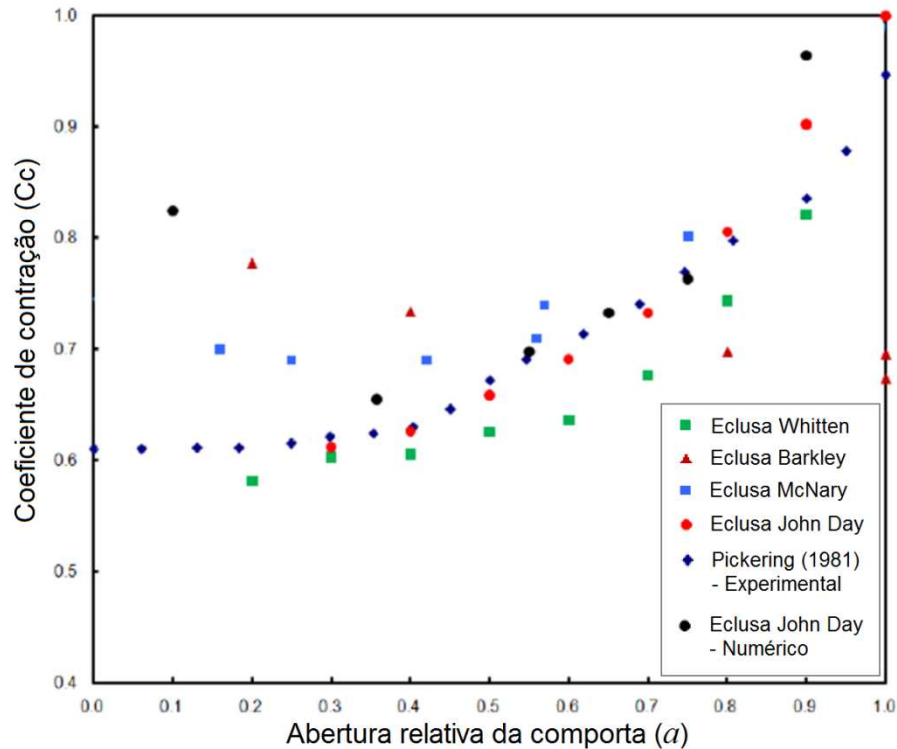


Figura 3.5 – C_c vs. a para comporta segmento invertida.
Fonte: adaptado de Hammack e Stockstill (2011).

3.1.2 Coeficiente de descarga

Uma maneira de quantificar a eficiência de uma comporta é por meio do coeficiente de descarga (C_d), definido como:

$$C_d = \frac{Q}{bW\sqrt{2g\Delta h}}, \quad (3.1)$$

onde Q é a vazão volumétrica, b é a altura de abertura da comporta, W é a largura da galeria, g é a aceleração da gravidade e Δh é a máxima variação de pressão no escoamento, dada em metros de coluna d'água.

Para a comporta segmento invertida, o coeficiente de descarga varia com o percentual de abertura da comporta. Isto ocorre porque o ângulo da borda varia em função da posição em que a comporta se encontra. A Fig. 3.6 mostra a variação do coeficiente de descarga em

função do percentual de abertura, para uma comporta segmento invertida, cujos dados foram obtidos de modelos numérico e experimental, além de dados de protótipos.

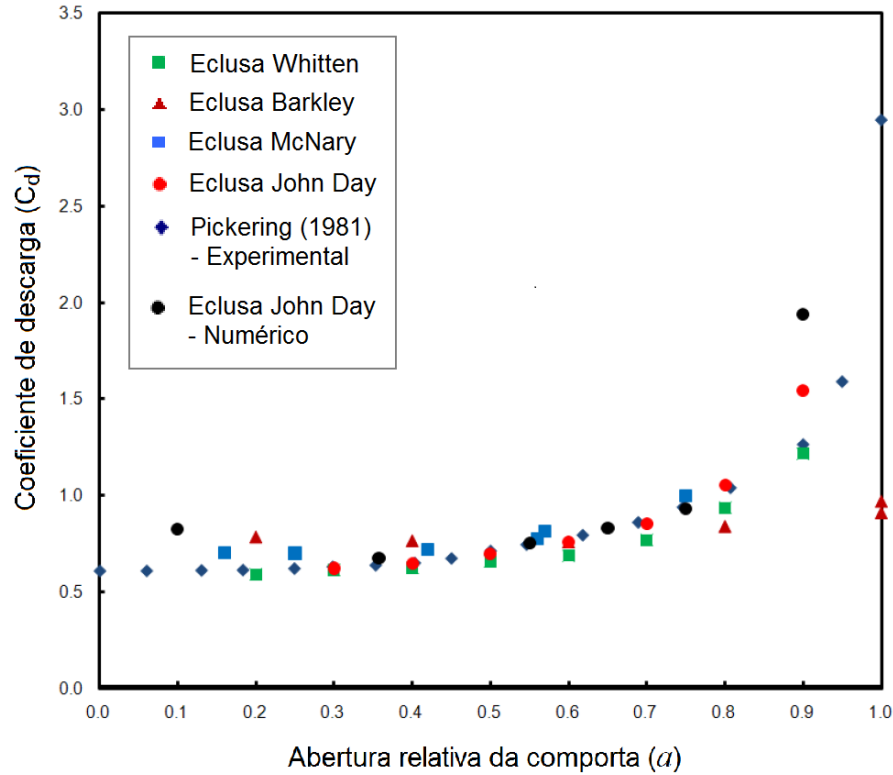


Figura 3.6 – C_d vs. a para comporta segmento invertida.
Fonte: adaptado de Hammack e Stockstill (2011).

3.1.3 Coeficiente de perda de carga

Além do coeficiente de descarga, outra forma de medir a eficiência de uma comporta é pelo coeficiente de perda de carga, definido como:

$$H_L = K_v \rho \frac{V^2}{2}, \quad (3.2)$$

onde H_L é a perda de carga provocada pela comporta, em Pa, ρ é a massa específica da água, V é a velocidade média na seção da galeria a montante da comporta e K_v é o coeficiente de perda de carga.

A perda de carga em uma comporta segmento invertida é função do seu formato e percentual de abertura (Stockstill, Hammack e Hite, 2011). O coeficiente de perda de carga da comporta segmento invertida é maior do que o da comporta segmento convencional. Esta

diferença, segundo Stockstill, Hammack e Hite (2011), é devido à borda da comporta, a qual, no caso da comporta segmento invertida, aponta contra o escoamento.

A Figura 3.7 mostra valores coeficiente de perda de carga em função do percentual de abertura, para comporta segmento invertida, obtidos de diversos modelos experimentais e protótipos.

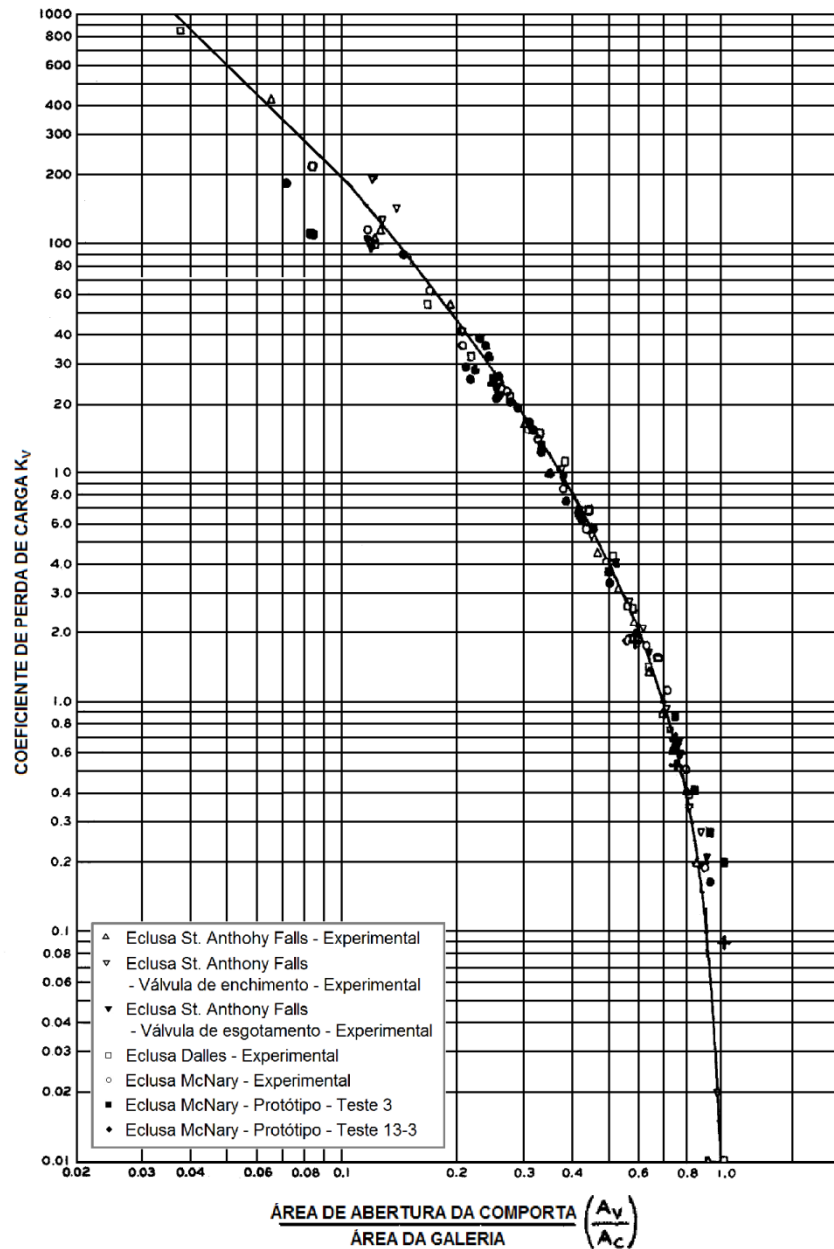


Figura 3.7 – K_v vs. a para comporta segmento invertida.
Fonte: adaptado de USACE (1975).

4 MODELAGEM COMPUTACIONAL

Este capítulo descreve detalhadamente o modelo experimental utilizado como referência para trabalho e também apresenta o software e o modelo numérico utilizados, juntamente com a descrição das condições operacionais analisadas.

4.1 ANSYS CFX

Stockstill e Hammack (2013) lembram que um modelo computacional é composto pelas equações governantes, pelo esquema de discretização utilizado para resolver numericamente essas equações, por uma malha computacional na qual o domínio de cálculo é discretizado e pelas condições iniciais e de contorno necessárias para fechar o sistema de equações. Devido à complexidade física e numérica envolvida nas análises em CFD, surge a necessidade por softwares ou pacotes computacionais que reúnam todos os recursos necessários para desempenhar esta tarefa de modo eficiente. Atualmente, existem diversos softwares comerciais e livres (alguns com código aberto) de CFD disponíveis. Em geral, os software comerciais possuem uma interface bastante amigável, tornando o processo bastante ágil e produtivo. Já os software livres com código aberto possuem uma interface menos amigável, mas possuem a vantagem de permitir ao usuário o acesso ao código-fonte para realizar alterações que se fizerem necessárias.

Neste estudo utilizaram-se os softwares comerciais Ansys ICEM-CFD e o Ansys CFX, disponíveis no Laboratório de Simulação Numérica do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da UNISINOS. No software Ansys ICEM-CFD é criada ou importada a geometria e gerada a malha computacional. Já o Ansys CFX é composto por três módulos: o CFX-Pre, onde são aplicadas as condições iniciais e de contorno, a escolha do modelo matemático a ser utilizado para cada caso (e como consequência o conjunto de equações governante), esquemas de discretização, passo de tempo e outros parâmetros de controle de simulação; o CFX-Solver Manager, onde ocorre a execução os cálculos da simulação e a visualização da evolução destes, por meio de gráficos dos resíduos das equações ou de alguma variável específica do problema; e o CFX-Post, onde é realizada a análise dos resultados, por meio de perfis, linhas de corrente, isosuperfícies, campos de velocidade e de pressão, entre outros.

4.2 APRESENTAÇÃO DO MODELO EXPERIMENTAL

O modelo numérico desenvolvido neste trabalho busca reproduzir o comportamento do campo médio do escoamento observado em um modelo experimental construído pelo IPH-UFRGS, onde pesquisadores dessa instituição estudaram as características do escoamento a jusante de uma comporta segmento invertida. A seguir, será feita uma breve descrição deste modelo experimental, o qual serviu de base para os estudos numéricos deste trabalho.

A Figura 4.1 mostra um esquema do modelo experimental existente no laboratório do IPH-UFRGS. Este modelo possui conduto com seção quadrada de 0,25 m de lado, com comprimento de 1,7 m a montante do poço da comporta e 4 m a jusante. O poço da comporta (que será chamado de câmara) possui comprimento de 0,4 m e altura de 0,75 m. 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 (b) e a altura do conduto a jusante da comporta (B). A chaminé de equilíbrio possui diâmetro de 0,1 m e 2,5 m de altura. A vazão volumétrica (Q) pode variar de 22 a 220 l/s e é monitorada por meio de um medidor eletromagnético instalado a montante da seção de testes. Todos os ensaios foram realizados em regime permanente, sem adição de ar e com percentuais de abertura da comporta variando de 10 até 100%.

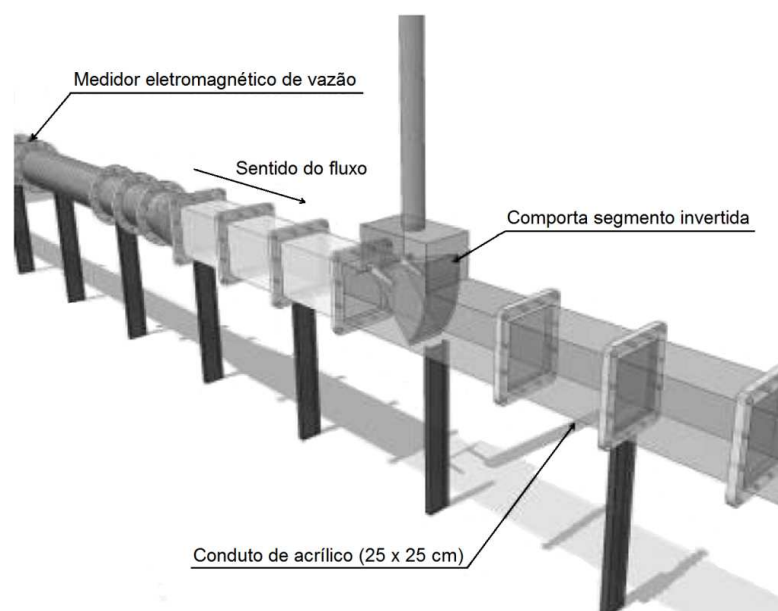


Figura 4.1 – Modelo experimental.
Fonte: Kempka, 2011.

No teto e na base do conduto a jusante da comporta foram instaladas tomadas de pressões, de maneira que se pudessem fazer medições com piezômetros e com transdutores eletrônicos de pressão. Também foi instalado um transdutor na base na entrada da câmara para permitir a análise da perda de carga na comporta. A Fig. 4.2 mostra uma imagem de parte da câmara do modelo experimental e um trecho do conduto a jusante desta com os transdutores de pressão instalados no teto e na base. Mais detalhes sobre a abordagem experimental podem ser obtidos em Mees *et al.* (2008), Batistton *et al.* (2009) e Kempka (2011).



Figura 4.2 – Modelo experimental: transdutores eletrônicos de pressão instalados no teto e na base do conduto a jusante da comporta.

Fonte: Kempka, 2011.

4.3 GEOMETRIA E MALHA COMPUTACIONAL

No software ICEM-CFD foi reproduzida a geometria da bancada de testes experimentais com algumas simplificações: não foram considerados o eixo e os braços de sustentação da comporta. 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 na Fig. 4.3.

A malha espacial é do tipo hexaédrica, construída através da metodologia multibloco. Neste método de geração de malha, a geometria do modelo é subdividida em vários blocos com formato de paralelepípedo com o objetivo de melhor ajustar a distribuição dos volumes ao contorno da geometria. A Fig. 4.4 mostra a distribuição final dos blocos para uma geometria com uma abertura da comporta de 50%.

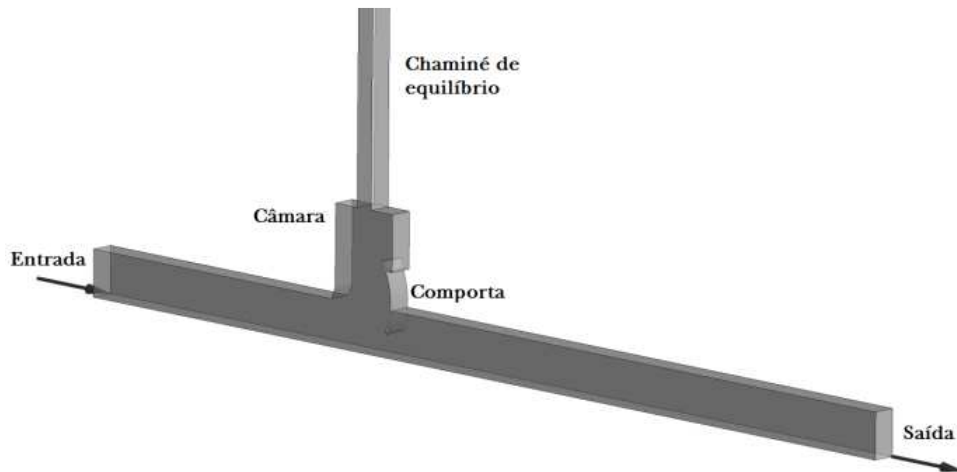


Figura 4.3 – Domínio computacional.



Figura 4.4 – Distribuição dos blocos para geração da malha espacial.

Para gerar as malhas utilizadas neste trabalho, em cada caso iniciou-se o processo com um bloco envolvendo toda a geometria. Em seguida, este bloco foi sendo seccionado nas direções horizontal e vertical. Posteriormente alguns blocos foram excluídos; outros foram criados durante o processo, a partir da extrusão de faces dos blocos. Em seguida os vértices e as arestas dos blocos precisam ser associados a pontos e linhas da geometria, respectivamente. Vários pontos tiveram de ser criados na geometria para permitir a associação dos vértices dos blocos. Na Fig. 4.4, as arestas dos blocos que possuem associação com linhas da geometria aparecem na cor verde, enquanto que as linhas que não possuem associação aparecem nas cores branca e azul. Algumas arestas de blocos que se sobrepõem à linhas retas da geometria não necessitam de associação, já que seus vértices já estão associados aos pontos da geometria. O ICEM-CFD também possui ferramentas que permitem curvar as arestas dos blocos para melhorar a qualidade da malha. Pode-se observar o uso deste recurso na Fig. 4.4

nas arestas que contornam a comporta, em algumas arestas de blocos da câmara e do conduto a jusante da comporta. Após finalizar o ajuste dos blocos parte-se para a divisão das arestas dos blocos para gerar a malha propriamente dita. Para cada bloco define-se o número de divisões e a lei de distribuição destas divisões para cada aresta. A lei de distribuição permite controlar a distribuição das divisões sobre a aresta, podendo-se concentrar mais divisões em um determinado trecho (geralmente nas extremidades ou em uma das extremidades das arestas) e a taxa de crescimento das divisões a partir das extremidades. Deste modo pode-se controlar com bastante facilidade os refinamentos aplicados, geralmente, nas regiões próximas às paredes do modelo. As arestas de um mesmo bloco que estão na mesma direção, por exemplo, na horizontal ou na vertical, possuirão sempre o mesmo número de divisões, mas podem ter leis de distribuição diferentes. Da mesma forma, os blocos vizinhos possuirão o mesmo número de divisões e lei de distribuição nas arestas que compartilham, mas podem ter uma lei de distribuição diferentes nas demais arestas de uma mesma direção. Na direção da profundidade (largura) todos os blocos possuem o mesmo número de divisões e a mesma lei de distribuição.

Na Figura 4.5 é mostrado um detalhe da malha computacional na região da comporta para um caso com percentual de abertura de 50%. Nesta figura pode-se observar o refinamento em todas as paredes físicas do domínio computacional. Para cada condição de abertura da comporta foi criada uma geometria e uma malha computacional.

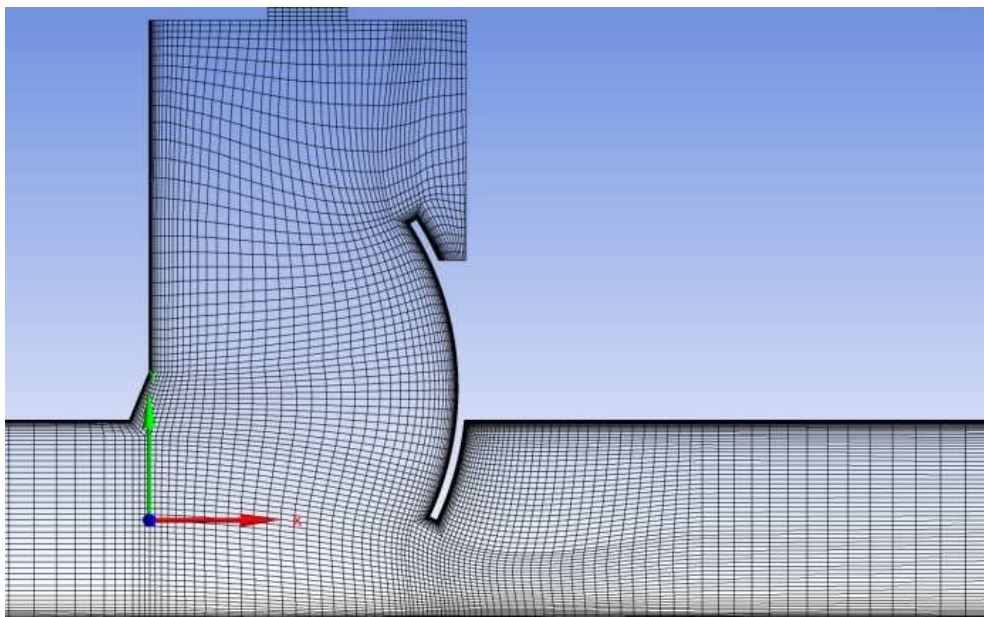


Figura 4.5 – Malha computacional.

As malhas utilizadas têm aproximadamente 660 mil volumes de controle cada. Foram testadas duas malhas com menor refinamento e uma com maior refinamento para o caso com vazão de 90 l/s e abertura de 50%. O critério para avaliação das malhas foi o perfil de pressão na base do conduto. Observou-se que a variação média da pressão foi de aproximadamente 0,1% e a variação máxima de aproximadamente 1,5% a medida que a malha foi sendo refinada. A malha com aproximadamente 660 mil volumes de controle foi considerada adequada para analisar o problema em questão.

4.4 EQUAÇÕES GOVERNANTES

Para representar matematicamente o problema em questão foi escolhido o modelo homogêneo com superfície livre. Esta abordagem considera duas fases presentes, a água e o ar. No entanto, um único campo de pressão, velocidade e turbulência é resolvido. 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 computacional. Desta forma, o modelo permite que o nível da água na chaminé de equilíbrio se ajustasse à carga hidráulica correspondente em cada condição. Além disso, estas equações são equações para o campo médio (temporal) do escoamento, por isso se faz necessária a utilização de um modelo de turbulência.

As equações que compõem o modelo numérico são as equações do campo médio da conservação da massa (Eqs. 4.1 e 4.2), da quantidade de movimento (Eq. 4.3), da fração volumétrica (Eq. 4.4) e as equações do modelo de turbulência. Em cada volume da malha, a soma das frações volumétricas das duas fases deve obedecer a restrição imposta pela Eq. 4.5 (Ansys, 2009).

$$\frac{\partial(r_{\alpha}\rho_{\alpha})}{\partial t} + \nabla \cdot (r_{\alpha}\rho_{\alpha}V) = 0, \quad (4.1)$$

$$\frac{\partial(r_{\beta}\rho_{\beta})}{\partial t} + \nabla \cdot (r_{\beta}\rho_{\beta}V) = 0, \quad (4.2)$$

$$\frac{\partial(\rho_m V)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_m VV - \mu_{ef} f(\nabla V + (\nabla V)^T)) = S_M - \nabla p', \quad (4.3)$$

$$\frac{\partial(r_\beta)}{\partial t} + \nabla \cdot (r_\beta V) = 0, \quad (4.4)$$

$$r_\alpha + r_\beta = 1, \quad (4.5)$$

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

$$p' = p + \frac{2}{3} \rho \kappa. \quad (4.6)$$

A massa específica da mistura (ρ_m) e a viscosidade efetiva (μ_{eff}) são definidas, respectivamente, por:

$$\rho_m = r_\alpha \rho_\alpha + r_\beta \rho_\beta, \quad (4.7)$$

$$\mu_{eff} = \mu_m + \mu_t, \quad (4.8)$$

sendo μ_m a viscosidade da mistura, definida como:

$$\mu_m = r_\alpha \mu_\alpha + r_\beta \mu_\beta, \quad (4.9)$$

e μ_t é a viscosidade turbulenta, dada pela Eq. 4.14.

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

$$S_M = (\rho - \rho_{ref})g, \quad (4.10)$$

onde ρ_{ref} é a massa específica de referência, definida como a massa específica do fluido mais leve (ar). Desta forma, este 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 κ - ϵ , composto por duas equações: uma para a energia cinética turbulenta (Eq. 4.11) e outra para a dissipação da energia cinética turbulenta (Eq. 4.12).

$$\frac{\partial(\rho_m \kappa)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_m V \kappa) = \nabla \cdot \left[\left(\mu_m + \frac{\mu_t}{\sigma_\kappa} \right) \nabla \kappa \right] + P_\kappa - \rho \varepsilon, \quad (4.11)$$

$$\frac{\partial(\rho_m \varepsilon)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_m V \varepsilon) = \nabla \cdot \left[\left(\mu_m + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \nabla \varepsilon \right] + \frac{\varepsilon}{\kappa} (C_{1\varepsilon} P_\kappa - C_{2\varepsilon} \rho \varepsilon), \quad (4.12)$$

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

$$P_\kappa = \mu_t \nabla V \cdot (\nabla V + (\nabla V)^T) \quad (4.13)$$

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

$$\mu_t = C_\mu \rho \frac{\kappa^2}{\varepsilon} \quad (4.14)$$

Os valores das constantes do modelo de turbulência são: $C_\mu = 0,09$; $C_{1\varepsilon} = 1,44$; $C_{2\varepsilon} = 1,92$; $\sigma_\kappa = 1,0$; $\sigma_\varepsilon = 1,3$.

4.5 CONDIÇÕES INICIAIS E DE CONTORNO

Foram estudados numericamente casos com vazões volumétricas de 40, 90 e 180 l/s e abertura da comporta de 30, 50 e 70%.

Como condição de contorno de entrada foram aplicados perfis desenvolvidos de velocidades, energia cinética turbulenta e taxa de dissipação, obtidos de uma simulação preliminar do escoamento em um duto longo com seção quadrada igual a seção de entrada da bancada de testes. Como condição de contorno de saída foi utilizada uma expressão linear para prescrever um perfil hidrostático de pressão para cada vazão simulada. Esta expressão foi ajustada com base na média dos valores médios de pressão medidos nas três últimas tomadas de pressão próximas da saída da seção de testes do modelo experimental. Nas paredes foi aplicada a condição de não deslizamento, exceto nas paredes da chaminé, onde foi aplicada a condição de livre deslizamento. Na abertura da chaminé foi aplicado um valor de pressão

estática igual a 0 Pa. No plano de simetria do modelo (plano central) foi aplicada a condição de contorno de simetria.

As simulações foram realizadas em regime permanente. Em todos os casos estudados foi necessário realizar uma simulação preliminar utilizando passo de tempo do tipo “Local Timescale Factor”, com um fator igual a 5. Adicionalmente, foi especificado um fator igual a 0,5 para equação da fração volumétrica. Esta condição foi utilizada para evitar instabilidades na altura da interface água-ar devido ao campo de velocidade nas primeiras iterações ser altamente instável. Na sequência, realizou-se uma segunda simulação, utilizando como condição inicial o resultado desta primeira simulação, porém aplicando intervalo de tempo do tipo “Physical Timestep” com valor de 0,005 s em todo o domínio e para todas as equações. O número de iterações máximo foi especificado em 1000 e o critério de convergência em 10^{-4} .

A condição inicial para a altura do nível da água da simulação preliminar foi especificada a partir da pressão hidrostática registrada no modelo experimental, na tomada de pressão na base do conduto logo a montante da câmara. Utilizou-se uma função do tipo tangente hiperbólica para prescrever a distribuição da fração volumétrica de cada uma das fases em cada caso. Como velocidade inicial foi prescrita na direção X a velocidade média na seção de entrada da bancada. Nas direções Y e Z foram prescritas velocidades nulas. Como condição inicial de pressão foi prescrita uma pressão hidrostática com base no nível da água inicial. As condições iniciais para as equações do modelo de turbulência foram deixadas na opção “Automatic”, sendo determinadas pelo *software*.

5 RESULTADOS

Este capítulo apresenta inicialmente os resultados da validação numérica. Posteriormente, apresentam-se os resultados para os coeficientes hidráulicos, comparando-os com os resultados obtidos na literatura e pelo IPH-UFRGS no modelo experimental. Por fim, analisam-se os campos de pressão, velocidade e tensões de cisalhamento a fim de explorar mais detalhadamente as características do escoamento.

5.1 VALIDAÇÃO NUMÉRICA

Neste item são apresentados resultados para validação numérica do modelo desenvolvido. Os resultados para as pressões na base e no teto do conduto a jusante da comporta, obtidas com o modelo numérico, são comparados com os resultados de pressões médias obtidas com o modelo experimental desenvolvido pelo IPH-UFRGS. As Figs. 5.1-5.3 apresentam a variação de pressão manométrica no teto e na base do conduto a jusante da comporta em função do comprimento do mesmo, para casos com vazão de 90 l/s e abertura da comporta de 30, 50 e 70%, respectivamente. Os resultados numéricos são representados pelas linhas cheias, já os resultados experimentais são representados por símbolos. Nas Figs. 5.4 e 5.5 também são comparados os resultados de pressões médias a jusante da comporta, porém, para casos com abertura da comporta de 50% e vazões de 40 e 180 l/s. Pode-se observar nestas figuras que o modelo numérico reproduz adequadamente o perfil de pressões média do modelo experimental. Apenas em alguns casos se observa que o modelo numérico prevê uma pressão menor do que o modelo experimental na região de recuperação da pressão. A partir destes resultados, considera-se o modelo numérico validado.

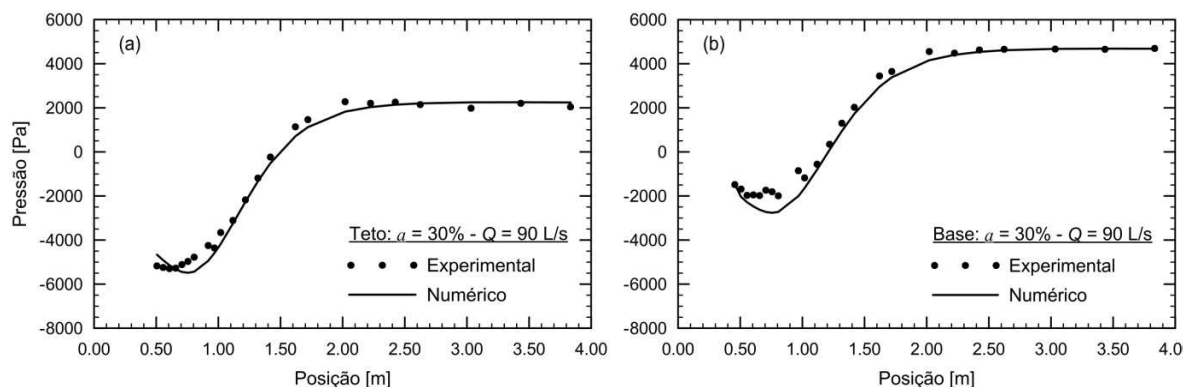


Figura 5.1 – Pressão vs. posição para $a = 30\%$ e $Q = 90$ l/s: (a) teto e (b) base.

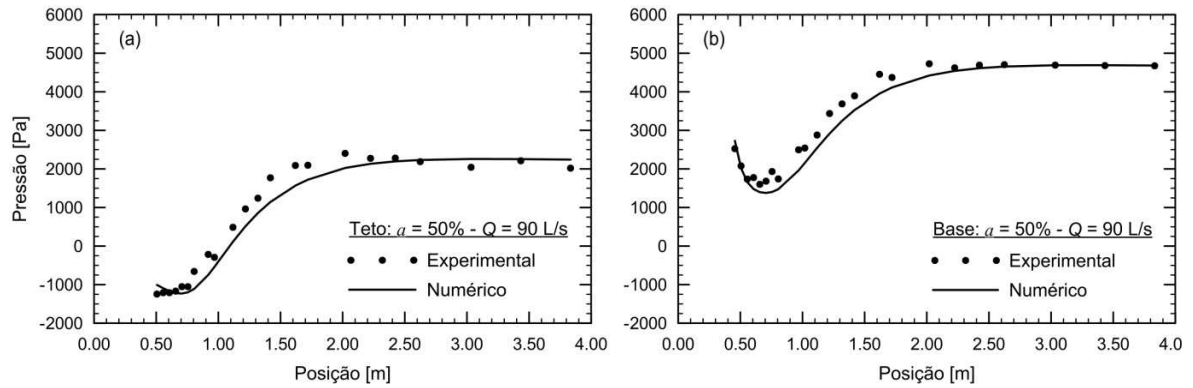


Figura 5.2 – Pressão vs. posição para $a = 50\%$ e $Q = 90$ l/s: (a) teto e (b) base.

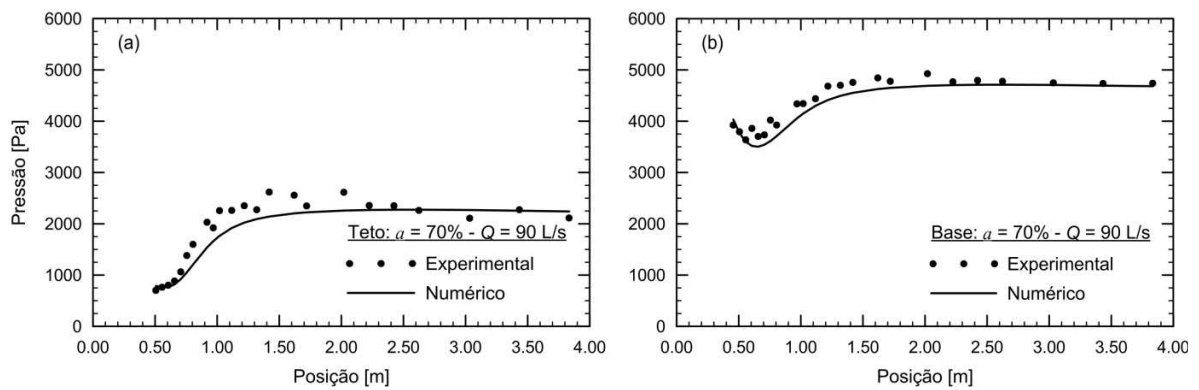


Figura 5.3 – Pressão vs. posição para $a = 70\%$ e $Q = 90$ l/s: (a) teto e (b) base.

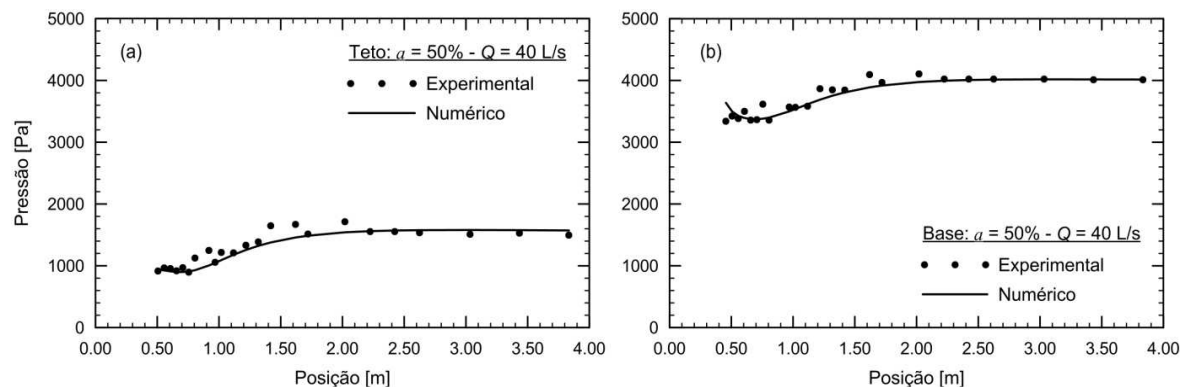


Figura 5.4 - Pressão vs. posição para $a = 50\%$ e $Q = 40$ l/s: (a) teto e (b) base.

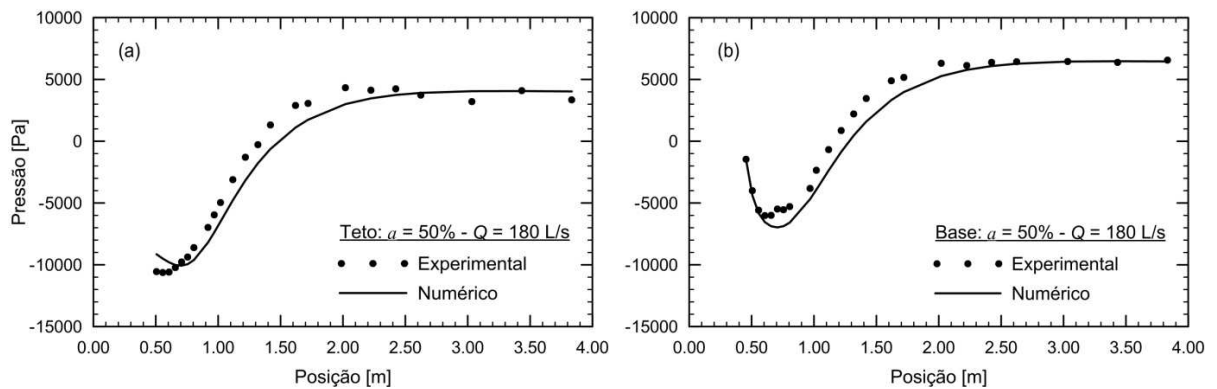


Figura 5.5 - Pressão vs. posição para $a = 50\%$ e $Q = 180$ l/s: (a) teto e (b) base.

5.2 COEFICIENTES HIDRÁULICOS

Para calcular o valor dos coeficientes de descarga e de perda de carga é necessário determinar, em cada caso, o ponto onde ocorre a pressão mínima na base do conduto a jusante da comporta, chamado de ponto de pressão mínima (P_{\min}), e o ponto de pressão máxima que ocorre após a recuperação da pressão, chamado de ponto de pressão de recuperação (P_{rec}). Além disso, para calcular o valor do coeficiente de contração dos resultados numéricos é necessário determinar também a posição da vena contracta a jusante da comporta. Uma maneira de fazer isto consiste em marcar um ponto no plano de simetria próximo da borda da comporta e traçar uma linha de corrente no plano de simetria, passando por este ponto. A posição onde esta linha de corrente atingir a menor altura, a jusante da comporta, determina a posição da vena-contracta. No entanto, em todos os resultados a posição da vena contracta determinada desta forma não coincidiu com o ponto de pressão mínima na base, o qual indicaria o ponto de maior velocidade e conseqüentemente maior contração do jato. A Fig. 5.6 mostra estes pontos e a linha de corrente no plano de simetria.

Na Fig. 5.6(a-c), as marcas na cor verde representam a posição da vena contracta determinada a partir da altura mínima da linha de corrente. As marcas na cor azul representam os pontos de pressões mínimas na base do conduto. Já as marcas na cor vermelha representam os pontos de tensão de cisalhamento máxima, também na base. Como pode ser visto nessa figura, no caso com abertura de 30% a posição da vena contracta praticamente coincide com a posição do ponto de tensão de cisalhamento máxima na base, logo a jusante da borda da comporta, enquanto que a pressão mínima na base ocorre a uma distância quatro vezes maior, aproximadamente. Já nos casos com aberturas de 50 e 70%, a distância entre os pontos de tensão de cisalhamento máxima e de pressão mínima diminui, e a posição da vena contracta fica entre estes.

A Figura 5.7 mostra as distâncias (L) de cada ponto a partir da posição da borda da comporta, adimensionalizadas em função da altura da abertura da comporta (b). Observa-se nesta figura que a distância onde a pressão mínima ocorre aumenta de modo mais acentuado à medida que a abertura da comporta diminui, enquanto que a distância onde ocorre a tensão de cisalhamento máxima apresenta um aumento mais suave. Já a distância onde ocorre a vena contracta apresenta um comportamento distinto. Para abertura de 50 e 70% esta distância aumenta com a diminuição da abertura, mas para abertura de 30% ela diminui, não seguindo o comportamento das distâncias da pressão mínima e da tensão de cisalhamento máxima.

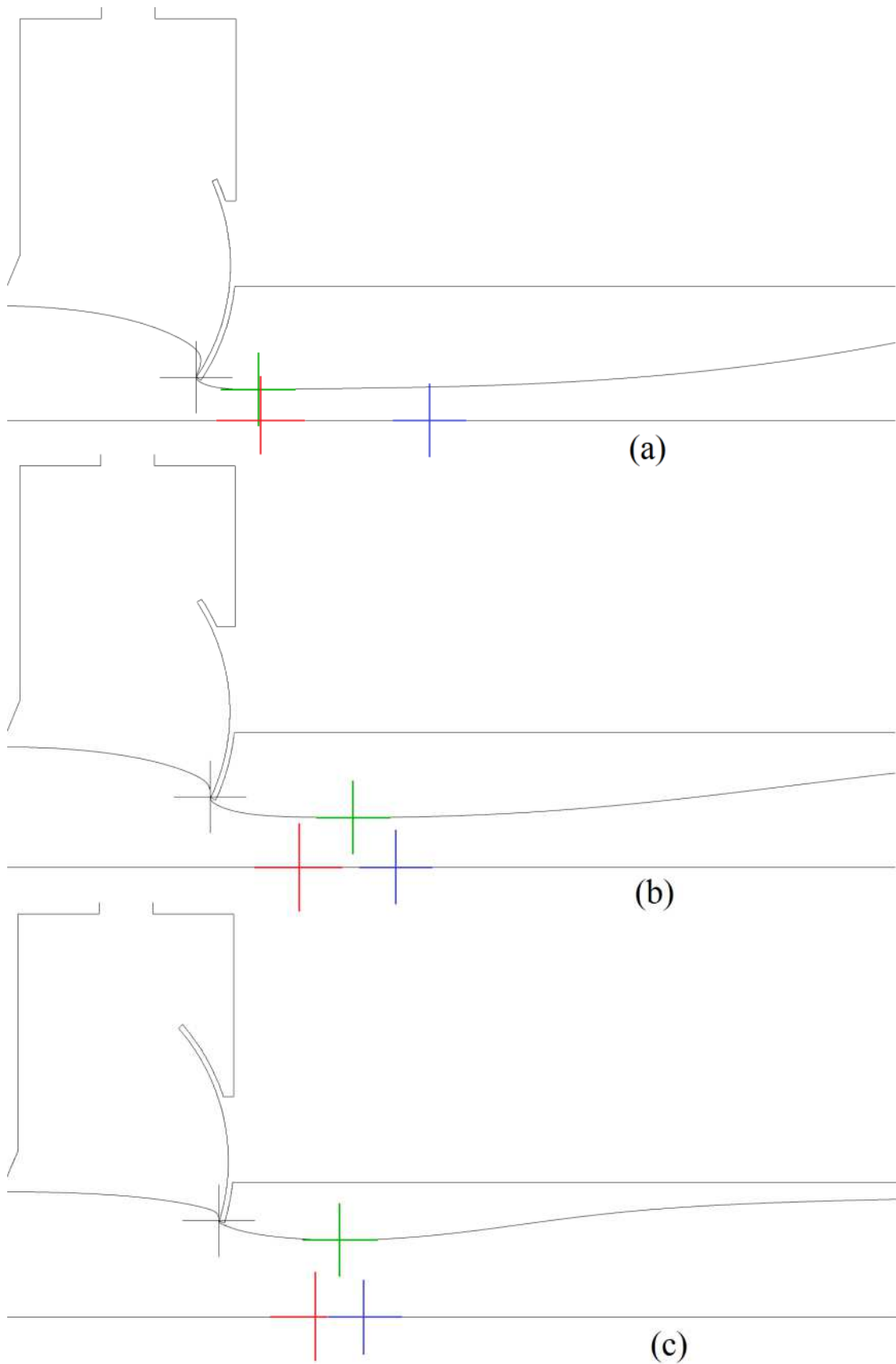


Figura 5.6 – Pontos para $Q = 90$ l/s: (a) $a = 30\%$; (b) $a = 50\%$ e (c) $a = 70\%$.

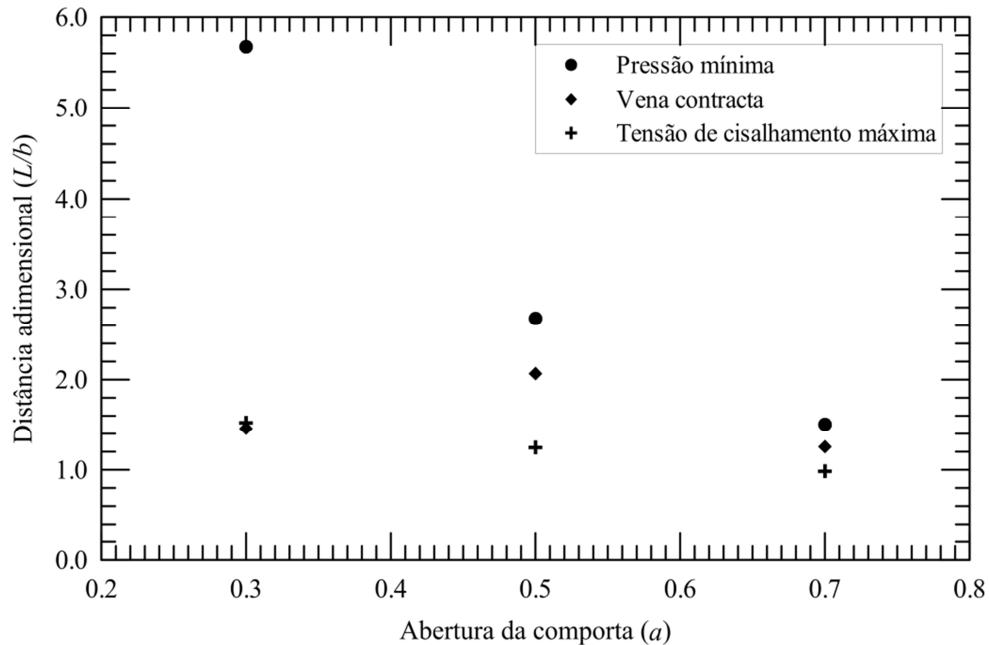


Figura 5.7 – Distâncias adimensionais *vs.* a .

O valor do coeficiente de contração dos resultados numéricos foi determinado de duas formas. Na primeira, chamada de Método 1, fez-se um balanço de energia entre a entrada da câmara e o ponto onde ocorre a pressão mínima na base a jusante da comporta, utilizando a equação de Bernoulli, sem considerar as perdas de energia. Na seção de entrada foi considerada a velocidade média da seção e a pressão junto à base. Na seção da vena contracta foi considerada a pressão mínima na base e a velocidade foi obtida da equação da conservação da massa, onde foi introduzido o coeficiente de contração. Esta metodologia foi utilizada pelo IPH-URFGS para determinar o coeficiente de contração dos resultados experimentais (Battiston, 2009), por isto também foi utilizada nos resultados numéricos para fins de comparação. A outra forma de obter o coeficiente de contração dos resultados numéricos, chamada de Método 2, foi por meio da altura mínima de uma linha de corrente a jusante da comporta, como descrito anteriormente. Ambos os resultados são mostrados na Fig. 5.8, juntamente com os resultados experimentais. Observa-se que os resultados numéricos obtidos por meio do Método 1 aproximam-se bastante dos resultados experimentais. Já os resultados obtidos por meio do Método 2 mostraram valores mais altos. Nesta figura também são mostrados resultados numéricos obtidos por Hammack e Stockstill (2009b, 2011). Estes trabalhos analisam o escoamento em uma comporta segmento invertida da eclusa John Day. Observa-se que estes resultados aproximam-se dos resultados experimentais, exceto os resultados de Hammack e Stockstill (2009b) para casos com aberturas menores que 40%.

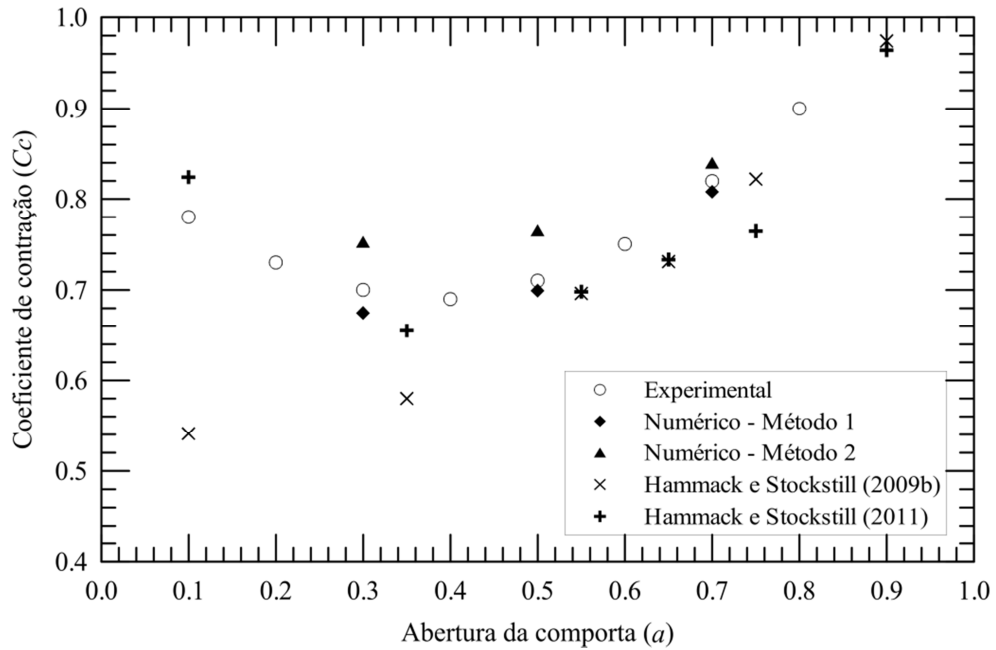


Figura 5.8 – C_c vs. a .

Na Figura 5.9 são mostrados os resultados numéricos para o coeficiente de descarga em função do percentual de abertura da comporta, juntamente com resultados obtidos da literatura. Observa-se que os resultados numéricos ficam dentro da variação existente na literatura.

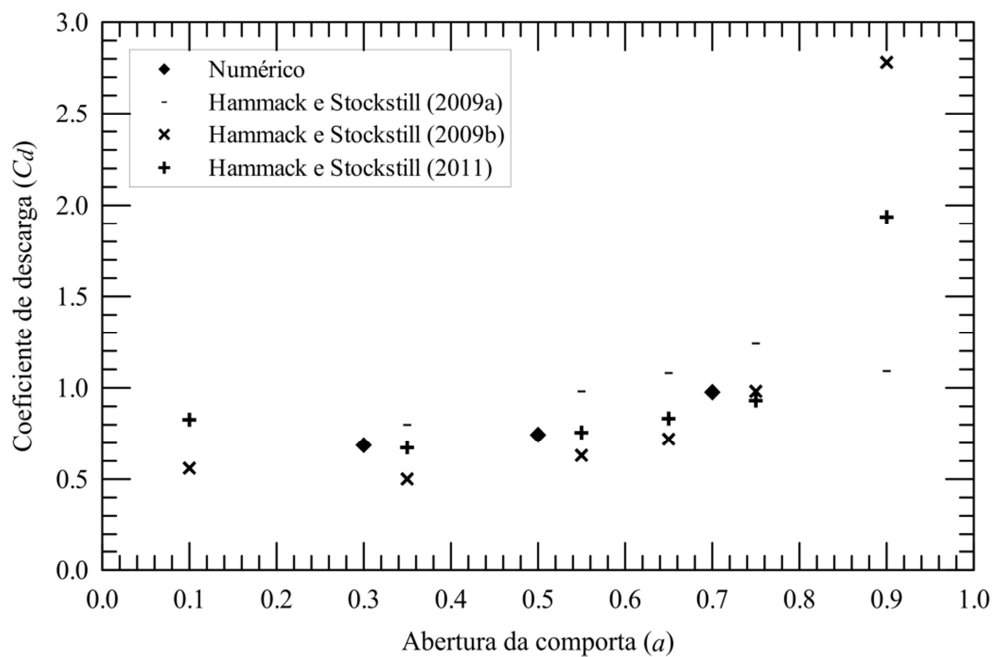


Figura 5.9 – C_d vs. a .

Na Figura 5.10 são mostrados os resultados numéricos e experimentais do coeficiente de perda de carga em função do percentual de abertura da comporta, juntamente com a curva

de projeto sugerida por USACE (1975). Pode-se observar que os resultados numéricos e experimentais apresentam boa concordância entre si e também com a curva de projeto. Nesta figura também são mostrados resultados numéricos do coeficiente de perda de carga obtidos por Hammack e Stockstill (2009a; 2011) para escoamento em uma comporta segmento invertida da eclusa John Day, os quais mostraram valores acima dos previstos pela curva de projeto.

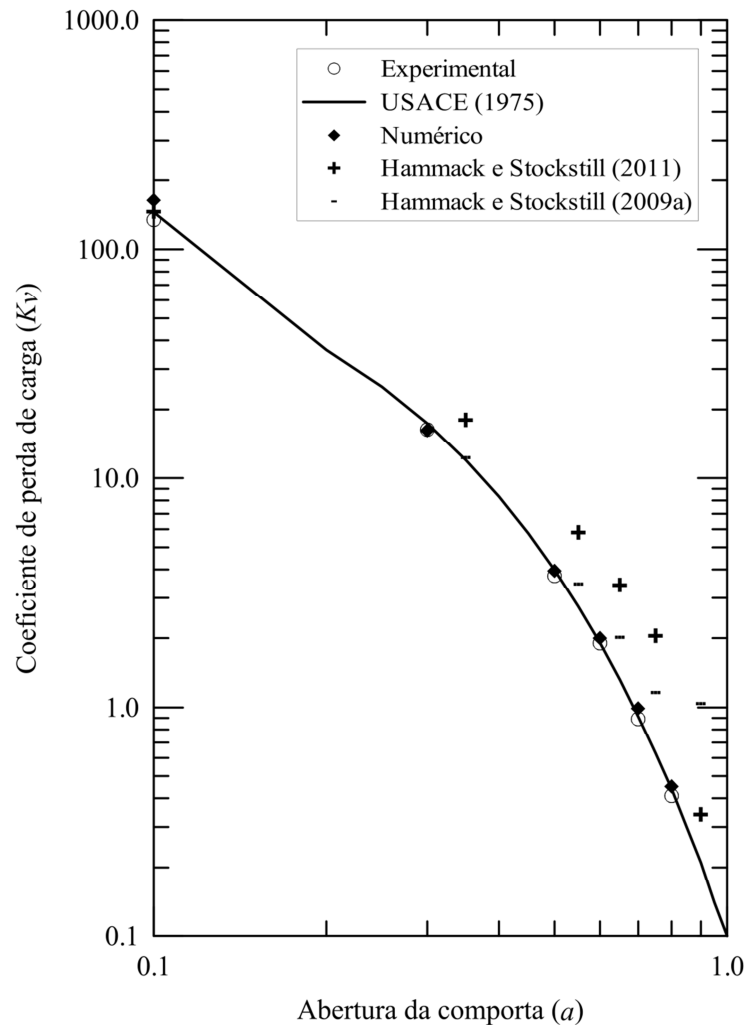


Figura 5.10 – K_v vs. a .

5.3 CAMPOS DE PRESSÃO, VELOCIDADE E TENSÕES DE CISALHAMENTO

Na Figura 5.11 é mostrado o campo de pressão no plano de simetria do modelo para casos com vazão de 90 l/s e aberturas de 30, 50 e 70%. Observa-se nestas figuras a variação hidrostática da pressão na câmara e no conduto a jusante da comporta após a recuperação da pressão. Também se observa a região de estagnação do escoamento próximo da borda inferior

da comporta, a qual aumenta com a diminuição da abertura. Observa-se ainda a diminuição da pressão abaixo e a jusante da comporta e que a variação de pressão na direção do comprimento torna-se mais acentuada à medida que a abertura diminui.

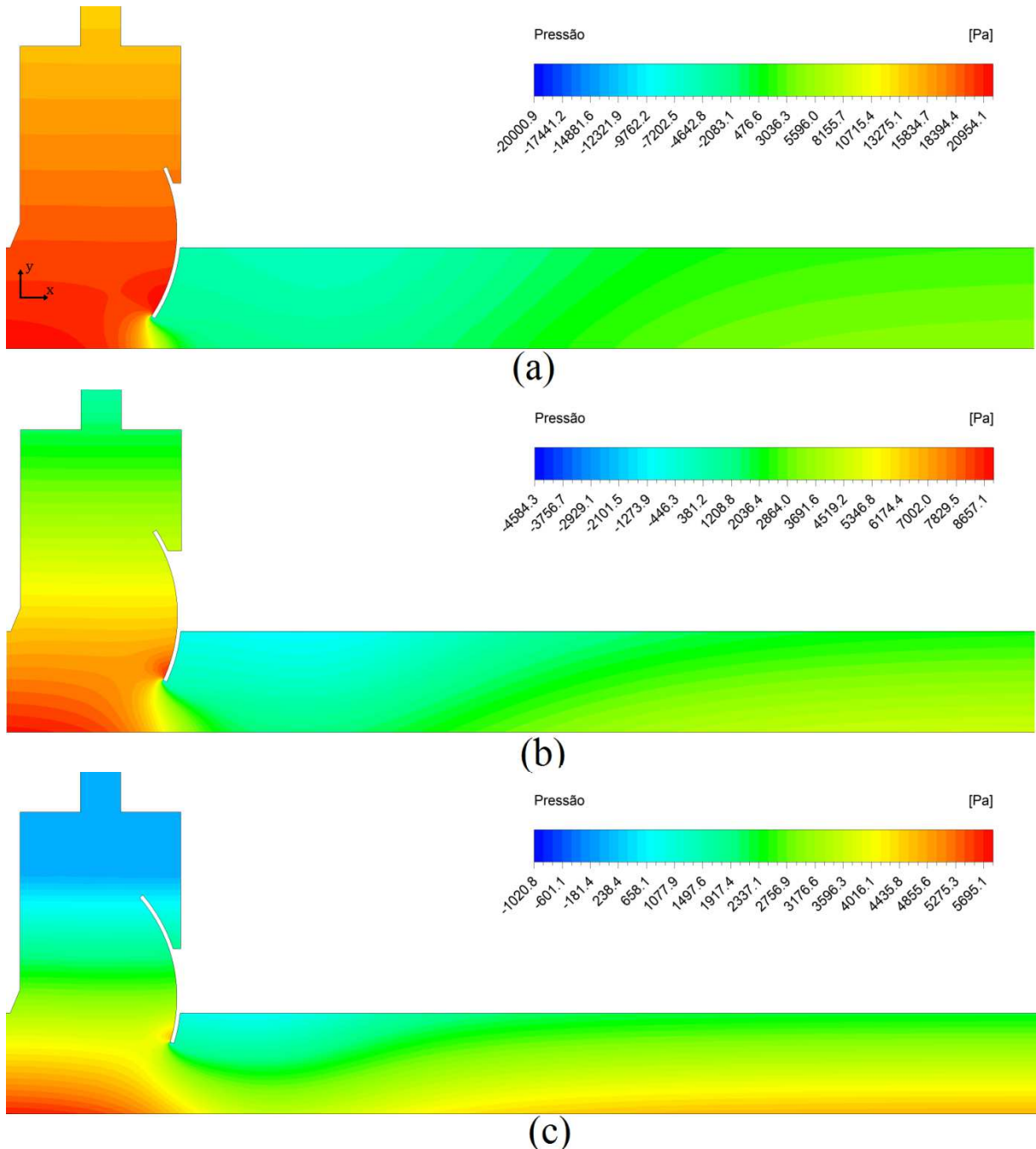


Figura 5.11 – Campo de pressão no plano de simetria para $Q = 90$ l/s: (a) $a = 30\%$, (b) $a = 50\%$, (c) $a = 70\%$.

Nas Figuras 5.12-14(a,b) são mostrados detalhes do campo de pressão na borda da comporta no plano de simetria e na parede para diversas vazões volumétricas e aberturas. Observa-se, nestes casos, que a pressão mínima no modelo ocorre sob a borda da comporta e

que a pressão no centro do conduto é menor do que a pressão junto à parede. Além disso, se observa que a pressão máxima sobre a comporta ocorre próximo da borda no centro do conduto, enquanto que junto à parede ela ocorre mais acima.

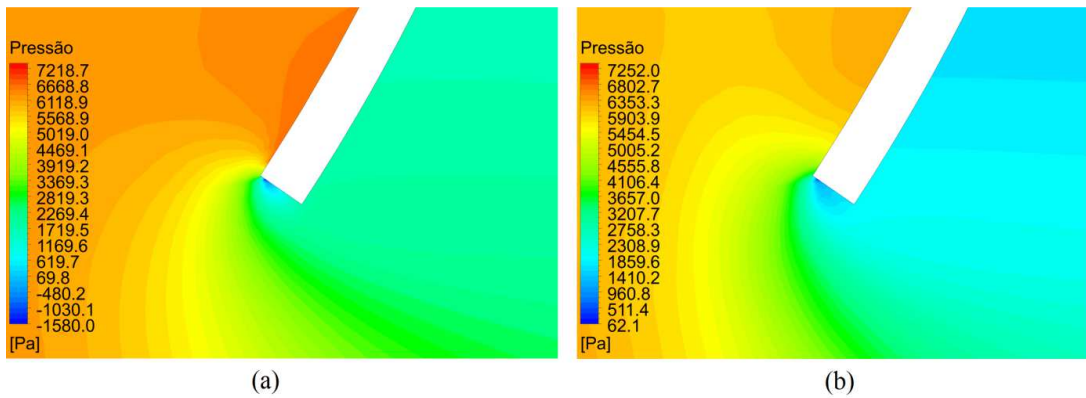


Figura 5.12 – Detalhe do campo de pressão na região da borda inferior da comporta para $a = 30\%$ e $Q = 40$ l/s: (a) plano de simetria e (b) parede.

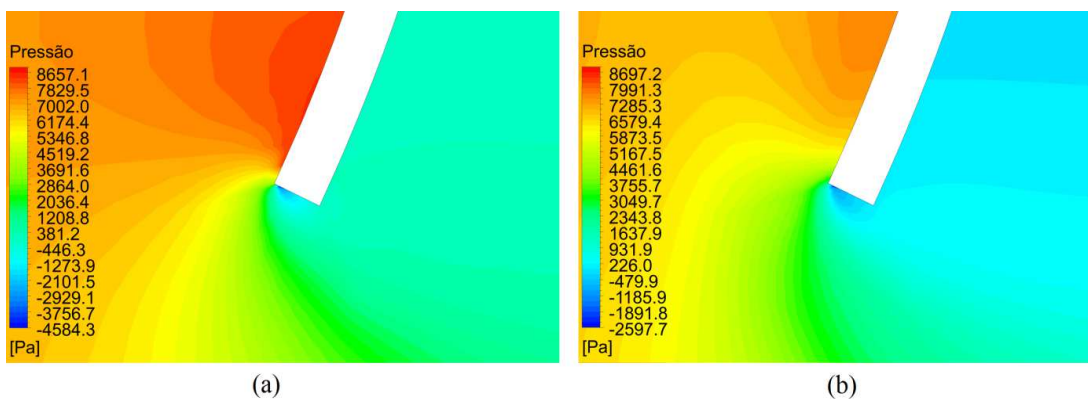


Figura 5.13 – Detalhe do campo de pressão na região da borda inferior da comporta para $a = 50\%$ e $Q = 90$ l/s: (a) plano de simetria e (b) parede.

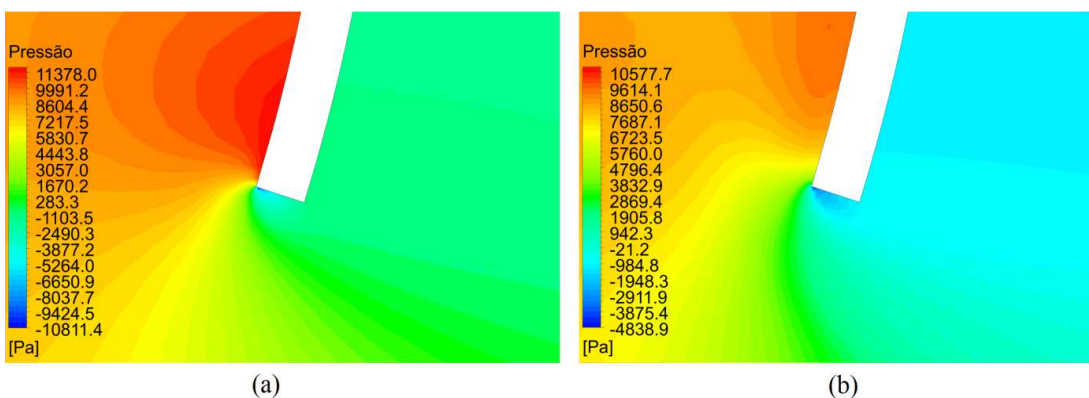


Figura 5.14 – Detalhe do campo de pressão na região da borda inferior da comporta para $a = 70\%$ e $Q = 180$ l/s: (a) plano de simetria e (b) parede.

Na Figura 5.15(a-c) é mostrado o campo de velocidade no plano de simetria do modelo para casos com vazão de 90 l/s a aberturas da comporta de 30, 50 e 70%,

respectivamente. Observa-se nesta figura que nos casos com aberturas de 30 e 50% as velocidades máximas do jato a jusante da comporta concentram-se na parte inferior do jato, junto a base, enquanto que no caso com abertura de 70% as velocidades máximas ocorrem na parte superior do jato.

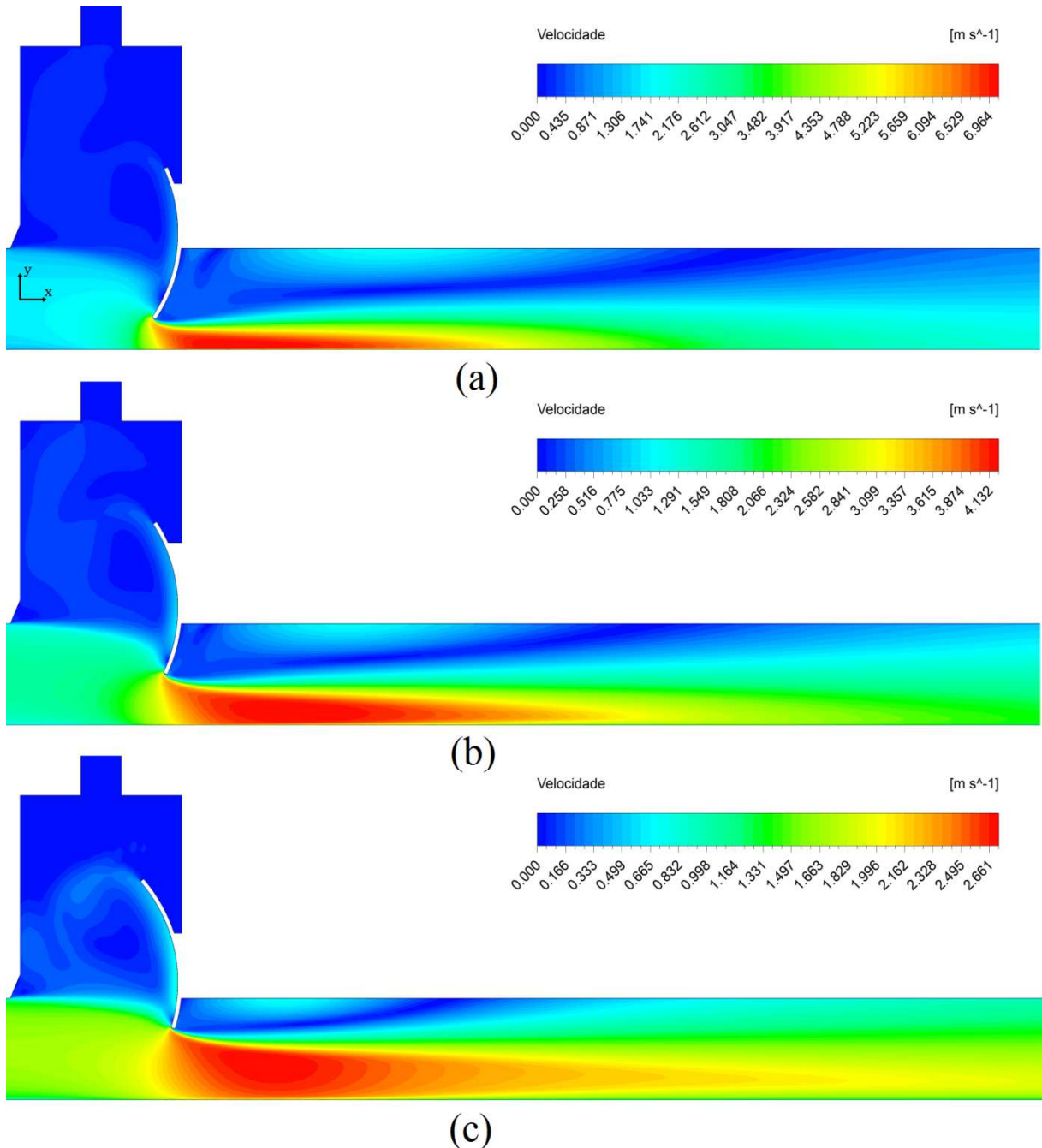


Figura 5.15 – Campo de velocidade no plano de simetria para $Q = 90 \text{ l/s}$: (a) $a = 30\%$, (b) $a = 50\%$, (c) $a = 70\%$.

Na Figura 5.16(a-c) são mostradas as linhas de corrente no plano de simetria do modelo para casos com vazão de 90 l/s e aberturas da comporta de 30, 50 e 70%,

respectivamente. Pode-se observar nesta figura a recirculação do escoamento que ocorre na câmara, em frente à comporta, e a recirculação a jusante desta, sobre o jato. Observa-se ainda que o comprimento da recirculação a jusante da comporta diminui com o aumento do percentual de abertura.

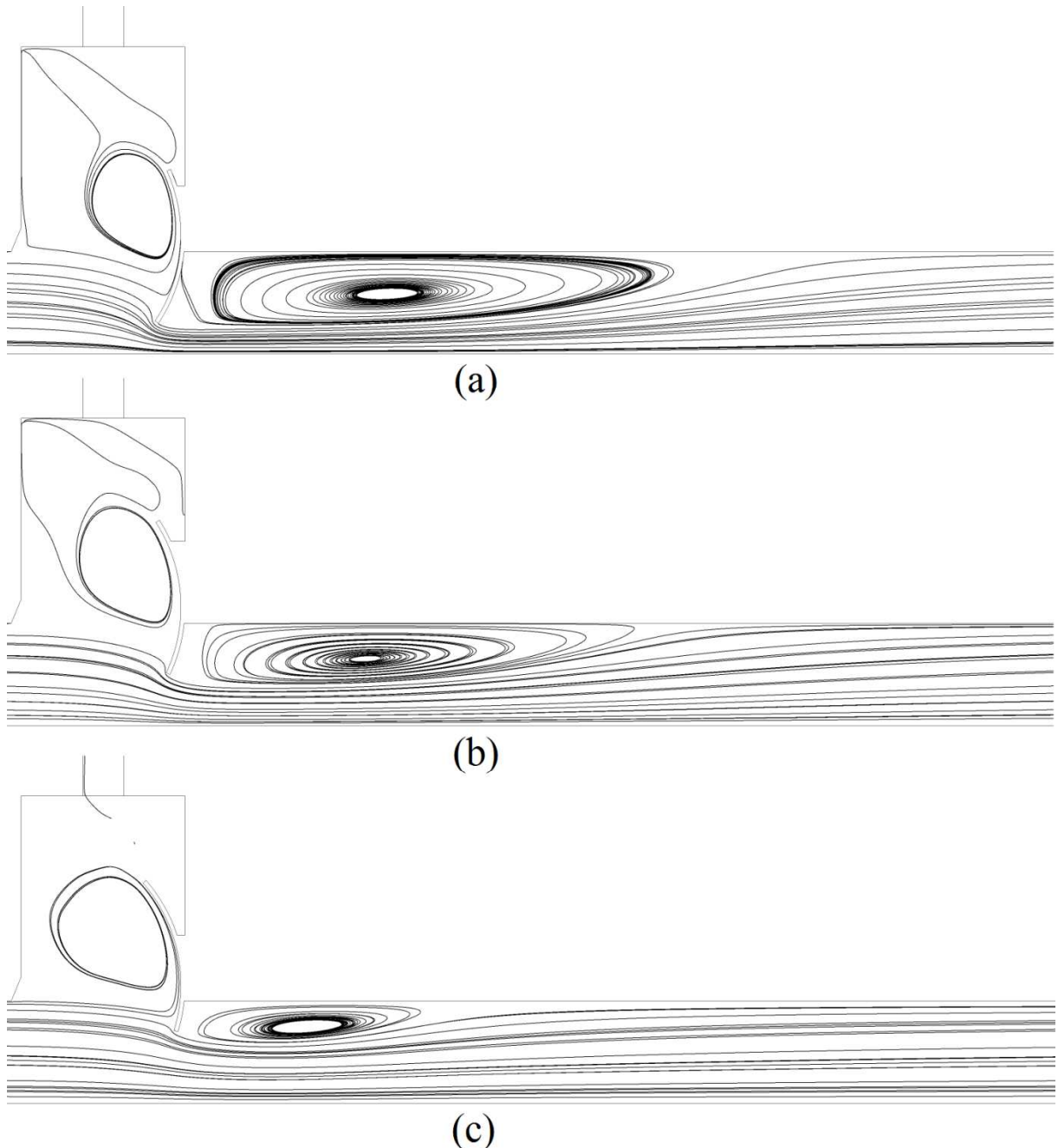


Figura 5.16 – Linhas de corrente no plano de simetria: (a) $a = 30\%$, (b) $a = 50\%$, (c) $a = 70\%$.

A Figura 5.17(a-c) mostra a tensão de cisalhamento na direção X (τ_{xy}) na base do modelo, para casos com vazão de 90 l/s e aberturas da comporta de 30, 50 e 70%, respectivamente. Deve-se lembrar que estas figuras mostram apenas metade da base do

conduto, já que o modelo utiliza a condição de simetria. As linhas verticais pretas que aparecem nas imagens representam a borda da comporta, enquanto que as linhas na cor cinza marcam o início do teto do conduto a jusante da comporta.

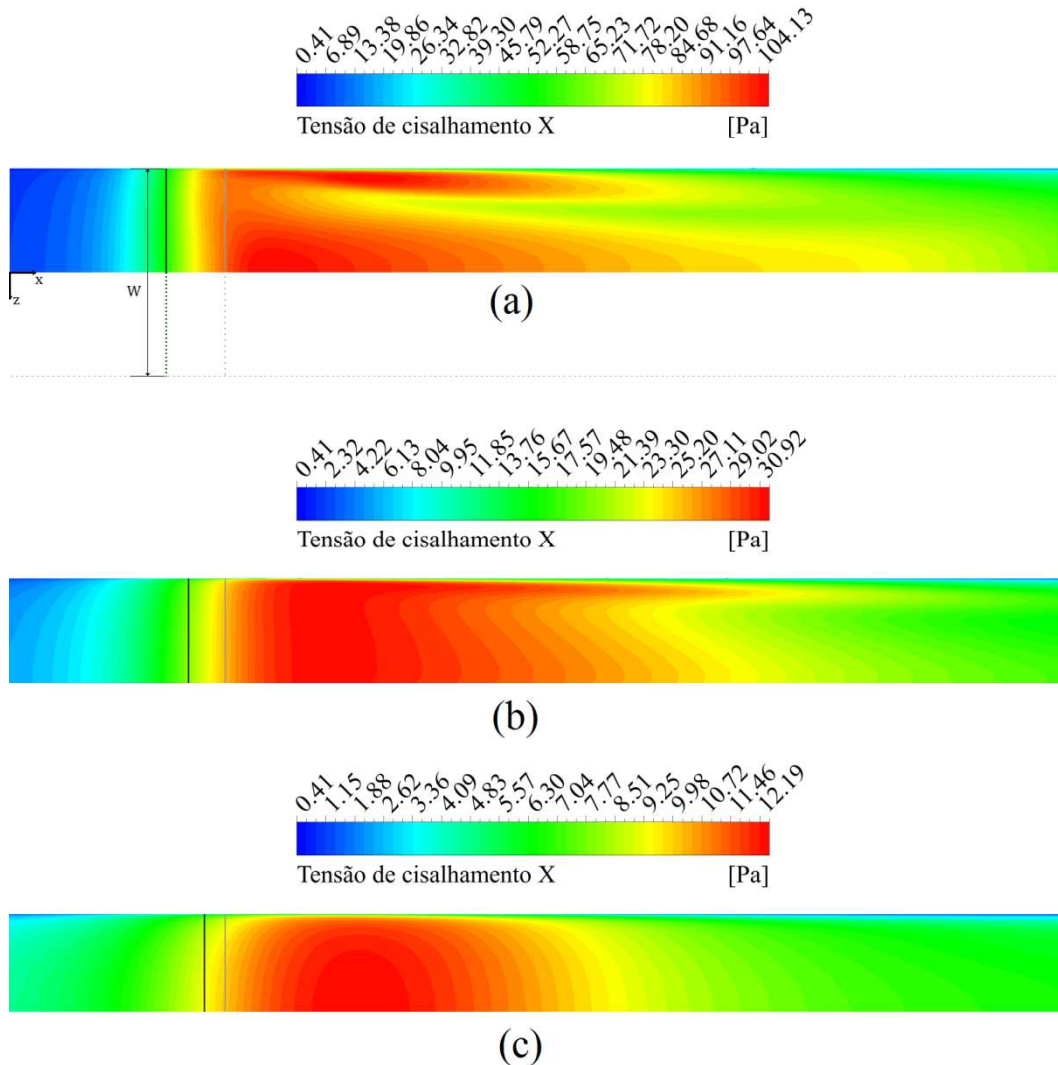


Figura 5.17 – Tensão de cisalhamento X na base para $Q = 90$ l/s: (a) $a = 30\%$, (b) $a = 50\%$, (c) $a = 70\%$.

Em todos os casos se observa que a região de maior tensão de cisalhamento começa logo à jusante da borda da comporta, e se estende por uma distancia de aproximadamente $2B$. No entanto, analisando os casos com aberturas de 30 e 50% nota-se um comportamento bastante distinto próximo da parede. Enquanto que no caso com abertura de 70% a região de maior tensão de cisalhamento ocorre na região central da base do conduto e possui um formato definido e aproximadamente uniforme na direção transversal (largura), o caso com abertura de 50% apresenta uma região de altas tensões de cisalhamento próximo da parede, a qual se estende por um comprimento maior do que a região central. No caso com abertura de

30% também se verifica esta região de elevadas tensões cisalhantes na base do conduto próximo da parede. Porém, nota-se claramente uma região de tensões mais baixas separando esta região da região de elevadas tensões que ocorre no centro da base.

Na Figura 5.18(a-c) são mostrados campos de tensão de cisalhamento na direção Z (τ_{xz}) para casos com vazão de 90 l/s e aberturas da comporta de 30, 50 e 70%. Observa-se nesta figura a presença de uma região de tensões cisalhantes Z positivas próximas da parede e, entre esta região e a parede, uma pequena região com tensões negativas. Observa-se ainda que, quanto menor a abertura da comporta menor o tamanho da região onde ocorrem essas tensões. Observa-se também que a intensidade destas tensões diminui rapidamente com o aumento da abertura da comporta.

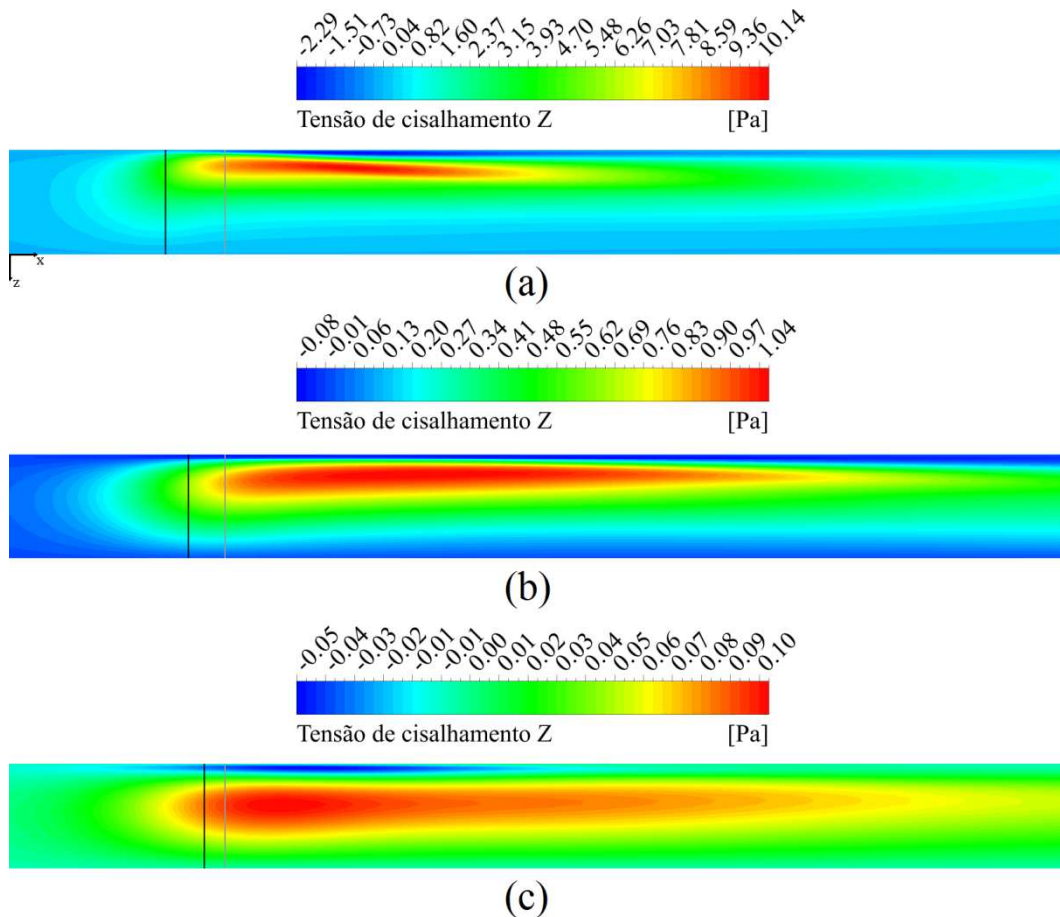


Figura 5.18 – Tensão de cisalhamento Z na base para $Q = 90$ l/s: (a) $a = 30\%$, (b) $a = 50\%$, (c) $a = 70\%$.

Este comportamento das tensões de cisalhamento na base do conduto demonstra a existência de padrões tridimensionais no escoamento, os quais somente podem ser capturados por um modelo numérico tridimensional com uma resolução de malha espacial adequada nessa região.

Na Figura 5.19 são mostrados os vetores de velocidade em uma seção do conduto a jusante da comporta para o caso com vazão de 90 l/s e aberturas de 30, 50 e 70%. Esta seção localiza-se na posição onde ocorre a vena contracta e os vetores mostrados são as componentes tangenciais a seção dos vetores de velocidade. Além disso, nesta figura os resultados foram espelhados para formar a imagem da seção completa do conduto.

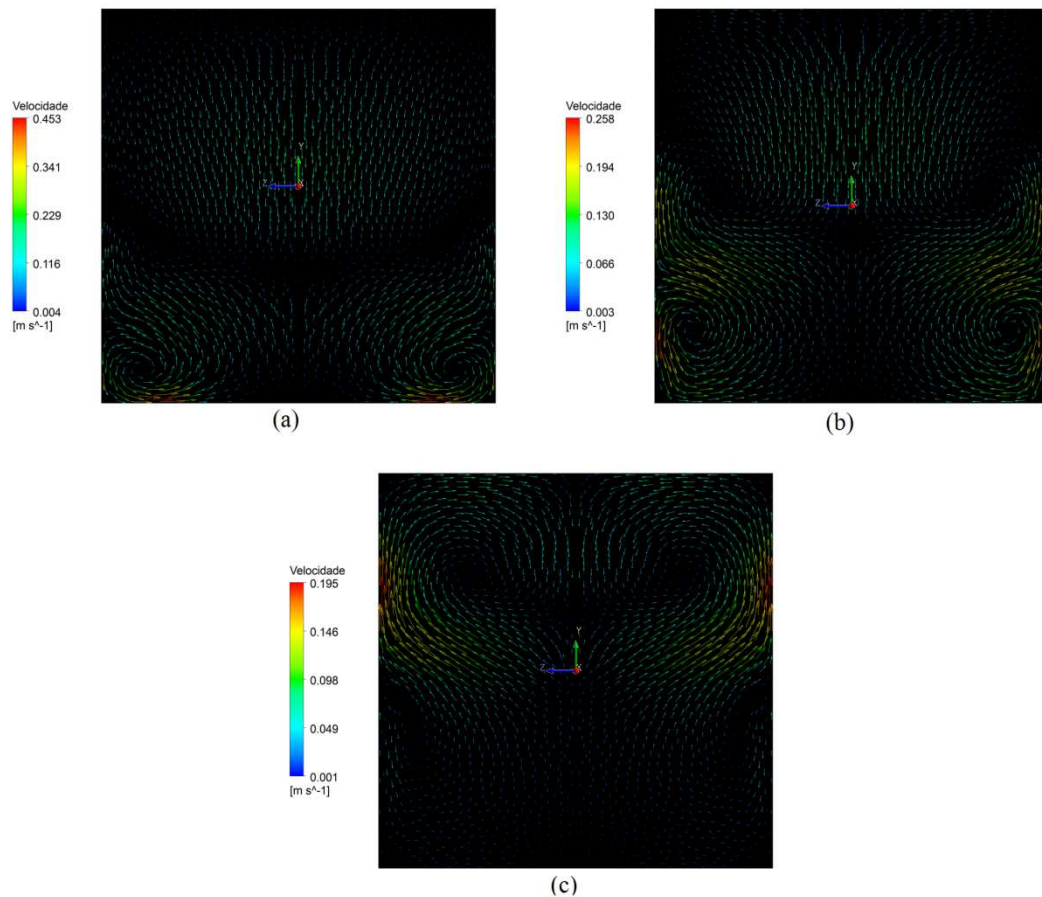


Figura 5.19 – Vetores de velocidade na seção do conduto a jusante da comporta para $Q = 90$ l/s: (a) $a = 30\%$; (b) $a = 50\%$; (c) $a = 70\%$.

Pode-se observar nesta figura, no caso com percentual de abertura da comporta de 30%, a presença de dois vórtices maiores próximos das paredes e da base. Já no caso com percentual de abertura de 50% se observa que estes vórtices são maiores em tamanhos, mas a velocidade máxima é significativamente menor. Observa-se ainda nestas figuras que no caso com abertura de 30% as máximas velocidades ocorrem próximo da base do conduto enquanto que no caso com abertura de 50% ocorrem próximos das paredes laterais. Já no caso com percentual de abertura de 70% estes vórtices quase desaparecem. No entanto, na metade superior da seção do conduto aparecem dois vórtices de tamanho maiores do que os observados no caso com abertura de 50%, porém com rotação em sentido contrário. Além

disso, percebe-se uma redução na velocidade máxima nestes vórtices em comparação com os do caso com abertura de 50%. Pode-se dizer que o perfil de tensões de cisalhamento observado na base do conduto nas figuras anteriores pode estar relacionado com a presença deste padrão de escoamento neste local. No entanto, uma análise mais aprofundada deve ser conduzida para verificar esta questão.

Na Figura 5.20(a-c) são mostrados campos de tensão de cisalhamento total na parede do conduto, para casos com vazão de 90 l/s e abertura de 30, 50 e 70%.

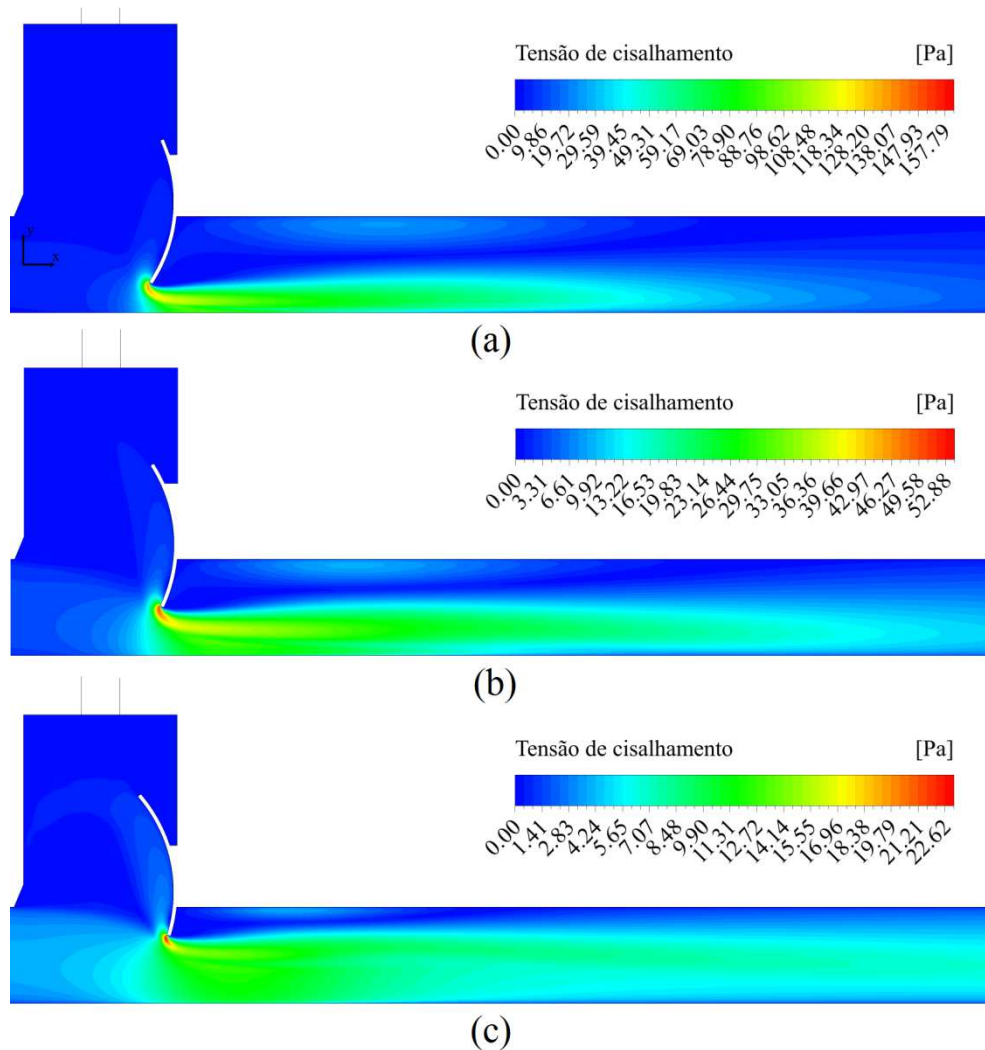


Figura 5.20 – Tensão de cisalhamento na parede para $Q = 90$ l/s: (a) $a = 30\%$, (b) $a = 50\%$, (c) $a = 70\%$.

Observa-se nesta figura que a região logo abaixo da borda da comporta concentra as maiores tensões de cisalhamento. A região do jato a jusante da comporta apresenta tensões cisalhantes menores, aproximadamente metade da tensão máxima, e ocupa aproximadamente a mesma região de altas velocidades mostrada na Fig. 5.15.

6 CONCLUSÕES

Este trabalho teve como objetivo estudar o escoamento a jusante de uma comporta segmento invertida, utilizada no controle do enchimento e esgotamento de eclusas de navegação. Para isto, utilizou-se o *software* comercial Ansys CFX para modelar e simular numericamente o campo médio do escoamento. O modelo numérico é tridimensional, composto pelas equações da conservação da massa, quantidade de movimento e modelo de turbulência κ - ϵ . O domínio computacional tem a mesma geometria utilizada em um modelo experimental existente no IPH-UFRGS. Foram estudados casos em regime permanente para aberturas da comporta de 30, 50 e 70% e vazões volumétricas de 40, 90 e 180 l/s.

Os resultados numéricos de pressões médias no teto e na base do conduto, a jusante da comporta, obtidos com o modelo numérico foram comparados com resultados de pressões médias obtidas no modelo experimental pelo IPH-UFRGS. Os perfis de pressão obtidos com o modelo numérico apresentam boa concordância com os perfis obtidos no modelo experimental, considerando-se assim o modelo numérico validado. Os coeficientes de contração, descarga e de perda de carga foram calculados e comparados com os valores obtidos no modelo experimental e com dados disponíveis na literatura. O coeficiente de contração calculado pelo Método 1 apresentou boa concordância com os valores experimentais, enquanto os resultados numéricos calculados pelo Método 2 apresentaram valores maiores. Os resultados para o coeficiente de descarga apresentaram boa concordância com os resultados encontrados na literatura. O coeficiente de perda de carga dos resultados numéricos apresentou boa concordância com os valores experimentais e com os valores de projeto sugeridos por USACE (1975).

A análise do campo de pressões no plano de simetria e na parede do conduto mostrou que as pressões mínimas ocorrem sob a borda da comporta. Além disso, nesta região as pressões no centro do conduto são menores do que as pressões junto à parede. A análise das linhas de corrente no plano de simetria mostraram as regiões de recirculação do escoamento na câmara e a jusante da comporta. O comprimento da recirculação a jusante da comporta diminui com o aumento da abertura da comporta.

A análise do campo de tensões de cisalhamento na base mostrou características que podem estar relacionadas com padrões tridimensionais de escoamento nesta região. Constatou-se que existe uma rotação do escoamento na região do jato próximo à base e às

paredes que pode ser a causa deste comportamento no campo de tensões. Porém, estudos mais aprofundados são necessários para esclarecer esta questão.

Para trabalhos futuros poderiam ser sugerido estudos de casos aberturas da comporta menores que 30% e maiores que 70%. Além disso, poder-se-ia estudar casos com geometrias da borda da comporta baseadas em protótipos, já que este detalhe geométrico mostrou bastante influência nas pressões mínimas do escoamento. Além disso, pode-se sugerir estudos sobre os efeitos dos braços de sustentação e outros detalhes geométricos sobre o escoamento sob a comporta.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Agência Nacional de Águas (ANA). 2004. **Cadernos de recursos hídricos: a navegação interior e sua interface com o setor de recursos hídricos.**

Agência Nacional de Águas (ANA). 2012. **Diretrizes para estudos de arranjos de obras de transposição de desnível para a navegação.**

ANSYS CFX, Release 11.0 (2009). "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.

De Mulder, T. 2011. **Computational Fluid Dynamics (CFD) in lock design: Progress and challenges.** 2nd International Workshop, PIANC, New Orleans, 2011. "What's new in the design of navigation locks" paper 3-1, p 1-9.

De Mulder, T. **Mooring forces and ship behavior in navigation locks.** International Workshop, PIANC. "Innovations in Navigation Lock Desing" Brussels, 2009. p. 1-3.

ELETRONORTE, Eclusa 1 de Tucuruí, Imagens da Obra, Disponível em: <HTTP://www.eln.gov.br>, 2010.

Hammack, E. A. and Stockstill, R. L. 2009a . **3D Numerical Modeling of John Day Lock Tainter Valves.** World Environmental and Water Resources Congress 2009. Kansas City, 2009. "Great rivers: protecting the quality of life and bio-diversity, while supporting development and growth critically important for a sustainable future", pg 2727–2736. ASCE.

Hammack, E. A. and Stockstill, R. L. 2009b **Evaluation of a lock culvert valve using a computational flow model.** 33rd IAHR Congress: Water engineering for a sustainable environment. 2009. Vancouver, 2009.

Hammack, E. A. and Stockstill, R. L. 2011. **Computational flow model of a reverse tainter valve.** ERDC/CHL CHETN-IX-27. U.S. Army Engineer Research and Development Center, Vicksburg, MS. <http://chl.erd.usace.army.mil/chetn>

Headquarters, US Army Corps of Engineers (USACE). 2006. **Hydraulic design of navigation locks.** Engineer Manual No. 1110-2-1604, Washington, D.C. Disponível em: <<http://www.usace.army.mil/publications/eng-manuals/em1110-2-1604/entire.pdf>>

Headquarters, US Army Corps of Engineers (USACE). 1975. **Hydraulic design of lock culvert valves.** Engineer Manual No. 1110-2-1610, Washington, D.C. Disponível em: <<http://www.usace.army.mil/publications/eng-manuals/em1110-2-1610/entire.pdf>>

KEMPKA, Mariane. **Determinação das pressões a jusante de comportas tipo segmento invertida: aplicação em eclusas de navegação.** 2011. 95 f. Trabalho de conclusão de curso (Bacharel em Engenharia Civil) – Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, Porto Alegre, RS, 2011.

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

Menéndez, A. N.; Badano, N. D.; Lecertúa, E. A.; Gerbec, M. S.; Re, F.; Re, M.. **Cfd for hydraulic design of the panama canal third set of locks.** IX congresso argentino de mecánica computacional – MECOM 2010 & II Congreso sudamericano de mecânica computacional, Buenos Aires, 2010.

PIANC 2011. EnviCom Taks group 2: **Towards a sustainable waterborne transportation industry.**

Santos, J. B. V. **Influência nas características do escoamento em função da alteração da geometria do conduto a jusante de válvula tipo segmento invertida em sistema de enchimento e esvaziamento de eclusas de navegação.** 2012. 62 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. Universidade do Vale do Rio dos Sinos – UNISINOS. 2012.

Scheffermann, J. M.; Stockstill, R. L. 2009. **Pressures and discharges during operation of a lock valve, physical and numerical model results,** *Journal of Hydraulic Research*, 47:1, 137-141

Stockstill, R. L. 2009. **Computational model of a lock filling system.** Coastal and Hydraulics Engineering Technical Note ERDC/CHL CHETN-IX-18. Vicksburg, MS: U.S. Army Engineer Research and Development Center. <http://chl.erdc.usace.army.mil/chetn>

Stockstill, R. L.; Berger R. C. 2009. **Three-dimensional numerical model for flow in a lock filling system.** World Environmental and Water Resources Congress 2009. Kansas City, 2009. “Great rivers: protecting the quality of life and bio-diversity, while supporting development and growth critically important for a sustainable future”, pg 2727–2736. ASCE.

Stockstill, R. L., Hammack, E. A., Hite, J. E. Jr.. 2011. **Lock Culvert Valves; Hydraulic Design Considerations.** ERDC/CHL TR-11-4. Coastal and Hydraulics Laboratory, U.S. Army Engineer Research and Development Center, Vicksburg, MS.

Stockstill, R. L.; Hammack, E. A. 2013. **Computational model of a lock manifold port.** ERDC/CHL CHETN-IX-31. U.S. Army Engineer Research and Development Center, Vicksburg, MS. <http://chl.erdc.usace.army.mil/chetn>.