

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

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

JESSÉ BAPTISTA VERONESE DOS SANTOS

Dissertação de Mestrado

São Leopoldo, dezembro de 2012

S237i

Santos, Jessé Baptista Veronese dos.

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 / Jessé Baptista Veronese dos Santos. – 2012.

62 f. : il. ; 30 cm.

Dissertação (mestrado) – Universidade do Vale do Rio dos Sinos, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, 2012.

"Orientador: Profa Dra Rejane de César Oliveski."

1. Simulação numérica. 2. CFD. 3. Eclusas. 4. Mecânica dos fluidos. 5. Válvulas tipo segmento invertido. I. Título.

CDU 62

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
(Bibliotecário: Flávio Nunes – CRB 10/1298)

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

Jessé Baptista Veronese dos Santos

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

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

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Conrad Yuan Yuen Lee - Universidade do Vale do Rio dos Sinos

Prof. Dr. João Batista Dias - Universidade do Vale do Rio dos Sinos

Prof. Dr. Marcelo Giulian Marques - Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Universidade do Vale do Rio dos Sinos - UNISINOS

Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq

*Dedico este trabalho à todos que me apoiaram e
incentivaram em todos os momentos,
aos que ao longo desta etapa compartilharam muitas experiências,
acadêmicas e de vida,
Entre estas, minha esposa Fernanda, e com ela nossa filha (à caminho) Isabelle,
minha incansável mãe, Vilma,
meus grandes amigos, Salin, Jussara e Juliana,*

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos professores que me oportunizaram esta grande oportunidade acadêmica, aos quais me servem como referência de dedicação e seriedade.

Sou muito grato, também, à minha orientadora, profa. Dra. Rejane De Césaró Oliveski, que sempre disposta, contribuiu com sua sabedoria e dedicação para realização deste trabalho.

Agradeço à minha esposa Fernanda pelo carinho, compreensão, dedicação, parceria e motivação em todos os momentos.

Aos meus pais pelo exemplo maior, de educação, pela motivação, compreensão e conforto dados sempre.

Aos meus amigos que hoje fazem parte de minha família, meus sogros, Salin e Jussara e minha cunhada Juliana, por sempre apoiar em momentos tão essenciais, com seus conselhos, entretenimento e sua amizade.

Aos colegas do Mestrado, que por este período compartilharam seu tempo com seus conhecimentos, sugestões e descontração, agregando muito à vida acadêmica.

E, aos meus amigos que, mesmo com minhas ausências sempre compreenderam e me incentivaram.

Trabalho em desenvolvimento no laboratório de simulação numérica do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade do Vale do Rio dos Sinos – UNISINOS. O mesmo é realizado com a cooperação de informações da rede de pesquisa formada UFPEL (Universidade Federal de Pelotas), IPH-UFRGS (Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul), UNISINOS (Universidade do Vale do Rio dos Sinos) e URI (Universidade Regional Integrada). Atualmente, esta rede desenvolve o projeto de pesquisa intitulado “AQUECLUSA- Análise dos esforços hidrodinâmicos a jusante de válvulas de sistemas de enchimento/esvaziamento de eclusas de navegação”, o qual é financiado pela FINEP.

RESUMO

Este trabalho apresenta um estudo de comportamento fluidodinâmico na operação de válvula do tipo segmento invertida, utilizadas em sistemas de enchimento e esvaziamento de navegação de eclusas. Nesta pesquisa é verificada a influência da alteração geométrica no conduto a jusante da comporta. O objetivo principal é encontrar dentre alterações geométricas aquela que oferece melhores condições de operação, isto é, minimizando os efeitos nocivos provocados pelas baixas pressões. O estudo é realizado através de abordagem numérica (CFD - *Computer Fluid Dynamics*), com o software comercial ANSYS-CFX, utilizando-se as equações da conservação da massa e quantidade de movimento como modelo básico. Foram simulados 3 comprimentos de expansão ($L_{exp} = 0,3, 0,6$ e $0,9$ m) no teto a jusante da comporta, mantendo a mesma inclinação ($1E:10 L_{exp}$, onde E é a elevação do teto). Para cada comprimento de expansão foram simuladas 3 vazões (Q) e 3 aberturas (a), totalizando 27 simulações. As comparações entre os resultados numéricos para as expansões propostas são realizadas a partir do modelo numérico (original) já validado em trabalhos publicados. Também são feitas análises de parâmetros, como: alterações geométricas, pressões mínimas, regiões do conduto submetidas à pressões críticas (negativas), recuperação da pressão, coeficientes de perda de carga e de contração. Estas análises permitiram observar qual a influência da expansão no escoamento, mostrando que a simulação numérica pode ser utilizada como de apoio na definição de novas geometrias a serem adotadas nos projetos de novas eclusas, bem como na avaliação de eclusas já existentes identificando condições de operação nocivas na região junto a comporta. Verifica-se neste trabalho que as alterações geométricas propostas não são capazes de resolverem os problemas relativos às pressões negativas, e que seu desempenho depende das condições operação (principalmente a vazão). Contudo, quanto maiores forem as vazões, maiores serão as pressões mínimas obtidas com a expansão para o teto. Espera-se que os resultados obtidos possam ser usados como base para projetos, visando à diminuição dos efeitos nocivos na válvula (como cavitação, vibrações, erosões, ruídos e esforços espasmódicos) e perturbações que danificam as embarcações, durante a operação dentro da eclusa.

Palavras-chave: Simulação Numérica. CFD. Eclusas. Mecânica dos Fluidos. Válvulas Tipo Segmento Invertido.

ABSTRACT

This paper presents a study of fluid dynamic behavior in the operation of inverted Tainter gate, used in filling and emptying systems of navigation locks. In this research is verified the influence of geometric change in the conduit downstream of the gate. The main objective is to find among geometric changes one that offers the best operating condition, i.e., minimizing the harmful effects of low pressures. The study is conducted through numerical approach (CFD-Computer Fluid Dynamics) with the commercial software ANSYS-CFX, using the equations of conservation of mass and momentum as the basic model. Were simulated 3 expansion lengths ($L_{exp} = 0.3, 0.6$ and 0.9 m) in the roof of downstream gate, keeping the same slope ($1E:10 L_{exp}$, where E is the elevation of the roof). For each expansion length were three simulated stream flow (Q) and 3 openings (a), totaling 27 numerical simulations. Comparisons between the numerical results for the proposed expansions are made from the numerical model (original) previously validated in published works. Also analysis are made of parameters such as geometric changes, minimum pressures, the conduit regions undergoing critical pressures (negative) pressure recovery, pressure loss and contraction coefficients. This analysis allowed observing the influence of the expansion in the flow, showing that the numerical simulation can be used to support the definition of new geometries to be adopted in the design of new navigation locks, as well as evaluation of existing locks, identifying the harmful operating conditions in the region near the gate. It is verified in this work that the geometric changes proposed are not able to solve the problems relating to negative pressures, and its performance depends on operating conditions (mainly the flow). However, the higher the flow rate, the greater the pressures obtained with minimal expansion to the roof. It is hoped that the results obtained can be used as a basis for projects in order to reduce the harmful effects on the valve (as cavitation, vibration, erosion, noise and spasmodic efforts) and disorders that damage the vessels, while operating within the lock.

Keywords: Numerical Simulation. CFD. Navigation Locks. Fluid Mechanics. Inverted Tainter Gate.

LISTA DE ABREVIATURAS

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
CFD	Computational Fluid Dynamics
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte
ET	Expansão para o teto
EUA	Estados Unidos da América
FINEP	Financiadora de Estudos e Projetos
IPH-UFRGS	Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul
LOH-UFRGS	Laboratório de Obras Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul
UFPEL	Universidade Federal de Pelotas
UHE	Usina Hidrelétrica
UNISINOS	Universidade do Vale do Rio dos Sinos
URI	Universidade Regional Integrada
USACE	United States Army Corps of Engineers

LISTA DE SÍMBOLOS

Nomenclatura

- a - abertura da válvula [%]
 A - área [m²]
 C_C - coeficiente de contração [-]
 C_μ - constante do modelo de turbulência k- ϵ [-]
 d - altura da base à borda da comporta [m]
 D - altura [m]
 D_R - diâmetro [m]
 D_h - diâmetro hidráulico [m]
 E - elevação do teto [m]
 f - fator de atrito [-]
 g - aceleração da gravidade [m/s²]
 h_l - perda de carga distribuída [m]
 h_{lm} - perda de carga localizada [m]
 k - energia cinética turbulenta [m²/s²]
 K - coeficiente de perda [-]
 L - comprimento [m]
 P - pressão [Pa]
 p' - pressão modificada [Pa]
 Pe - perímetro [m]
 P_k - produção da turbulência [kg/m³s]
 Q - vazão volumétrica [m³/s]
 r - fração volumétrica [-]
 t - tempo [s]
 u - componente de velocidade no eixo x [m/s]
 U - vetor velocidade [m/s]
 v - componente de velocidade no eixo y [m/s]
 V - velocidade [m/s]
 x - direção do eixo horizontal [-]
 y - direção do eixo vertical [-]
 w - componente de velocidade no eixo z [m/s]
 z - direção do eixo perpendicular ao plano xy [-]

Z distância [m]

Símbolos gregos

γ peso específico [N/m³]

ε - taxa de dissipação de energia cinética turbulenta

μ - viscosidade dinâmica [Pa s]

ρ - massa específica [kg/m³]

Subscritos

1 montante

2 jusante

e - equivalente

eff - efetivo

exp expansão no teto

$inter$ interpolada

k - energia cinética turbulenta

m - mistura

min - mínimo

max - máximo

R - para seção circular

REF referência

t - turbulenta

V válvula

VC *vena contracta*

α - fração volumétrica da água

β - fração volumétrica do ar

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Comparativo entre modais de transporte.....	1
Figura 1.2 – Capacidade de carga e Ocupação de espaço físico.	2
Figura 2.1 – Vista em corte frontal de um sistema básico de eclusagem.	9
Figura 2.2 – Sistema de eclusagem de enchimento e esvaziamento frontal.....	10
Figura 2.3 – Sistema de eclusagem com manifolds nas laterais da eclusa.....	10
Figura 2.4 – Representação esquemática de um sistema de eclusagem com difusores transversais.	11
Figura 2.5 – Representação esquemática de um sistema de eclusagem hidrodinamicamente balanceado.	11
Figura 2.6 – Representação esquemática de um sistema de eclusagem: (a) Vista frontal e (b) Vista superior.....	12
Figura 2.7 – Desenho da válvula tipo segmento invertida.....	15
Figura 3.1 – Linha de energia atribuída a perda de carga em sistema de eclusagem.	17
Figura 3.2 – Esquema simplificado de uma válvula do tipo segmento invertida: (a) detalhe aumentado na região da comporta e (b) vista frontal.	18
Figura 3.3 – Coeficiente de perda de carga localizada em válvulas de segmento invertidas.	19
Figura 3.4 – Linha de energia e piezométrica.....	20
Figura 4.1 – Modelo experimental instalado no LOH-UFRGS.....	23
Figura 4.2 – Limitações do modelo experimental instalado no LOH-UFRGS.	24
Figura 4.3 – Domínio de cálculo do modelo numérico original.....	25
Figura 4.4 – Pressão na base vs. comprimento do conduto: $a = 70\%$ e $Q = 0,09 \text{ m}^3/\text{s}$	26
Figura 4.5 – Pressão na base vs. comprimento do conduto: $a = 50\%$ e $Q = 0,18 \text{ m}^3/\text{s}$	26
Figura 4.6 – Pressão na base vs. comprimento do conduto: $a = 70\%$ e $Q = 0,09 \text{ m}^3/\text{s}$	27
Figura 4.7 – Pressão na base vs. comprimento do conduto: $a = 50\%$ e $Q = 0,18 \text{ m}^3/\text{s}$	27
Figura 4.8 – Coeficiente de contração vs. abertura da válvula.....	28
Figura 5.1 – Desenho esquemático da expansão para o teto.	30
Figura 5.2 – Detalhe do refinamento da malha da válvula.....	34
Figura 5.3 – Representação dos principais pontos gerados por rotina para análise dos resultados.....	35
Figura 5.4 – Representação do nível d'água na chaminé de equilíbrio.....	36
Figura 5.5 – Representação do campo (médio) de pressão.	36
Figura 5.6 – Representação da linha piezométrica média.	37

Figura 6.1 – Campo de pressão. $a = 30\%$ e $Q = 0,18\text{ m}^3/\text{s}$: (a) $L_{exp} = 0$, (b) $L_{exp} = 0,3\text{ m}$, (c) $L_{exp} = 0,6\text{ m}$ e (d) $L_{exp} = 0,9\text{ m}$.	39
Figura 6.2 – Campo de pressão. $a = 70\%$ $Q = 0,4\text{ m}^3/\text{s}$: (a) $L_{exp} = 0\text{ m}$ e (b) $L_{exp} = 0,9\text{ m}$.	40
Figura 6.3 – Campo de pressão e linhas de corrente. $Q = 0,18\text{ m}^3/\text{s}$ e $L_{exp} = 0\text{ m}$; (a) $a = 30\%$, (b) $a = 50\%$ e (c) $a = 70\%$.	41
Figura 6.4 - Campo de pressão e linhas de corrente. $Q = 0,18\text{ m}^3/\text{s}$: (a) $L_{exp} = 0\text{ m}$, (b) $L_{exp} = 0,3\text{ m}$, (c) $L_{exp} = 0,6\text{ m}$ e (d) $L_{exp} = 0,9\text{ m}$.	42
Figura 6.5 – Posição das pressões mínimas no teto vs. comprimento da expansão. $Q = 0,04, 0,09$ e $0,18\text{ m}^3/\text{s}$: (a) $a = 30\%$, (b) $a = 50\%$ e (c) $a = 70\%$.	43
Figura 6.6 – Posição das pressões máximas no teto vs. comprimento da expansão. $Q = 0,04, 0,09$ e $0,18\text{ m}^3/\text{s}$: (a) $a = 30\%$, (b) $a = 50\%$ e (c) $a = 70\%$.	44
Figura 6.7 - Pressões no teto do conduto vs. Comprimento. $Q = 0,04\text{ m}^3/\text{s}$: (a) $a = 30\%$; (b) $a = 50\%$ e (c) $a = 70\%$.	45
Figura 6.8 - Pressões no teto do conduto vs. Comprimento. $Q=0,09\text{ m}^3/\text{s}$: (a) $a=30\%$; (b) $a=50\%$ e (c) $a=70\%$.	46
Figura 6.9 - Pressões no teto do conduto vs. Comprimento. $Q = 0,18\text{ m}^3/\text{s}$: (a) $a = 30\%$; (b) $a = 50\%$ e (c) $a = 70\%$.	47
Figura 6.10 – Pressões mínimas no teto vs. Comprimento da expansão. $Q = 0,04, 0,09$ e $0,18\text{ m}^3/\text{s}$: (a) $a = 30\%$, (b) $a = 50\%$ e (c) $a = 70\%$.	48
Figura 6.11 – Vazão vs. abertura, para mesmos P_{min} : simulado (símbolo verde) e interpolado(símbolos pretos).	49
Figura 6.12 – Variação de pressão na base vs. comprimento da expansão. $Q = 0,04, 0,09$ e $0,18\text{ m}^3/\text{s}$: (a) $a = 30\%$, (b) $a = 50\%$ e (c) $a = 70\%$.	50
Figura 6.13 – Coeficiente de perda de carga (K_V) vs. comprimento da expansão. $Q = 0,04, 0,09$ e $0,18\text{ m}^3/\text{s}$: (a) $a = 30\%$, (b) $a = 50\%$ e (c) $a = 70\%$.	51
Figura 6.14 – Coeficiente de perda de carga (K_V) vs. abertura da válvula.	52
Figura 6.15 – Coeficientes de contração de referência vs. abertura da válvula: (a) completo e (b) parcial.	53
Figura A.1 - Campo de pressão e linhas de corrente. $a = 30\%$: $Q = 0,04\text{ m}^3/\text{s}$, $Q = 0,09\text{ m}^3/\text{s}$ e $Q = 0,18\text{ m}^3/\text{s}$; (a) $L_{exp} = 0\text{ m}$, (b) $L_{exp} = 0,3\text{ m}$, (c) $L_{exp} = 0,6\text{ m}$ e (d) $L_{exp} = 0,9\text{ m}$.	59
Figura A.2 - Campo de pressão e linhas de corrente. $a = 50\%$: $Q = 0,04\text{ m}^3/\text{s}$, $Q = 0,09\text{ m}^3/\text{s}$ e $Q = 0,18\text{ m}^3/\text{s}$; (a) $L_{exp} = 0\text{ m}$, (b) $L_{exp} = 0,3\text{ m}$, (c) $L_{exp} = 0,6\text{ m}$ e (d) $L_{exp} = 0,9\text{ m}$.	59

Figura A.3 - Campo de pressão e linhas de corrente. $a = 70\%$: $Q = 0,04 \text{ m}^3/\text{s}$,
 $Q = 0,09 \text{ m}^3/\text{s}$ e $Q = 0,18 \text{ m}^3/\text{s}$; (a) $L_{exp} = 0 \text{ m}$, (b) $L_{exp} = 0,3 \text{ m}$,
(c) $L_{exp} = 0,6 \text{ m}$ e (d) $L_{exp} = 0,9 \text{ m}$ 60

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	1
1.1	OBJETIVOS	7
1.2	JUSTIFICATIVA	7
1.3	ESTRUTURA DA PESQUISA	8
2	ECLUSAS DE NAVEGAÇÃO	9
2.1	TIPOS DE ECLUSAS	10
2.2	CLASSIFICAÇÃO QUANTO A QUEDA	12
2.3	CARACTERÍSTICAS HIDRÁULICAS EM ECLUSAS DE ALTA QUEDA	13
2.4	VÁLVULAS DE CONTROLE EM ECLUSAS DE ALTA QUEDA	14
3	PARÂMETROS DE VÁLVULAS DE CONTROLE EM ECLUSAS.....	16
3.1	PERDA DE CARGA	16
3.2	PRESSÃO MÍNIMA	19
4	PROJETO DE PESQUISA.....	21
4.1	INSTITUTO DE PESQUISAS HIDRÁULICAS – IPH (UFRGS).....	22
4.2	MODELOS DE VÁLVULAS DE ECLUSA DE NAVEGAÇÃO.....	22
4.2.1	Modelo Experimental	22
4.2.2	Modelo Numérico.....	24
4.2.3	Modelo Experimental x Modelo Numérico	25
5	PROBLEMA ATUAL	29
5.1	ABORDAGEM NUMÉRICA	30
5.2	MODELO MATEMÁTICO	31
5.2.1	Condições iniciais e de contorno.....	33
5.2.2	Geração de malhas.....	33
5.2.3	Simulação/Processamento	34
5.2.4	Pós-processamento.....	34
6	RESULTADOS	38
6.1	VARIAÇÃO DE PRESSÃO	38
6.2	COMPARAÇÃO DA PRESSÃO NO TETO.....	44
6.3	COEFICIENTES PERDA DE CARGA E DE CONTRAÇÃO	50
6.3.1	Coefficiente de perda de carga localizada (K_V)	50
6.3.2	Coefficiente de contração (C_C)	53
7	CONCLUSÕES.....	54

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	57
APÊNDICE A	59
APÊNDICE B.....	61
APÊNDICE C	62

1 INTRODUÇÃO

O Brasil, segundo a ANEEL, por possuir uma grande rede hidrográfica, produz aproximadamente 95% da eletricidade consumida a partir de hidrelétricas, e, "cerca de 23% do potencial hidrelétrico estimado já foram aproveitados. Segundo Plec (2010), com a construção de Usinas Hidrelétricas (UHE), pode-se melhorar a navegabilidade dos rios, desde que se construam infraestruturas que permitam transposições de embarcações e um melhor aproveitamento do transporte fluvial. Para que seja viável a navegação nos trechos onde há construção de barragens, devem ser incorporados sistemas de eclusagem. O modal hidroviário, mesmo com desvantagem do tempo de transporte, traz vantagens em relação ao menor consumo de combustível (ROSA, 2005 apud PLEC 2010), menor emissão de poluentes por carga, e alívio nos meios rodoviários. De acordo com dados da ANTAQ (Agência Nacional de Transportes Aquaviários), pode-se comparar, na Fig. 1.1 o consumo de combustível, emissão de poluentes (exemplo o CO), assim como o custo de implantação. Na Fig. 1.2 pode-se comparar a capacidade de carga dos modais de transporte hidroviário, ferroviário e rodoviário em relação a espaço físico que ocupam em suas correspondentes vias.

Modais	Hidroviário	Ferrovário	Rodoviário
Transportar 1.000 kg por 1.000 km			
Consumo de combustível	4 L	6 L	15 L
Emissão de monóxido de carbono (CO)	74 gramas	104 gramas	219 gramas
Custo de implantação da infra-estrutura (por 1) km	US\$ 34.000 (Dólares)	US\$ 1.400.000 (Dólares)	US\$ 440.000 (Dólares)

Figura 1.1 – Comparativo entre modais de transporte.

Fonte: adaptado ANTAQ.

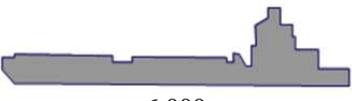
Modais	Hidroviário	Ferrovário	Rodoviário
Capacidade de carga	1 Comboio Duplo Tietê (4 chatas e empurrador)  6.000 t	2,9 Comboios Hopper (86 vagões de 70 t) 	172 Carretas de 35 t Bi-trem Graneleiras 
Comprimento total	150 m	1,7 km	3,5 km (26 km em movimento)

Figura 1.2 – Capacidade de carga e Ocupação de espaço físico.

Fonte: adaptado Ministério dos transportes.

A utilização de transporte hidroviário, como observado nas comparações das Fig.1.1 e Fig.1.2, oferece vantagens em relação ao custo e ao meio ambiente. Contudo, a malha hidroviária brasileira possui trechos com grandes desníveis, que, em alguns casos, inviabilizam esta modalidade de transporte, sendo necessárias construções de eclusas de navegação. Entre os fatores que contribuem no interesse dos estudos sobre eclusas pode-se citar o Plano Nacional de Logística e Transportes (PNLT, Ministério dos Transportes), o qual indica maior investimento no setor aquaviário, assim como os projetos de leis referentes ao uso da água. Encontra-se em tramitação na Comissão de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável o projeto de lei 3007/1997, que tornará obrigatória a inclusão de eclusas nas construções de barragens a serem construídas em rios navegáveis. Há também a Resolução 463, de 3 de setembro de 2012 (DIÁRIO OFICIAL DA UNIÃO) que:

“Aprova condicionantes relativas a sistemas de transposição de desnível para a navegação em declarações de reserva de disponibilidade hídrica e outorgas de direito de uso de recursos hídricos de aproveitamentos hidrelétricos em cursos d'água de domínio da União.”

As eclusas são classificadas em função de seus desníveis sendo divididas em baixa, média e alta queda. Porém, não há um consenso na literatura quanto aos desníveis correspondentes a cada categoria. A classificação mais aceita atualmente é a do UNITED STATES ARMY CORPS OF ENGINEERS (2006); baixíssima queda com desníveis de até 10 m, baixa queda de 10 a 15 m, alta queda acima 15 m e altíssima queda para desníveis superiores a 30 m.

Em função dos tipos de desníveis e dos custos envolvidos, tem-se dado preferência à utilização de eclusas de alta e de altíssima queda (>30 m). O número de eclusas de alta queda vem aumentando junto com a construção de altos barramentos, aumentando os cuidados em

relação aos projetos devido às condições mais críticas de operação. Dentre os problemas, tem-se aqueles relacionados às condições de amarração das embarcações na câmara da eclusa e aos problemas hidráulicos encontrados junto às comportas. O primeiro problema diz respeito à segurança e à movimentação da superfície da água dentro da câmara, sendo utilizado sistemas de distribuição hidrodinamicamente balanceados, para que esta movimentação seja uniforme. Para o segundo problema o grande diferencial de pressão entre as faces das comportas e o curto período exigido para as operações de eclusagem incorrem em velocidades muito altas as quais produzem não somente cavitação, mas exigem um cuidado especial no projeto estrutural das válvulas (QINQIN, 2005). O atual estágio de evolução dos sistemas de distribuição (hidrodinamicamente balanceado) torna difícil imaginar novas concepções revolucionárias para esses sistemas, contudo, esperam-se soluções para a grande variedade de problemas específicos que afetam as eclusas de alta queda (USSAMI, 1980).

Ussami (1980) cita três estágios envolvidos no processo de enchimento de uma eclusa de navegação, o primeiro estágio que corresponde ao início do enchimento da câmara como sendo o mais crítico, pois é neste estágio onde o nível d'água no interior da câmara é menor e têm-se as maiores velocidades de escoamento, conseqüentemente maior probabilidade de ocorrência do fenômeno de cavitação. No segundo estágio tem-se escoamento em regime quase permanente não sendo observados grandes problemas. O último estágio ocorre no final do processo de enchimento, quando o efeito de inércia da massa de fluido em movimento tem a tendência de encher a câmara acima do nível desejado. Tondowski (1987) afirma que os principais fenômenos turbulentos são a cavitação, deslocamento do escoamento em curvas, vórtices na tomada d'água, e eventual ressalto hidráulico na restituição. Os prováveis efeitos do escoamento turbulento poderão ser erosão por cavitação e vibrações nas comportas. Ainda, Santos (1998) cita outros problemas hidráulicos tais como: altos picos de vazão no enchimento e no esvaziamento, necessitando maiores cuidados no projeto, em particular a distribuição interna e restituição. Também podem ocorrer problemas com a tranquilidade do plano d'água na câmara, alta energia cinética no nível da distribuição interna no início do enchimento (problemas de turbulência local). A alta queda também maximiza os desequilíbrios na distribuição da velocidade nos condutos, implicando em formação de ondas estacionárias, resultando em graves conseqüências nos esforços das amarras das embarcações. Ainda segundo o Santos (1998) podem ocorrer vibração nas comportas devido a grandes flutuações de pressão e esforços espasmódicos na aparelhagem de movimentação, assim como, ampliação dos esforços ligados aos fenômenos de downpull e uplift, fenômenos que se referem ao empuxo descendente e ascendente, respectivamente. Citando também a cavitação

como o mais importante dos fenômenos turbulentos decorrentes do escoamento, pois além de ser altamente agressiva às estruturas sob sua ação, é a origem das demais questões mencionadas.

A operação de uma eclusa é complexa, necessitando controle de velocidade na câmara de eclusagem, tanto para evitar perturbações na superfície da água, como forças resultantes da aceleração e desaceleração do nível. Este controle em eclusas de alta queda é realizado por válvulas, em geral do tipo segmento invertida, regulando a vazão através da abertura da válvula. No início do processo de enchimento ou de esvaziamento as aberturas são pequenas, ocasionando altas velocidades, queda brusca da pressão média e amplas flutuações de pressão a jusante das comportas, o que incorre em um grande potencial de erosão e/ou cavitação junto à base, principalmente nas eclusas de médias e altas quedas (USSAMI, 1980; TONDOWSKI, 1988; SANTOS, 1998).

Observações em modelos e em protótipos revelaram que as condições mais críticas de cavitação ocorrem para aberturas em torno de 60% da válvula, principalmente junto ao teto (USSAMI, 1983; SANTOS, 1998). As principais soluções adotadas para amenizar os efeitos das altas velocidades e ocorrência de pressões negativas visando eliminar erosões da superfície ou a cavitação são: utilização de revestimentos resistentes (aço), alterações geométricas na seção do conduto a jusante das comportas (rebaixamento da cota de assentamento das válvulas, expansões no teto, na base, nas laterais), leis de manobra especiais para as válvulas e a introdução de ar nos condutos (USACE, 1975; OLIVEIRA *et al.*, 1983; SANTOS, 1998).

A adição de ar (> 8%) no escoamento vem sendo amplamente utilizada, porém a quantidade de ar é limitada para não provocar muitas oscilações na câmara com a saída de ar que poderia vir a aumentar os esforços nas amarras. Esta solução geralmente é associada a alterações geométricas da seção do conduto. A execução de concretos especiais também tem se revelado uma alternativa que apresenta limitações e estes têm sido mais estritamente aplicados às situações de menor efeito erosivo, como no caso dos partidores de fluxo horizontais ou verticais (SANTOS, 1998). As leis de manobra especiais ficam limitadas à capacidade dos equipamentos de acionamento e a determinadas situações que causariam esforços hidrodinâmicos excessivos. A utilização de leis de manobra das válvulas de maneira mais rápida se por um lado conduz a um tempo de eclusagem menor, por outro provocam maiores oscilações dentro da câmara da eclusa e maiores esforços nas amarras das embarcações, aumentando o risco de dano às mesmas. Contudo, a utilização de leis de manobras mais lentas, além de aumentar o tempo de eclusagem e os seus custos, coloca a

superfície do concreto do conduto e dos mecanismos da válvula em situações mais críticas por um tempo maior, submetendo aos efeitos de vibrações, de ruídos, de erosões e cavitação em função do aumento do tempo nas condições de escoamento. Como citado por Tondowski (1988), um projeto de eclusa deve atender as condições de segurança na transposição de embarcações no menor tempo possível. Para isto no interior da câmara, a agitação da superfície d'água deverá ser compatível com embarcações de pequeno à grande porte, onde se têm critérios limitantes econômicos (tempo de operação) que conflitam com os de segurança das embarcações (agitação na câmara) e os hidráulicos (cavitação a jusante das comportas), exigindo soluções complexas para que opere de forma otimizada com segurança.

Outras soluções propostas são as alterações geométricas a jusante da comporta utilizando-se da expansão no teto, como estudado por Pickering (1981) e Perkins (1979) (apud USACE, 2006), reduzindo o potencial de cavitação pelo aumento de perda carga. Shiqin *et al.* (1999) estudaram o rebaixamento da válvula e a introdução de expansões laterais, onde concluíram que o potencial de cavitação foi reduzido com a diminuição das velocidades ocasionado pelo aumento das dimensões a jusante. Shengyi *et al.* (2005), realizaram numericamente as expansões no teto e na base, e verificaram também que essa geometria apresentou um escoamento mais estável devido ao maior espaço existente a jusante das comportas. Com essa combinação de expansão no teto e na base obtiveram pressões médias maiores que na expansão apenas no teto.

Várias pesquisas já foram realizadas com modelos experimentais de eclusas, a exemplo de USACE (1975) que utilizou dados de modelos datados de 1942 a 1966 para elaboração dos manuais de engenharia. No Brasil pode-se citar as recentes pesquisas desenvolvidas no Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH-UFRGS), como as publicadas em Dalla Corte *et al.* (2012), Battiston *et al.* (2009) e Mees *et al.* (2008). Esses modelos fornecem dados que permitem prever as características hidráulicas. Porém, normalmente estes estudos costumam ser bastante onerosos, bem como demandam bastante tempo na implantação do mesmo, na calibração dos equipamentos e na realização dos ensaios.

Atualmente as ferramentas de fluidodinâmica computacional (CFD) vêm sendo amplamente utilizadas. Com isso é possível testar várias alterações geométricas com menor tempo e custo. Todavia, o modelo numérico necessita de dados experimentais para que seja validado. São vários os fatores que contribuem para que o modelo numérico corresponda aos valores do modelo experimental, como o modelo matemático, o método de discretização das equações, condições iniciais, condições de contorno, e a malha utilizada no domínio computacional.

A publicação de trabalhos utilizando simulações numéricas para estudos em válvulas de enchimento e esvaziamento de eclusas ainda é escassa. Contudo, trabalhos como os de Batistton *et al.* (2009a) e Dalla Corte *et al.* (2011) validaram os resultados para os modelos utilizando códigos para resolver as equações do campo médio (*RANS*) com método de volume finitos e modelo de turbulência $k-\varepsilon$. No trabalho de Batistton *et al.* (2009a) foi utilizado o *software* CFD FLOW-3D, em modelo 2D, obtendo perfis de velocidade, distribuição de pressão no teto e na base coerentes com os valores experimentais, para aberturas (a) de 60 e 100% e vazão (Q) de $0,22 \text{ m}^3/\text{s}$.

No trabalho de Dalla Corte *et al.* (2011) foi utilizado o *software* o CFX com um modelo 3D, apresentando resultados com $Q = 0,09 \text{ m}^3/\text{s}$ para $a = 30, 50$ e 70% e para abertura de 50% para $Q = 0,04$ e $0,18 \text{ m}^3/\text{s}$. Os resultados numéricos de Dalla Corte *et al.* (2011) apresentam excelente concordância com os resultados experimentais. Os modelos numérico e experimental foram baseados na concepção das eclusas das usinas hidrelétricas de Tucuruí e Santo Antônio (escala de 1:16 entre modelo e protótipo). A seção analisada nos modelos consiste em um duto de seção quadrada de $0,25 \text{ m}$ (lado), comprimento de $1,7 \text{ m}$ a montante e 4 m a jusante da comporta, uma câmara de $0,4 \text{ m}$ de comprimento e $0,75 \text{ m}$ de altura, onde se encontra a comporta. A comporta, neste caso um segmento de cilindro, tem raio de curvatura de $0,38 \text{ m}$, a posição da sua borda em relação a base determina a abertura da válvula, isto é, de 0 a $0,25 \text{ m}$ corresponde, respectivamente, de 0 a 100% . Esta seção ainda conta com uma chaminé de equilíbrio, que permite a variação do nível, a montante da comporta, em um escoamento bifásico para diferentes condições de operações.

Com projetos voltados para estudos de enchimento e esgotamento de eclusas, principalmente os de alta queda, necessitam-se de dados que possibilitem melhorias nas condições de operação. Entre os fatores que merecem grande atenção, estão os fenômenos que ocorrem imediatamente a jusante das válvulas de enchimento. Várias são as pressuposições que cercam as geometrias possíveis. Neste sentido é viável a simulação numérica em diversas geometrias, sendo focada nas expansões a jusante da comporta, em que busca-se comparar as alterações e aproximar uma geometria que favoreça um desempenho superior ao modelo original. Mesmo sendo baseados num modelo de escala reduzida (1:16), esses valores fornecem dados para relação com o protótipo, aproximando por semelhança as pressões, velocidades e fenômenos que possam ocorrer.

1.1 OBJETIVOS

O objetivo geral é conhecer o comportamento hidrodinâmico de válvulas de enchimento e esvaziamento de eclusas, utilizando-se simulação numérica por CFD como abordagem de estudo. Para tanto, serão propostas diversas configurações de alterações geométricas no conduto à jusante da comporta. As alterações geométricas serão submetidas a condições usuais de operação, sendo estas simuladas através do software comercial CFX. No pós-processamento das simulações pretende-se analisar as pressões no teto e na base do conduto, comparando os resultados obtidos com alteração de geometria de resultados numéricos e experimentais para um conduto original.

1.2 JUSTIFICATIVA

Com a perspectiva de melhorias no setor de transportes, buscam-se alternativas para diminuir o tráfego rodoviário, que em parte deve-se ao modal rodoviário de transporte de cargas. Como verificado pelo Ministério dos Transportes, este modal requer maior consumo de combustível, maiores investimentos em infra-estruturas e maior espaço físico das vias (muitas vezes causando grandes congestionamentos), que o transporte hidroviário, por exemplo. Além disso, sabe-se que o transporte rodoviário pode ser responsável pela deterioração das estradas, devido ao sobrepeso, por inúmeros acidentes nas estradas, causado muitas vezes por longas jornadas de trabalho. Uma alternativa para a melhoria do sistema de transportes de cargas é a utilização do transporte hidroviário, contudo depende da navegabilidade dos rios. Como citado por Plec (2010), a construção de barragens pode melhorar as condições de navegabilidade, desde que haja mecanismos para transposição das embarcações junto as barragens. Como abordado por Santos (1998), Palmier (1990), Tondowski (1988) e USACE (2006), por exemplo, as operações de transposição (ou eclusagem) devem ocorrer de forma segura e economicamente viáveis, isto é, o mais rápido possível. Para que se possa atingir tais requisitos são necessários estudos buscando o aumentar a eficiência do processo de eclusagem, sendo as válvulas de controle um dos principais elementos neste processo. Os estudos para melhorar o desempenho das válvulas não são recentes, contudo estes estudos foram realizados em grande maioria de forma experimental em modelos e protótipos, demandando muito tempo e mão de obra. O presente trabalho busca utilizar as ferramentas computacionais para reproduzir numericamente as condições operacionais de um modelo (instalado em laboratório de hidráulica) de válvula de enchimento e esvaziamento de eclusas.

Como ferramenta para tal estudo utiliza-se o software comercial de fluidodinâmica computacional Ansys CFX 12, disponível no laboratório de simulação numérica do Programa de Pós-Graduação e Engenharia Mecânica da UNISINOS. Com esta ferramenta, torna-se possível a previsão de fenômenos de escoamento e determinações de pontos críticos de pressão e velocidade. Permitindo assim realizar uma análise da influência de alterações geométricas, sem que haja a necessidade de construção de vários modelos experimentais. Também serão possíveis simulações em condições geométricas e de operação que extrapolem a capacidade do modelo experimental, utilizado como referência, o qual é importante para compreensão das tendências de comportamento do escoamento.

O estudo também é parte do projeto de pesquisa FINEP (AQUECLUSA- Análise dos esforços hidrodinâmicos a jusante de válvulas de sistemas de enchimento/esvaziamento de eclusas de navegação), o qual é desenvolvido em rede por quatro universidades: UFPEL (Universidade Federal de Pelotas), UFRGS (Universidade Federal do Rio Grande do Sul), UNISINOS (Universidade do Vale do Rio dos Sinos) e URI (Universidade Regional Integrada).

1.3 ESTRUTURA DA PESQUISA

No capítulo 2 são apresentadas características de eclusas de navegação, classificadas quanto à queda, controle de enchimento e esvaziamento, esforços hidrodinâmicos e algumas alternativas estudadas. No capítulo 3 são abordados os principais parâmetros utilizados na análise das válvulas de controle utilizadas em sistemas de eclusagem. No capítulo 4 são apresentados os aspectos do trabalho de pesquisa, o emprego de modelos, instalações e estruturas. No capítulo 5 é apresentada a metodologia utilizada. No capítulo 6 são apresentados resultados obtidos a partir das possíveis expansões geométricas. E, por último, são apresentadas conclusões preliminares e sugestões para continuidade do estudo.

2 ECLUSAS DE NAVEGAÇÃO

Eclusas de navegação tem a função de realizar a transposição de embarcações em locais onde haja desníveis que impeçam a continuação da navegação, e seu funcionamento segue o princípio dos vasos comunicantes. Um sistema básico de eclusa de navegação, mostrado na Fig. 2.1, é composto por quatro componentes: nível superior (montante), a câmara, o sistema de enchimento e esvaziamento e o nível inferior (jusante).

A variação de nível ocorre pelo enchimento e esgotamento da câmara que tem a velocidade comandada por uma válvula de controle (composta pelos dutos de entrada e saída, pela câmara e chaminé de equilíbrio, pela comporta e seus mecanismos de acionamento e vedações).

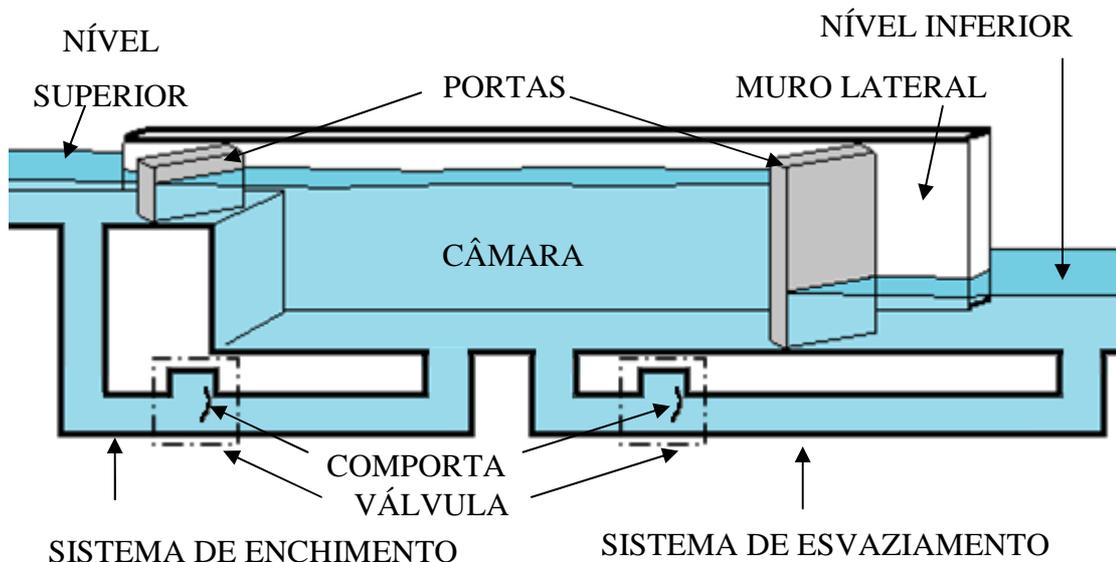


Figura 2.1 – Vista em corte frontal de um sistema básico de eclusagem.

Para que a câmara de eclusagem permita a variação de nível, são utilizadas as portas a montante e a jusante, como barreiras móveis. As portas são abertas para entrada e saída das embarcações quando se encontram no mesmo nível, ora as portas a montante, quando no nível superior mantendo as portas a jusante fechadas, ora as portas de jusante abrem-se quando no nível inferior com as portas montante fechadas. O controle do nível na câmara é realizado pelo sistema de enchimento e esvaziamento que, segundo Palmier (1990), é realizado por uma lei de manobra previamente definida, sendo o escoamento processado pelo efeito da gravidade. No acesso inferior têm-se características similares ao acesso superior (USACE, 2006).

2.1 TIPOS DE ECLUSAS

As eclusas podem ter diferentes formas e métodos de construção. A complexidade da construção é proporcional ao desnível da queda d'água (altura entre os níveis a montante e jusante da eclusa). Estudos passados e recentes focam-se em obter uma capacidade cada vez maior de transposição pelo menor tempo de enchimento e esvaziamento. Em desníveis baixos, até 3 m, o sistema de enchimento e esgotamento é de tal simplicidade que o controle de nível realiza-se diretamente pela abertura e fechamento das portas a montante e jusante (SANTOS, 1998 e PALMIER, 1990), conforme pode ser visto na Fig. 2.2.

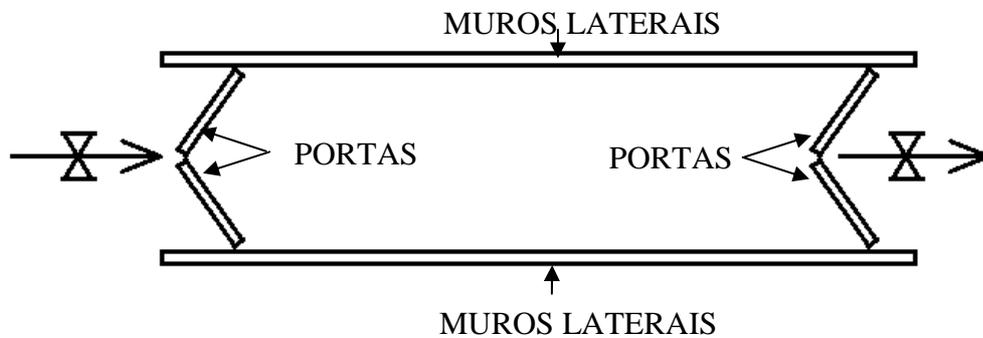


Figura 2.2 – Sistema de eclusagem de enchimento e esvaziamento frontal.
Fonte: adaptado Palmier (1990).

Em eclusas com maiores desníveis, entre 4,5 à 10 m, são necessários sistemas mais sofisticados de dissipação de energia e controle de velocidade vertical, ou mesmo emprego de manifolds (distribuição de dutos para os orifícios) nas laterais da câmara (SANTOS, 1998 e PALMIER, 1990), a exemplo do que é apresentado na Fig. 2.3.

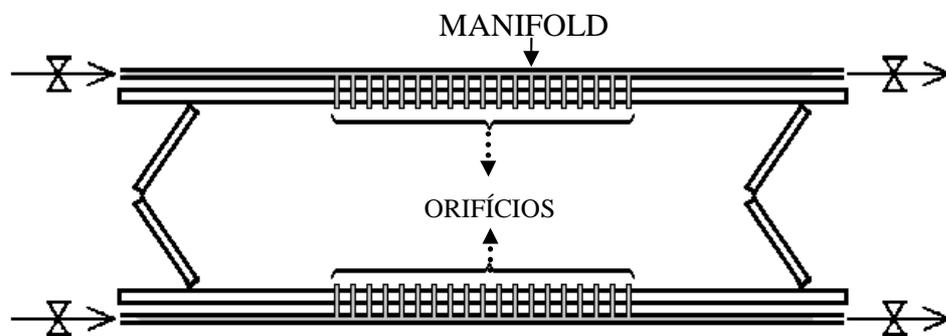


Figura 2.3 – Sistema de eclusagem com manifolds nas laterais da eclusa.
Fonte: adaptado Palmier (1990).

Durante o processo evolutivo das eclusas, foram inseridos dispositivos auxiliares, denominados difusores, próximos às extremidades (a montante e a jusante), dispostos transversalmente no fundo da câmara da eclusa para enchimento e esgotamento (PALMIER, 1990), conforme indicado na Fig. 2.4. Segundo Palmier (1990), esta configuração, surgiu em função das condições de funcionamento mais severas e ineficácia das soluções anteriores, permitindo a suavização das oscilações da superfície d'água na câmara.

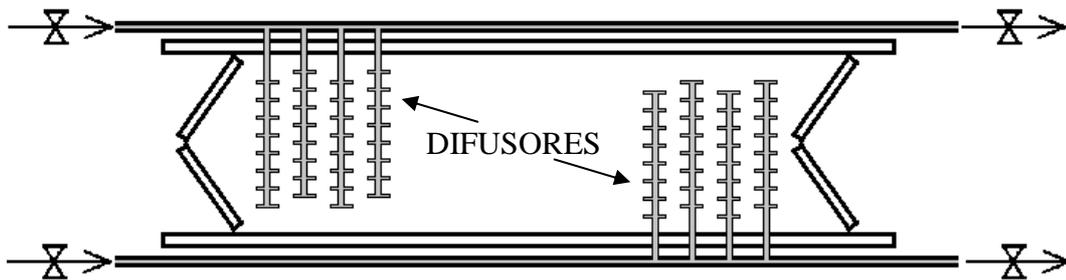


Figura 2.4 – Representação esquemática de um sistema de eclusagem com difusores transversais.

Fonte: adaptado Palmier (1990).

Para as eclusas de alta queda o sistema de enchimento e esgotamento utilizado é o hidrodinamicamente balanceado, que de acordo com as características descritas por Palmier (1990), é capaz de atenuar os movimentos de agitação no interior da câmara. Este sistema consiste em derivações providas de orifícios localizados longitudinalmente no fundo da câmara, onde a entrada do aqueduto é no ponto médio da câmara e este é bifurcado sucessivamente. Estas bifurcações são realizadas até que se atinjam as derivações que alimentam a câmara da eclusa conforme apresentado na Fig. 2.5.

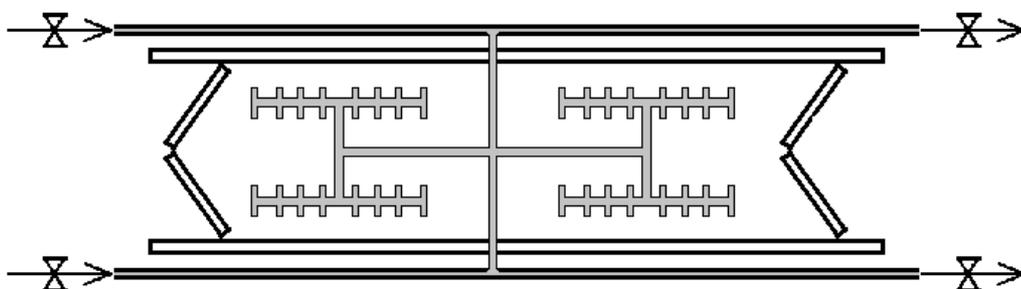
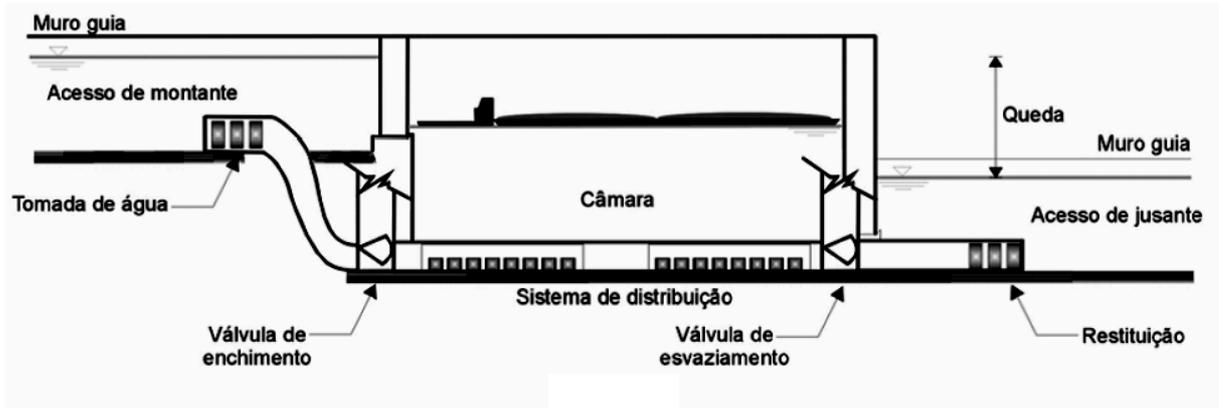


Figura 2.5 – Representação esquemática de um sistema de eclusagem hidrodinamicamente balanceado.

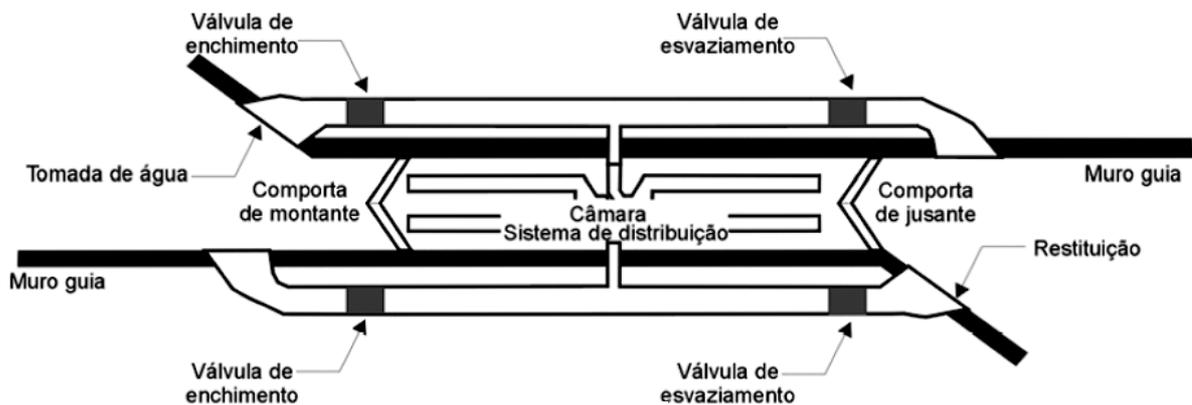
Fonte: adaptado Palmier (1990).

Uma configuração para eclusa de alta queda Fig. 2.6(a-b) é apresentada por USACE (2006) com sistemas mais complexos de enchimento (e esvaziamento) e distribuição

d'água na câmara. Na Fig. 2.6(a) é possível identificar a disposição das válvulas de controle do sistema de enchimento e esgotamento e na Fig. 2.6(b) os sistemas primários na vista superior.



(a)



(b)

Figura 2.6 – Representação esquemática de um sistema de eclusagem: (a) Vista frontal e (b) Vista superior.

Fonte: adaptado USACE (2006).

2.2 CLASSIFICAÇÃO QUANTO A QUEDA

Segundo Santos (1998) a queda de uma eclusa é a diferença entre os níveis d'água a montante e a jusante, e utilizadas para definir o tipo, o porte e os custos com o sistema de enchimento e esvaziamento. De acordo com corpo de engenheiros do exército norte-americano (United States Army Corps of Engineers-USACE) a classificação quanto a queda é dada pela elevação do nível na câmara de eclusagem, conforme indicado na Tab. 2.1. Sendo esta classificação utilizada como referência neste trabalho.

Tabela 2.1: Classificação da queda d'água.

Intervalo Máximo de Elevação [m]	Classificação de Projeto
De 0 a 3	Baixíssima queda
De 3 a 10	Baixa queda
De 10 a 30	Alta queda
Acima de 30	Altíssima queda

Fonte: adaptado de USACE (2006).

2.3 CARACTERÍSTICAS HIDRÁULICAS EM ECLUSAS DE ALTA QUEDA

Segundo Santos (1998) fazem parte dos circuitos hidráulicos de enchimento das câmaras de eclusas de alta queda o canal de adução, as tomadas d'água, os dutos, as válvulas, o sistema de distribuição, os *manifolds* e dissipadores de energia. As tomadas de água são a "interface entre o canal ou reservatório e o conduto, promovendo a adução com vazões elevadas, progressivas, mantendo a continuidade devido às baixas velocidades do canal e simultaneamente uma mínima perda de carga". Os dutos são responsáveis por conduzir a água desde as tomadas até o esvaziamento, fazendo a ligação entre os sistemas. São as partes mais simples dos circuitos, onde geralmente ocorrem as menores velocidades. As válvulas, em alta queda geralmente são utilizadas embutidas planas ou, nos projetos mais modernos, do tipo segmento invertida (também referenciada por setor invertido). Nesta ocorrem as maiores velocidades, e imediatamente a jusante a comporta, as menores pressões, podendo favorecer o aparecimento de cavitação. O sistema de distribuição, encontrado no fundo da câmara, formado por condutos menores transformando-se em *manifolds*, com objetivo de distribuir pequenas vazões de forma uniforme e simultânea, para que se mantenha a tranquilidade da superfície da água durante o enchimento. Os *manifolds* são a forma de distribuição final no fundo da câmara, para estes buscam-se distribuições de vazões idênticas para cada orifício, que na prática variam em torno da uniformidade durante o enchimento. Os dissipadores de energia externos aos orifícios dos *manifolds* influenciam na dissipação de energia cinética dos jatos e na evolução dos mesmos em conjunto.

Em relação ao sistema de esvaziamento, têm-se basicamente poucos elementos acrescentados, como a restituição, e o funcionamento dos elementos que aparecem também no enchimento são basicamente semelhantes. A restituição (saída d'água do sistema de esvaziamento) pode ser feita em um canal à parte ou no próprio canal de navegação (SANTOS, 1998).

2.4 VÁLVULAS DE CONTROLE EM ECLUSAS DE ALTA QUEDA

Com a preferência pela construção de barragens com eclusas de alta queda por questões econômicas, também por melhorar a navegabilidade dos rios (SANTOS, 1998), buscam-se sistemas de eclusagem mais eficientes e seguros (TONDOWSKI, 1988). Como citado por Palmier (1990), as válvulas de enchimento e esvaziamento são "o coração do sistema" e responsáveis por alguns dos parâmetros mais importantes de eficiência das eclusas. Entre os quais estão os tempos de enchimento e esgotamento da câmara, condições de pressão nas regiões mais críticas e vibrações. As válvulas de controle tem a função regular a vazão de água no enchimento e esgotamento das eclusas. No enchimento, a válvula localiza-se na saída da tomada d'água, regulando o fluxo para a entrada do sistema de distribuição na câmara. Para o esgotamento, regula a saída d'água da eclusa a sua jusante, apresentada anteriormente na Fig. 2.6(a). As velocidades a jusante são mais altas que a montante, e a diferença aumenta com a diminuição da abertura da válvula, devendo ser verificadas e cuidadosamente projetadas, uma vez que podem criar condições de aparecimento de cavitação (USSAMI, 1980; TONDOWSKI, 1988; SANTOS, 1998).

Entre os vários tipos de válvulas testadas até 1930, (USACE, 1975), a que obteve melhores resultados foi a do tipo seguimento (em inglês, é chamada de Tainter gate, desenvolvida e patenteada em 1885 por Jeremiah B. Tainter). Este modelo é constituído por uma placa convexa (segmento de um cilindro, a comporta), onde, os braços são submetidos a forças de compressão e o eixo de giro situa-se a jusante da comporta. Com a construção de eclusas de queda maiores, este tipo de válvula apresentou problemas com entrada de ar nos condutos pelo poço da comporta no trecho acelerado do escoamento. Palmier (1990) relata que as investigações em modelo reduzido mostraram uma significativa redução de pressão na face vedante durante a manobra de abertura da válvula, resultando em grandes quantidades de ar arrastadas para o aqueduto. O ar expelido na câmara causava perturbações devido a erupções na superfície da água, podendo ser danoso a pequenas embarcações. A solução veio invertendo o eixo de giro, conforme Fig. 2.7, onde a válvula de segmento invertido tem seus braços a montante (USACE, 1975 e PALMIER, 1990).

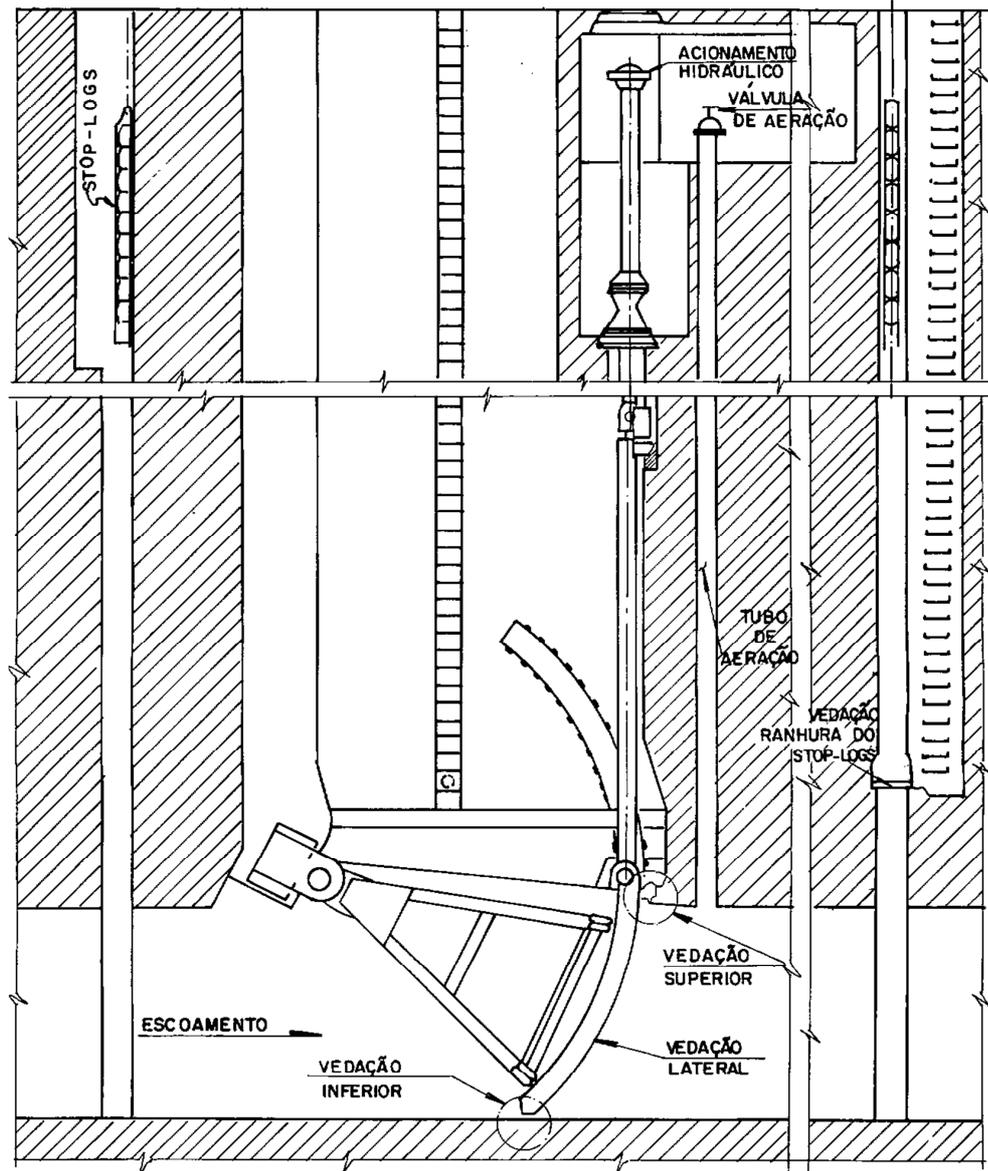


Figura 2.7 – Desenho da válvula tipo segmento invertida.
Fonte: Palmier (1990).

De acordo com USACE (2006), nos projetos mais recentes de eclusas são utilizadas as válvulas de segmento invertida (reverse Tainter) para controle da vazão, assim como estão substituindo as do tipo segmento (convencional) em obras mais antigas. Isto deve-se ao funcionamento ser comprovadamente satisfatório, segundo USACE (1975), e quanto a sua simplicidade, durabilidade e menor manutenção mecânica (RICHARDSON, 1964 *apud* TONDOWSKI, 1988 e PALMIER, 1990). Os demais modelos de válvulas (de construção mais simples) podem ser aplicados, porém com restrições as solicitações de carga e entrada de ar.

3 PARÂMETROS DE VÁLVULAS DE CONTROLE EM ECLUSAS

Nos trabalhos de desenvolvimento de sistemas de eclusagem verifica-se, nas notas técnicas do corpo de engenheiros americanos (USACE) e nas demais referências utilizadas, que determinados parâmetros são comuns entre eles. Entre estes parâmetros pode-se citar a perda de carga total e localizada, pressões mínimas e suas relações com a geometria e da contração do jato, logo a jusante da válvula de controle. Outros parâmetros podem ser calculados a partir destes, que podem fornecer condições para a otimização das leis de manobra.

3.1 PERDA DE CARGA

Em um escoamento a perda de carga representa as irreversibilidades das conversões da energia mecânica deste. A perda de carga total, segundo Fox e MacDonald (2001), é considerada como a soma das perdas de carga distribuídas, devidas aos efeitos do atrito no escoamento completamente desenvolvido em tubos com seção constante, com as perdas localizadas, devidas a entradas, acessórios e mudanças de área. A perda de carga distribuída (h_l) pode ser obtida através da Eq. 2.1.

$$h_l = f \frac{L}{D_R} \frac{V^2}{2g} \quad (3.1)$$

onde f é o fator de atrito, D_R é o diâmetro da tubulação, L é o comprimento e V é a velocidade média do escoamento, Fox e MacDonald (2001). O fator de atrito pode ser obtido através do diagrama de Moody, para valores conhecidos do número de Reynolds e da rugosidade relativa (e/D_R), sendo e a rugosidade da superfície.

As perdas localizadas (h_{lm}) podem se obtidas através da Eqs. 2.2 ou 2.3, as quais relacionam o comprimento equivalente (L_e) e o coeficiente de perda de carga (K), respectivamente, conforme mostrado na sequência.

$$h_{lm} = f \frac{L_e}{D_h} \frac{V^2}{2g} \quad (3.2)$$

$$h_{lm} = K \frac{V^2}{2g} \quad (3.3)$$

O coeficiente de perda de carga (K) pode ser determinado experimentalmente, conhecendo-se os valores das cargas hidráulicas, a montante e a jusante, e velocidade média de entrada.

No caso dos dutos das válvulas do tipo segmento invertido, estes possuem seção quadrada ou retangular, com isso utiliza-se o diâmetro hidráulico, D_h , dado pela Eq. 2.4:

$$D_h \equiv \frac{4A}{Pe} \quad (3.4)$$

onde A é a área da seção e Pe o perímetro molhado da seção.

Segundo Santos (1998), Palmier (1990), Tondowski (1988) e USACE (1975 e 2006), por exemplo, os cálculos para o enchimento e esvaziamento que podem ser obtidos de forma direta são aqueles em função da vazão e dependentes da perda de carga localizada. Estas perdas de carga correspondem à perda de energia no circuito hidráulico, geralmente identificados pelos trechos da tomada d'água, dos condutos (e curvas), da válvula e da saída, como apresentada na Fig. 3.1. A diferença entre as cargas varia no tempo devido a variação da diferença do nível d'água, entre o reservatório e câmara durante os processos de enchimento e esvaziamento, e das leis de manobra de abertura das válvulas.

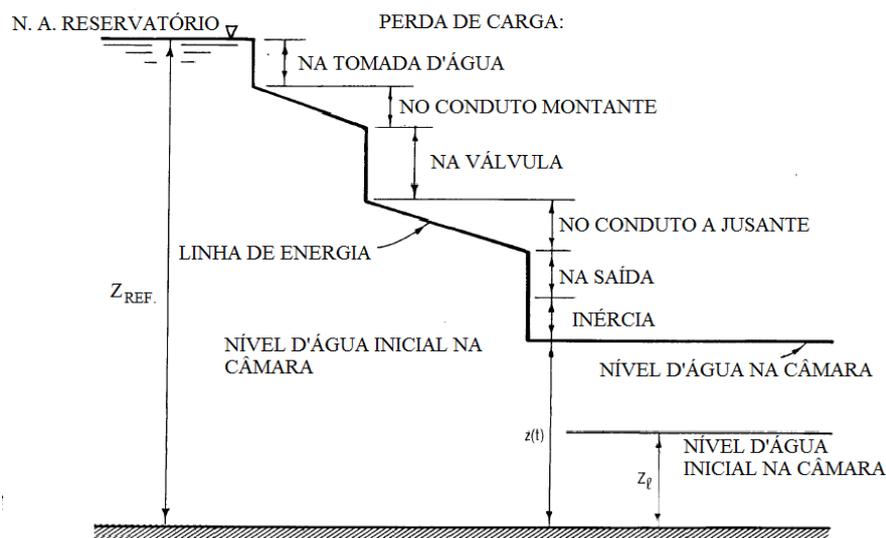


Figura 3.1 – Linha de energia atribuída a perda de carga em sistema de eclusagem.

Fonte: adaptado de USACE (1975).

Na entrada e/ou saída de dispositivos com canto vivo, pode ocorrer a separação do

escoamento nas quinas, formando o que se chama de *vena contracta*, onde o fluido é acelerado ao passar pela seção reduzida, Fig. 3.2(a). As perdas de energia mecânica são verificadas quando ocorre a desaceleração devido a expansão da seção, preenchendo novamente o duto, Fig. 3.2(b). A forma da entrada ou saída também pode ser relacionada ao coeficiente de perda localizada (maior para canto vivo e menor para canto arredondado). Para as expansões e contrações súbitas o coeficiente de perda localizada baseia-se no maior valor de $V^2/2$, isto é, a velocidade média da menor área (entre a montante e a jusante). Nas Figs. 3.2(a-b) é utilizado como exemplo um esquema simplificado de uma válvula de enchimento e esvaziamento de eclusas do tipo segmento invertida.

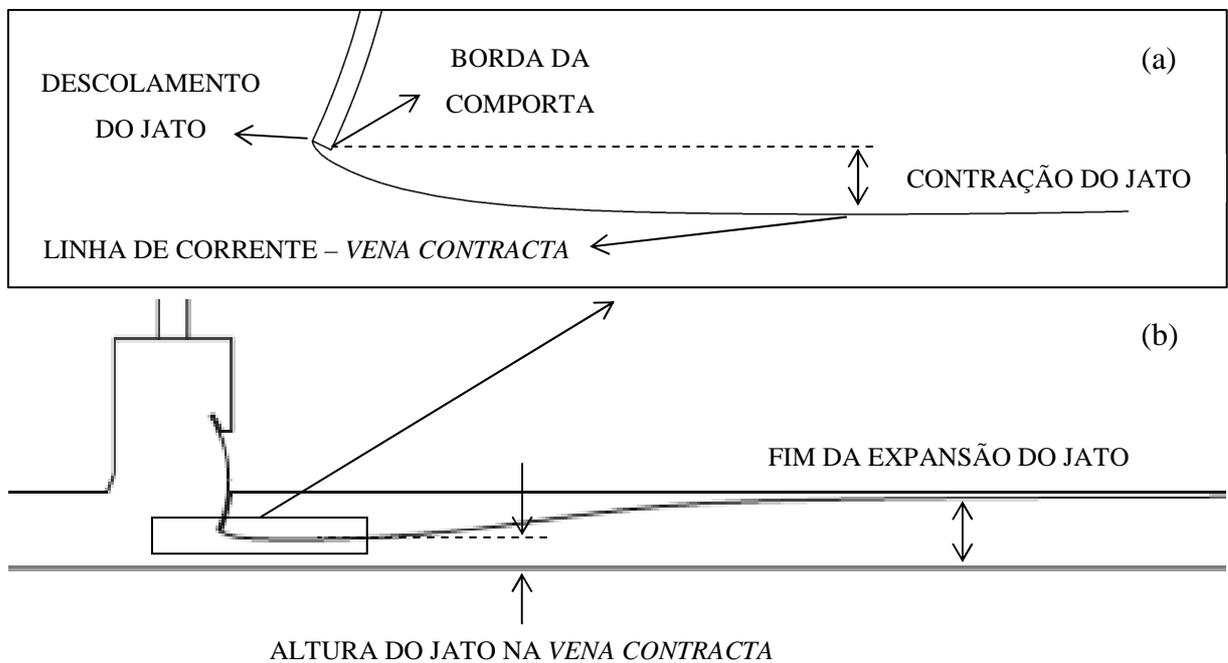


Figura 3.2 – Esquema simplificado de uma válvula do tipo segmento invertida: (a) detalhe aumentado na região da comporta e (b) vista frontal.

Entre as principais características investigadas para válvulas de controle destes sistemas está a perda de carga. Para válvulas do tipo segmento invertidas, USACE (1975) apresenta um gráfico que relaciona a perda de carga na válvula (K_V) com a relação de áreas da abertura pelo aqueduto, conforme pode ser visto na Fig. 3.3.

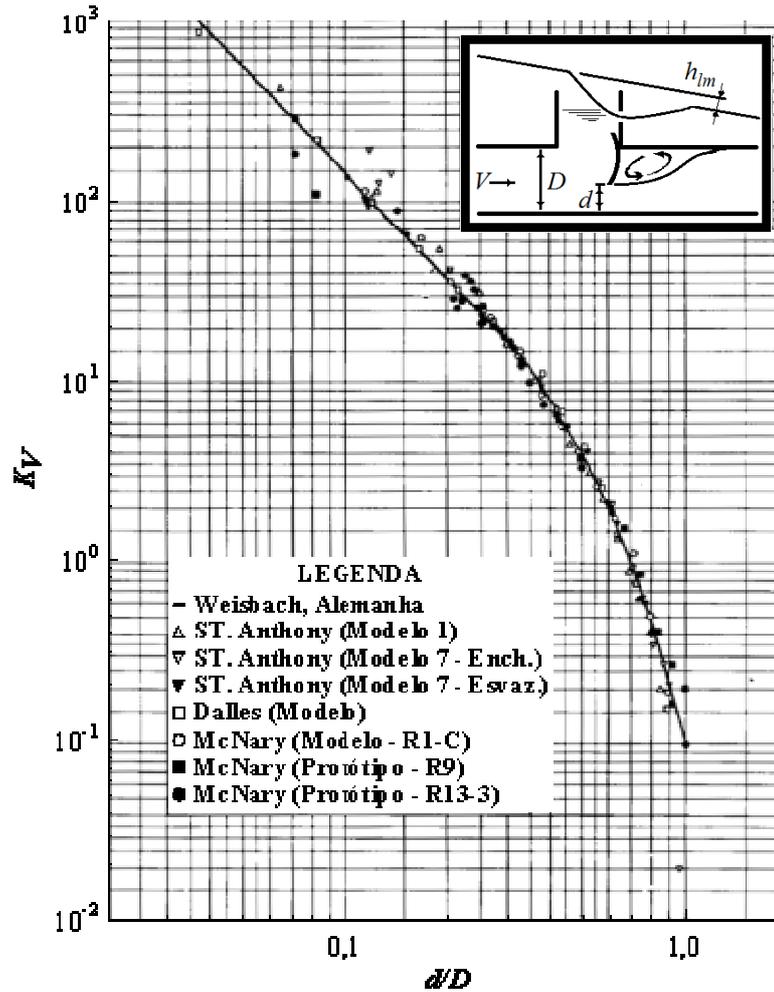


Figura 3.3 – Coeficiente de perda de carga localizada em válvulas de segmento invertidas.
Fonte: adaptado USACE (1975).

3.2 PRESSÃO MÍNIMA

Assim como observado nos casos de entrada e saída das expansões, na borda da comporta também ocorre separação do escoamento, ocorrendo a formação da *vena contracta*, conforme pode ser visto na Fig. 3.4. A pressão mínima média do jato (P_{VC}), na sessão contraída, pode ser determinada pelas equações da continuidade e Bernoulli (Eq. 2.5) com base na pressão média na sessão onde o jato já está totalmente expandido (P_2) (USSAMI 1983).

$$\frac{P_{VC}}{\gamma} = \frac{P_2}{\gamma} + (Z_2 - Z_1) + (D - C_c d) + \left[1 - \left(\frac{1}{C_c \frac{d}{D}} \right) \right] \frac{V_2^2}{2g} \quad (3.5)$$

onde γ é o peso específico d'água, Z_1 é cota da base do conduto a montante da comporta, Z_2 é a cota da base do conduto a jusante da comporta, D é a altura do conduto quando este é igual a montante e a jusante, C_C é coeficiente de contração do jato (altura do jato/ d), d é a abertura (altura em relação a base) e V_2 a velocidade na seção onde o jato está totalmente expandido.

A Figura 3.4, além de identificar as regiões em que ocorrem a *vena contracta* e recirculações após a passagem do fluido pela válvula, ela também apresenta as linhas de energia e piezométrica média.

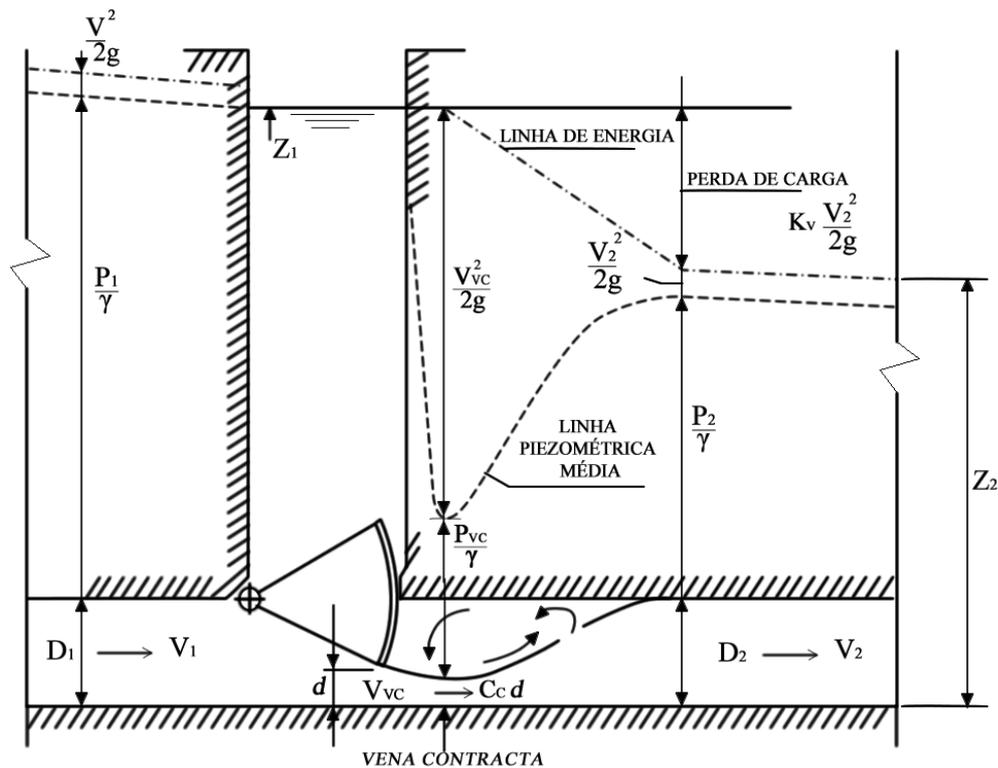


Figura 3.4 – Linha de energia e piezométrica.
Fonte: adaptado Ussami (1983).

4 PROJETO DE PESQUISA

Segundo Massey (2002), os problemas de escoamento raramente são resolvidos por aplicação exclusiva da análise teórica, recorrendo-se então, a estudos experimentais. Esta prática deve-se às teorias baseadas em hipóteses simplificativas que podem não ser satisfeitas na situação em estudo. Para o estudo comparativo é comum a utilização de modelos reduzidos, devido as vantagens econômicas e de tempo quando são testadas inúmeras modificações seguidas. Ainda segundo o autor, as comparações normalmente são feitas entre protótipo (produto em escala real) e modelo, sem necessariamente utilizarem os mesmos fluidos e o modelo ser menor que protótipo.

Para que os resultados obtidos através de modelos, experimentais ou numéricos, tenham validade e possam ser empregados em protótipos, modelo e protótipo devem ser geometricamente, cinematicamente e dinamicamente semelhantes. A primeira semelhança é garantida quando modelo e protótipo possuem forma idêntica, diferenciando-se apenas por um fator de escala constante. Outra similaridade a ser verificada é a cinemática, que para ser obtida deve manter uma razão de velocidade que permita a formação de padrões de linhas de corrente geometricamente semelhantes (MASSEY, 2002). A importância do estudo em modelo é mais frequentemente direcionada a semelhança dinâmica, devido ao maior interesse sobre as forças atuantes no sistema, contudo, dependem das demais similaridades Tondowski (1988).

No caso das eclusas, por possuírem grandes dimensões, o estudo em protótipos torna-se limitado quanto á alterações geométricas, operacionais e econômicas, favorecendo o estudo em modelos de dimensões reduzidas. Para estudo em modelos reduzidos, Battiston *et al.* (2009) descrevem as características da bancada de teste e as condições de operação utilizadas nos ensaios do modelo experimental. Onde os autores destacam a aplicação para avaliação de alternativas geométricas na redução do potencial de cavitação. Battiston *et al.* (2009a) e Dalla Corte *et al.* (2011 e 2012) fizeram comparações entre este modelo experimental e modelos numéricos para a mesma geometria. No trabalho de Santos *et al.* (2012), são avaliadas as alterações geométricas no teto, logo a jusante da comporta, comparando-as com as pressões no teto entre os modelos experimental e numérico original (mesmas dimensões do experimental).

4.1 INSTITUTO DE PESQUISAS HIDRÁULICAS – IPH (UFRGS)

Os modelos experimentais de eclusas são normalmente construídos em escalas reduzidas entre 8 a 32 vezes menor que protótipo, possibilitando assim a construção dentro de um laboratório. Entre os exemplos de laboratórios que trabalham com modelos experimentais, pode-se citar o Laboratório de Obras Hidráulicas do Instituto de Pesquisas Hidráulicas, IPH/UFRGS, situado em Porto Alegre. Suas principais linhas de pesquisas são: estruturas hidráulicas, obras de proteção contra erosão, ensecadeiras (barreiras para desviar o curso d'água), canais e galerias de desvio, sistemas de proteção contra cheias, obras de engenharia costeira e impactos hidráulicos e sedimentológicos de obras hidráulicas.

Os trabalhos desenvolvidos pelo IPH em estruturas hidráulicas incluem pesquisas em vertedores, tomadas de água, barragens de navegação e eclusas. Estudam-se também os comportamentos hidráulicos de grandes sistemas hídricos: deltas, estuários, lagoas, áreas costeiras.

4.2 MODELOS DE VÁLVULAS DE ECLUSA DE NAVEGAÇÃO

A UNISINOS e o IPH, em nome da Profa. Dra. Rejane De César Oliveski e do Prof. Dr. Marcelo G. Marques, respectivamente, desenvolvem pesquisa conjunta desde 2009. Esta parceria sempre foi realizada através de abordagens experimentais, por parte do IPH, e numéricas por parte da UNISINOS.

A cooperação UNISINOS-IPH iniciou com o projeto ANNEL/FURNAS, intitulado "Estudo do Escoamento a Jusante de Válvula de Eclusa" e finalizado em 2011. Dessa parceria, mais dois projetos foram aprovados: (a) AQUECLUSA-Análise dos esforços hidrodinâmicos a jusante de válvula de sistemas de enchimento/esvaziamento de eclusas de navegação (Edital FINEP 02/2010 Construção Naval e Transporte Aquaviário) e (b) Formação de Vórtices em Tomadas D'Água de Usinas Hidrelétricas (Código ANEEL PD-0394-0912/2011). Observa-se que o objeto de análise do primeiro projeto da série (já finalizado) e do projeto AQUECLUSA é o mesmo: válvula de eclusa de navegação.

4.2.1 Modelo Experimental

No IPH foi construído um modelo de válvula eclusa, em escala 1:16, baseado nas características construtivas daquelas existentes nas Usinas Hidrelétricas de Tucuruí e Santo

Antônio. A bancada onde está instalada a válvula é composta por um conduto principal de seção quadrada com aresta de 0,25 m e comprimento de 8,9 m, onde são obtidas as tomadas de pressão. É utilizada uma válvula do tipo segmento invertida, com raio de 0,38 m, instalada dentro de uma câmara. A câmara possui 0,4 m de largura e 0,75 m de altura, e nela está instalada uma chaminé de equilíbrio com 2,5 m. Este modelo é apresentado na Fig. 4.1.



Figura 4.1 – Modelo experimental instalado no LOH-UFRGS.
Fonte: Battiston *et al.* (2009).

Neste modelo experimental são medidas as pressões na base e no teto do conduto imediatamente a jusante da comporta. De acordo com os dados apresentados no trabalho de Battiston *et al.* (2009), as pressões foram medidas com 30 transdutores distribuídos ao longo do teto e da base (na simetria da válvula, Fig. 4.1(b)). Sendo estes instalados com espaçamento de 0,05 m (entre eles) próximos à comporta e aumentando para 0,1, 0,2 e 0,4 m em direção à saída. Os autores apresentam ainda as características da capacidade de operação

da válvula, Tab. 4.1, sendo as vazões máximas limitadas a carga a montante para que não ocorra o transbordamento da câmara. Enquanto que para a vazões mínimas são impostas pela condição de manter o conduto cheio, conforme apresentado na Fig. 4.2.

Tabela 4.1: Características

a [%]	Q [m ³ /s]	
	Mínima	Máxima
10	0,022	0,032
30	0,022	0,090
50	0,022	0,180
60	0,022	0,220
70	0,022	0,220
80	0,022	0,220
100	0,022	0,220

Fonte: adaptado Battiston *et al.* (2009).



Figura 4.2 – Limitações do modelo experimental instalado no LOH-UFRGS.

Fonte: adaptado de Battiston *et al.* (2009).

4.2.2 Modelo Numérico

No projeto de pesquisa, que é base do presente trabalho, o modelo numérico foi utilizado primeiramente bidimensional, como descrito em Battiston *et al.* (2009a) baseado no modelo experimental do IPH (mesma escala), citado no item anterior. Já para o modelo numérico 3D foi construído um modelo numérico na UNISINOS. O modelo numérico que tenta reproduzir os resultados experimentais do IPH é tridimensional e conta com as equações da conservação da massa e quantidade de movimento. O modelo numérico, juntamente com condições experimentais, foi implementado no software comercial CFX. O domínio de

cálculo é mostrado na Fig. 4.3, a qual identifica a câmara, comporta, a abertura (a [%]), chaminé de equilíbrio e dutos a montante e jusante da câmara.

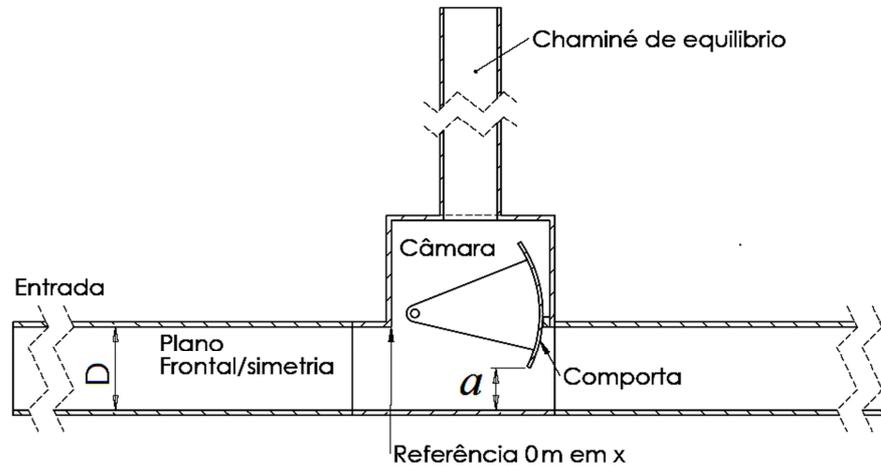


Figura 4.3 – Domínio de cálculo do modelo numérico original.

4.2.3 Modelo Experimental x Modelo Numérico

A validação do modelo numérico foi obtida com uma série de simulações com aberturas de 10 à 100% e vazões volumétricas de 0,028 a 0,180 m³/s. Os resultados obtidos pelo grupo de pesquisa podem ser conferidos em Dalla Corte *et al.* (2011 e 2012). Os resultados obtidos pelo grupo de pesquisa podem ser conferidos em Dalla Corte *et al.* (2011 e 2012). O modelo numérico reproduziu os perfis de pressões médias com boa aproximação dos obtidos experimentalmente. As diferenças observadas no estudo foram mais acentuadas na zona da *vena contracta*, aumentando com o aumento de vazão e diminuição da área de abertura. Outro parâmetro analisado foi o coeficiente de perda de carga da válvula (K_V) referenciado em USACE (1975) como parâmetro de comparação, onde se obteve uma excelente aproximação com os valores da literatura.

No trabalho de Dalla Corte *et al.* (2011) foram investigadas as diferenças de pressão entre os modelos numérico e experimental, nas quais obteve-se resultados muito próximos ao desvio padrão do experimental. Este desvio aumentou com o aumento da vazão e os valores da diferença de pressão também aumentaram com a diminuição da abertura (fechamento), como pode ser visualizado na comparação entre as Figs. 4.4-5. Ainda segundo os autores, verificaram que a maior diferença entre os modelos ocorre na região da *vena contracta*, diminuindo quanto mais próximo à saída, e que em baixas aberturas a diminuição da pressão indica uma região crítica para a ocorrência de cavitação.

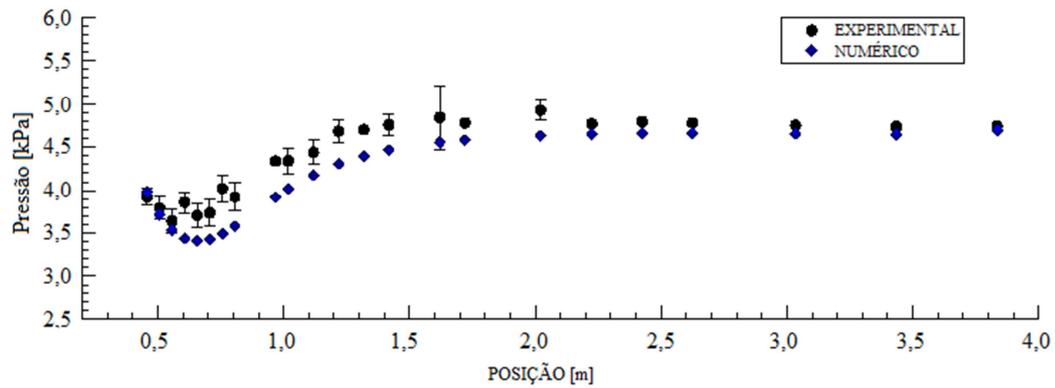


Figura 4.4 – Pressão na base vs. comprimento do conduto: $a = 70\%$ e $Q = 0,09 \text{ m}^3/\text{s}$.
Fonte: Dalla Corte *et al.* (2011).

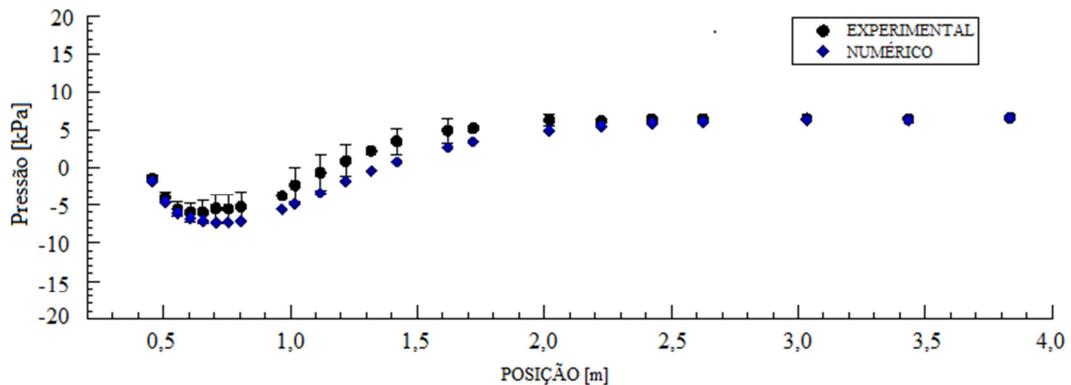


Figura 4.5 – Pressão na base vs. comprimento do conduto: $a = 50\%$ e $Q = 0,18 \text{ m}^3/\text{s}$.
Fonte: Dalla Corte *et al.* (2011).

Nas Figuras 4.6-7 Dalla Corte *et al.* (2011) apresentam graficamente o desvio padrão das medições no modelo experimental e a diferença da média (dos ensaios) com os valores do modelo numérico esperados na base. Pode-se observar Como exemplo das comparações realizadas pelos autores, na Fig. 4.6, encontraram em alguns pontos valores da diferença entre os modelos com o dobro do valor do desvio padrão do modelo experimental, para $a=70\%$ e $Q=0,09 \text{ m}^3/\text{s}$. Na Figura 4.7, para $a=50\%$ e $Q=0,18 \text{ m}^3/\text{s}$, as diferenças entre os modelos ficaram mais próximas ao desvio padrão dos ensaios (experimental).

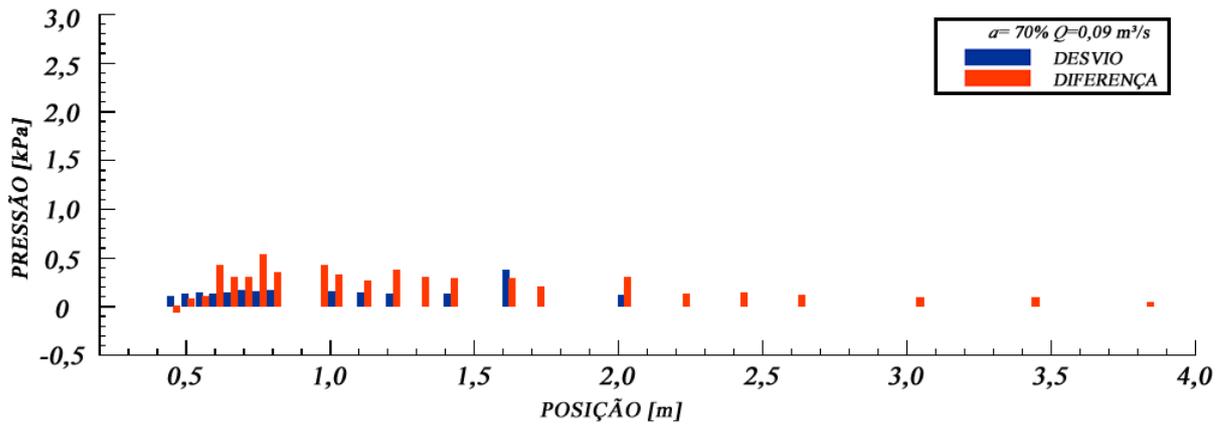


Figura 4.6 – Pressão na base vs. comprimento do conduto: $a = 70\%$ e $Q = 0.09 \text{ m}^3/\text{s}$.
Fonte: Dalla Corte *et al.* (2011).

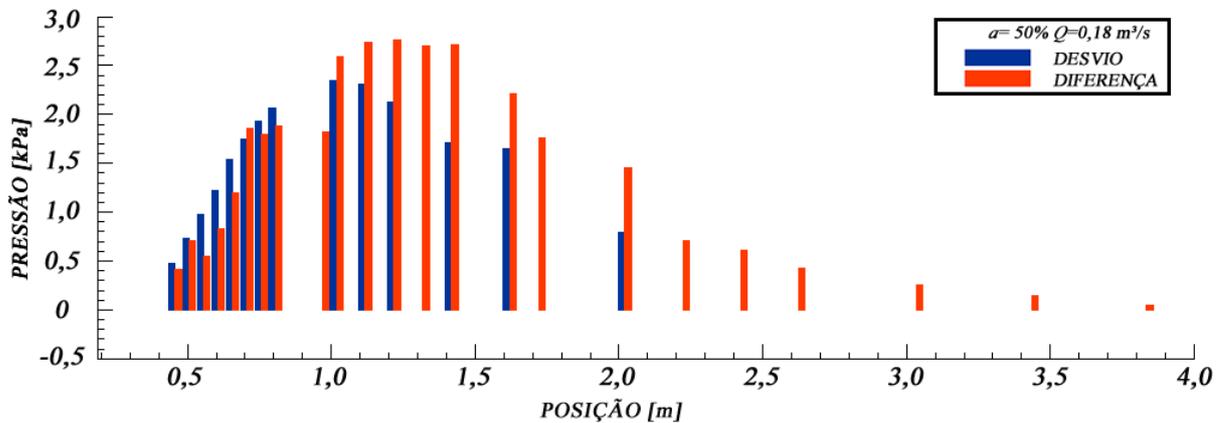


Figura 4.7 – Pressão na base vs. comprimento do conduto: $a = 50\%$ e $Q = 0.18 \text{ m}^3/\text{s}$.
Fonte: Dalla Corte *et al.* (2011).

Dalla Corte *et al.* (2012) constataram que o coeficiente de contração C_C também obteve os valores mínimos em aberturas entre 30 e 50%, comparado com outros casos encontrados na literatura. Nos casos com aberturas menores os resultados obtidos apresentaram boa aproximação, enquanto que para aberturas maiores os valores obtidos foram ligeiramente superiores aos da literatura, Figura 4.8:

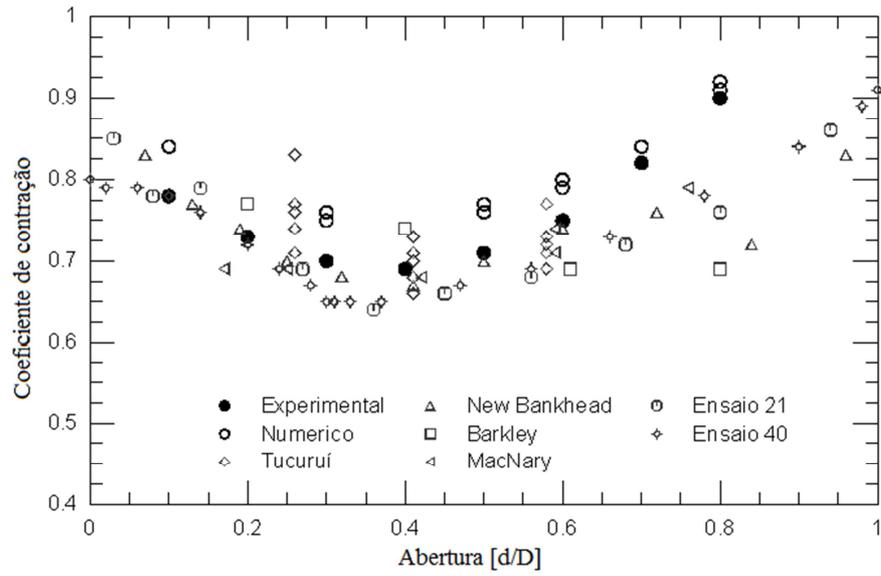


Figura 4.8 – Coeficiente de contração vs. abertura da válvula.

Fonte: Dalla Corte *et al.* (2012).

5 PROBLEMA ATUAL

Este estudo faz parte do Projeto FINEP AQUECLUSA, onde foram previstas construções de modelos reduzidos (numéricos e experimentais) e cujo objetivo é aprimorar os conhecimentos sobre os escoamentos em válvulas de enchimento e esvaziamento de eclusas. Deste modo, a cooperação entre as instituições UFPEL, UFRGS, UNISINOS e URI faz-se através da troca e realimentação de dados obtidos experimental e numericamente.

O presente estudo tem como motivação o estudo de alterações geométricas a jusante de válvulas de enchimento e esvaziamento de eclusas de navegação. Busca-se conhecer qual a contribuição de cada tipo de geometria testada na redução dos efeitos nocivos encontrados durante a operação das mesmas. Entre os principais problemas estão a erosão, vibrações nas estruturas da válvula, perturbações na câmara de eclusagem, estes muitas vezes associados à cavitação.

As pesquisas atuais têm investigado novas geometrias para os aquedutos da região das comportas e sugerem uma expansão no teto, ocasionando com isso, um aumento da perda de carga localizada e uma redução do potencial de cavitação do escoamento (PICKERING, 1981 e PERKINS, 1979 apud USACE, 2006). As pesquisas têm indicado que a expansão no teto de 1:10 é a mais interessante em termos de ganho de pressão e que quanto mais próximo da comporta estiver o início da expansão, mais eficiente ela será (SANTOS, 1998). Shiqin *et al.* (1999) estudaram o rebaixamento da válvula e a introdução de expansões laterais. Os autores concluíram que com o rebaixamento da comporta, ocorre a elevação da pressão média, e o conduto com maiores dimensões a jusante das comportas auxilia na redução das velocidades, reduzindo o potencial de cavitação do escoamento. Shengyi *et al.* (2005) avaliaram numericamente a combinação das expansões do teto e da base do aqueduto. Os autores verificaram que essa geometria apresentou um escoamento mais estável devido ao maior espaço existente a jusante das comportas, reduzindo a velocidade e a melhorando as pressões nesta região em comparação com a geometria que possui somente expansão no teto.

As “alterações geométricas” propostas neste trabalho dizem respeito à geometria apresentada na Fig. 4.3, que foi objeto de análise em trabalhos anteriores do grupo de pesquisa e que será chamada daqui por diante de geometria original, ou $L_{exp} = 0$. Assim, as alterações geométricas consistem nas alterações do teto, logo a jusante da comporta, em relação à geometria da Fig. 4.3. A Figura 5.1 mostra a representação genérica das alterações realizadas durante o desenvolvimento deste trabalho.

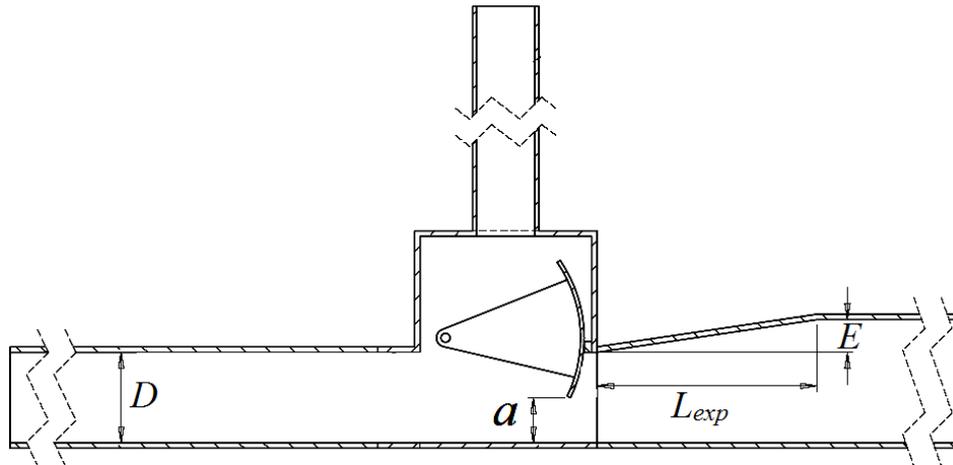


Figura 5.1 – Desenho esquemático da expansão para o teto.

Para a configuração mostrada na figura anterior foi mantida a relação $1E:10L_{exp}$ e construído 3 diferentes geometrias, com comprimentos (L_{exp}) de 0,3, 0,6 e 0,9 m, mantendo-se assim constante a inclinação constante do teto.

5.1 ABORDAGEM NUMÉRICA

A fluidodinâmica computacional (ou em inglês, *Computational Fluid Dynamics*, CFD) é uma ferramenta de simulação numérica que envolve a predição das características de escoamento dos fluidos. Com a evolução da capacidade de processamento dos computadores, o emprego de programas CFD tornou-se uma ferramenta de grande utilização, tanto em pesquisa como na indústria. Existem muitos softwares comerciais de CFD no mercado, entre os quais podem ser citados o FLOW-3D, FLUENT e CFX. Este último é disponibilizado no laboratório no laboratório de simulação numérica do programa de pós-graduação em Engenharia Mecânica da UNISINOS.

O CFX utiliza o método de solução conhecido como volumes finitos, onde, a região a ser analisada é dividida em sub-regiões, chamadas de volume de controle. As equações são resolvidas iterativamente para cada volume. Como resultado, uma aproximação do valor para cada variável em todo domínio pode ser obtida. Para a utilização dos recursos, o software possui pacotes independentes, como os módulos para construção da malha computacional (ICEM-CFD), para pré-processamento (CFX-Pre), para processamento (CFX-Solver Manager) e para a análise de resultados o pós-processador CFD-Post.

5.2 MODELO MATEMÁTICO

O nível de água na chaminé de equilíbrio da câmara, onde está localizada a comporta, pode variar significativamente durante a operação, principalmente para altos números de Reynolds. O problema abordado envolve escoamentos com número de Reynolds na ordem de 10^5 , portanto, tanto o modelo numérico quanto o modelo matemático devem ser capazes de absorver as variações na altura d'água da chaminé. Existem pelo menos duas possibilidades de atender este requisito físico. Uma delas é utilizar um modelo monofásico (apenas água) com fronteira móvel na chaminé ou utilizar um modelo bifásico, com fronteira rígida, mas incorporando no domínio computacional toda a extensão da chaminé de equilíbrio, a qual é preenchida parcialmente por água e completada com ar. Neste trabalho optou-se por utilizar um modelo numérico em que todas as fronteiras são fixas. Assim, o modelo numérico apropriado implica que este seja bifásico, água-ar.

O modelo matemático é composto pelas equações da conservação da massa, quantidade de movimento e equações do modelo de turbulência. Para a conservação da massa são necessárias duas equações, uma para água, Eq. 5.1, e outra para o ar, Eq. 5.2.

$$\frac{\partial(r_\alpha \rho_\alpha)}{\partial t} + \frac{\partial(r_\alpha \rho_\alpha u)}{\partial x} + \frac{\partial(r_\alpha \rho_\alpha v)}{\partial y} + \frac{\partial(r_\alpha \rho_\alpha w)}{\partial z} = 0 \quad (5.1)$$

$$\frac{\partial(r_\beta \rho_\beta)}{\partial t} + \frac{\partial(r_\beta \rho_\beta u)}{\partial x} + \frac{\partial(r_\beta \rho_\beta v)}{\partial y} + \frac{\partial(r_\beta \rho_\beta w)}{\partial z} = 0 \quad (5.2)$$

onde r_α e r_β são as frações volumétrica da água e do ar e u , v e w as componentes de velocidade na direção dos eixos x , y e z respectivamente.

O problema possui característica tridimensional, assim, é incluída no modelo matemático três para quantidade de movimento Eqs. 5.3-5, para as direções x , y e z , respectivamente.

$$\rho_m \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) = - \frac{\partial p'}{\partial x} + \mu_{\text{eff}} \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + v \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + w \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \quad (5.3)$$

$$\rho_m \left(\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) = - \frac{\partial p'}{\partial x} + \mu_{\text{eff}} \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + v \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + w \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) + \rho g_y \quad (5.4)$$

$$\rho_m \left(\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) = - \frac{\partial p'}{\partial x} + \mu_{eff} \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + v \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + w \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) \quad (5.5)$$

onde ρ_m é a massa específica da mistura, definida na Eq. 5.6, o termo ρg_y representa o termo fonte devido à gravidade (atuando somente na fase líquida), p' é a pressão modificada, definida em função da pressão estática e energia cinética turbulenta Eq. 5.7, e μ_{eff} é a viscosidade efetiva, Eq. 5.8, conforme mostrado na sequência.

$$\rho_m = r_\alpha \rho_\alpha + r_\beta \rho_\beta \quad (5.6)$$

$$p' = P + \frac{2}{3} \rho k \quad (5.7)$$

$$\mu_{eff} = \mu_m + \mu_t \quad (5.8)$$

onde μ_m é a viscosidade da mistura (Eq. 5.9), e μ_t é a viscosidade turbulenta (Eq. 5.10).

$$\mu_m = r_\alpha \mu_\alpha + r_\beta \mu_\beta \quad (5.9)$$

$$\mu_t = C_\mu \rho \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (5.10)$$

onde C_μ é constante do modelo de turbulência, k é a energia cinética turbulenta e ε é a taxa dissipação cinética turbulenta, calculados pelo modelo de turbulência. O modelo de turbulência utilizado é o k - ε , por ser um modelo simples e robusto e os trabalhos de validação mostraram resultados bastante satisfatórios.

Por se tratar de um modelo bifásico, além das equações anteriormente citadas, é necessário incluir ainda ao modelo matemático uma equação para a conservação da fração volumétrica de uma das fases (água) (Eq. 5.11). Também é necessário utilizar uma restrição, Eq. 5.12, a qual impõe que a soma das frações volumétricas, de ambas as fases em cada volume de controle, seja igual a um, conforme apresentado na sequência:

$$\frac{\partial(r_\alpha)}{\partial t} + \frac{\partial(r_\alpha u)}{\partial x} + \frac{\partial(r_\alpha v)}{\partial y} + \frac{\partial(r_\alpha w)}{\partial z} = 0 \quad (5.11)$$

$$r_\alpha + r_\beta = 1 \quad (5.12)$$

5.2.1 Condições iniciais e de contorno

Os casos simulados abrangem uma faixa de Reynolds na ordem de 10^5 , em regime de escoamento subsônico. Na entrada, são utilizados como condições de contorno os perfis de velocidade desenvolvidos, de energia cinética turbulenta e de dissipação da energia cinética turbulenta. Os perfis foram extraídos de uma simulação prévia em um duto quadrado, de seção igual a entrada, com comprimento de 50 m entre a entrada e a saída (pressão 0 Pa). O perfil desenvolvido localizou-se a uma distância de 40 m da entrada, onde retirou-se os campos de velocidade, energia e a dissipação da energia cinética turbulenta. Na saída, utilizou-se uma expressão para a variação linear da pressão com a altura, baseada em dados experimentais. Nas paredes são empregadas as condições de não escorregamento, “*no slip wall*”, e parede lisa, “*smooth wall*”, exceto no tubo da chaminé que utilizou-se escorregamento livre na parede, “*free slip wall*”. No topo da chaminé, aplicou-se condição de abertura e pressão estática de 1 Pa. Para a redução da carga computacional foi simulado em condição de simetria na largura (eixo z)

Para estas simulações considerou-se o escoamento com interface ar-água na chaminé de equilíbrio, habilitando a função de fração volumétrica. A exemplo do ocorrido nas simulações de Dalla Corte *et al.* (2011), os valores obtidos com a simulação da geometria igual ao modelo experimental, são utilizados como condição inicial nos modelos com alteração.

5.2.2 Geração de malhas

A malha computacional utilizada é do tipo hexaédrica, com elevado refinamento próximo as paredes, conforme pode ser observado na Fig. 5.2. Com as alterações a jusante da comporta, o número total de elementos varia entre um milhão e duzentos mil e um milhão e seiscentos mil.

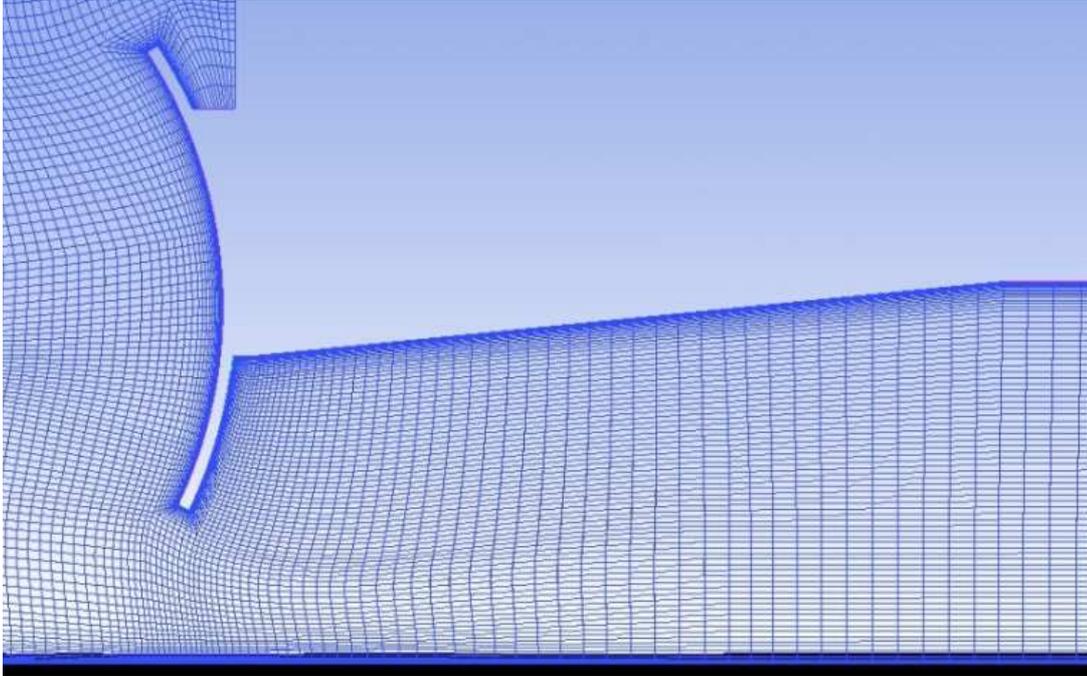


Figura 5.2 – Detalhe do refinamento da malha da válvula.

5.2.3 Simulação/Processamento

A simulação dos casos foi realizada em regime permanente, todavia o software utilizado (Ansys-CFX 12) utiliza o passo de tempo no relaxamento das equações. Para todos os casos simulados foram utilizados o passo de tempo de 0,005 s, no modo “*physical time step*”. O número de iterações variou de 1200 a 3500, devido as diferentes condições de vazão e abertura, aumentando com proporcional a velocidade na *vena contracta*. Para que se atingisse resultados com menor residual de cálculo utilizou-se dupla precisão. Como critério de convergência considerou-se os resíduos (numéricos) abaixo de 10^{-4} , nos casos mais críticos e na ordem de 10^{-5} para os demais. Durante todas simulações foram monitorados os resíduos de momentum e velocidade, de “*imbalance*” (igual a zero quando a equação da energia está em equilíbrio) e da fração de volume.

5.2.4 Pós-processamento

Para a análise dos resultados da simulação é necessário a utilização de um pós-processador, capaz de permitir a obtenção dos valores das variáveis requeridas em todo o domínio computacional. Neste caso, para o *software* CFX, o pós-processador é realizado com o módulo CFD-Post, o qual permite exportar resultados em arquivos de texto para posterior análise gráfica. Dentro dos recursos deste pós-processador pode-se utilizar rotinas (códigos de

programação) para facilitar a obtenção dos dados, principalmente quando são várias variáveis e vários casos. Na Figura 5.3, por exemplo, a rotina utilizada é capaz de gerar pontos, linhas, imagens e exportar os resultados para um arquivo de texto com os valores nos pontos e distribuídos sobre as linhas. Nesta figura pode-se observar o domínio computacional, onde são identificados os principais pontos deste trabalho, como as pressões a montante na base e no teto, as pressões mínimas a jusante no teto e na base e suas respectivas posições. Pode-se observar ainda uma linha de corrente partindo da borda da comporta à saída, representando o comportamento (médio) de contração e expansão do jato, possibilitando a identificação da *vena contracta* e a menor altura do jato. Desta maneira, por manter a largura constante, o coeficiente de contração é calculado dividindo a altura do jato pela altura da abertura (d).

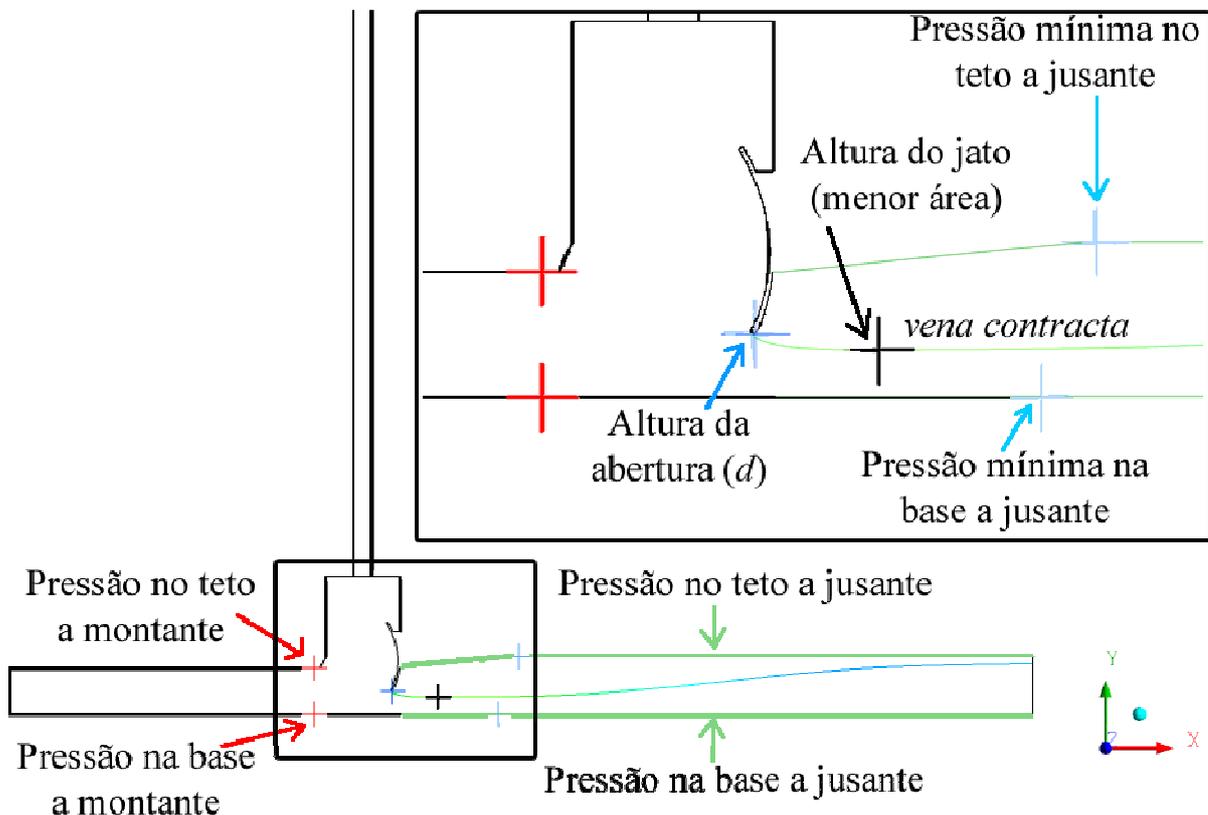


Figura 5.3 – Representação dos principais pontos gerados por rotina para análise dos resultados.

Na Figura 5.4 é apresentado um exemplo para determinação da interface ar-água, a qual pode fornecer a altura do nível d'água na chaminé de equilíbrio. Estas alturas podem variar para cada condição de operação distinta e podem variar, também, entre cada alteração no duto (de acordo com o aumento de pressão a montante provocado por diferentes perdas de carga).

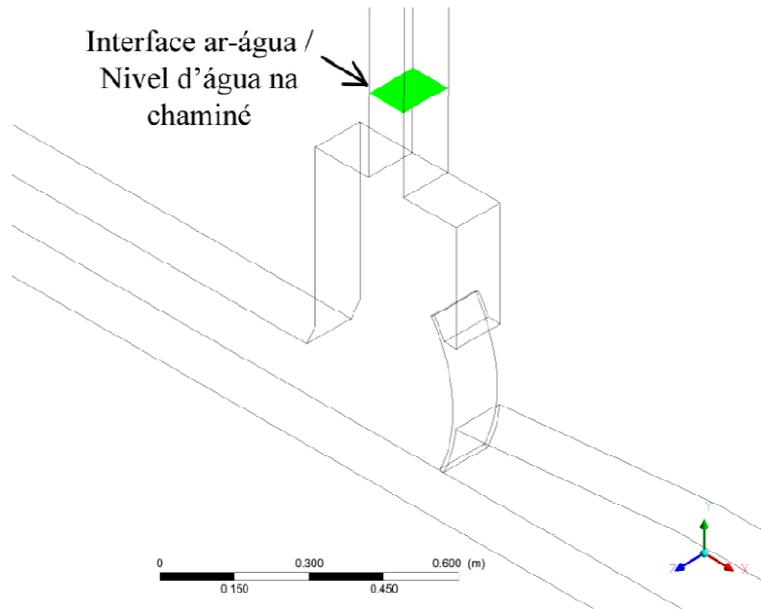


Figura 5.4 – Representação do nível d'água na chaminé de equilíbrio.

No pós-processamento também é possível visualizar como ocorrem as distribuições das pressões ao longo do domínio de computacional, pela representação do campo de pressão. Na Figura 5.5 é apresentado um exemplo para ilustrar o campo de pressão no plano de simetria da válvula, para a condição de operação de $a = 50\%$, $Q = 0,09 \text{ m}^3/\text{s}$ e $L_{exp} = 0,6 \text{ m}$. Com o campo de pressão pode-se observar de forma qualitativa, com o auxílio da legenda, pela escala de cor os locais onde podem estar ocorrendo pressões críticas.

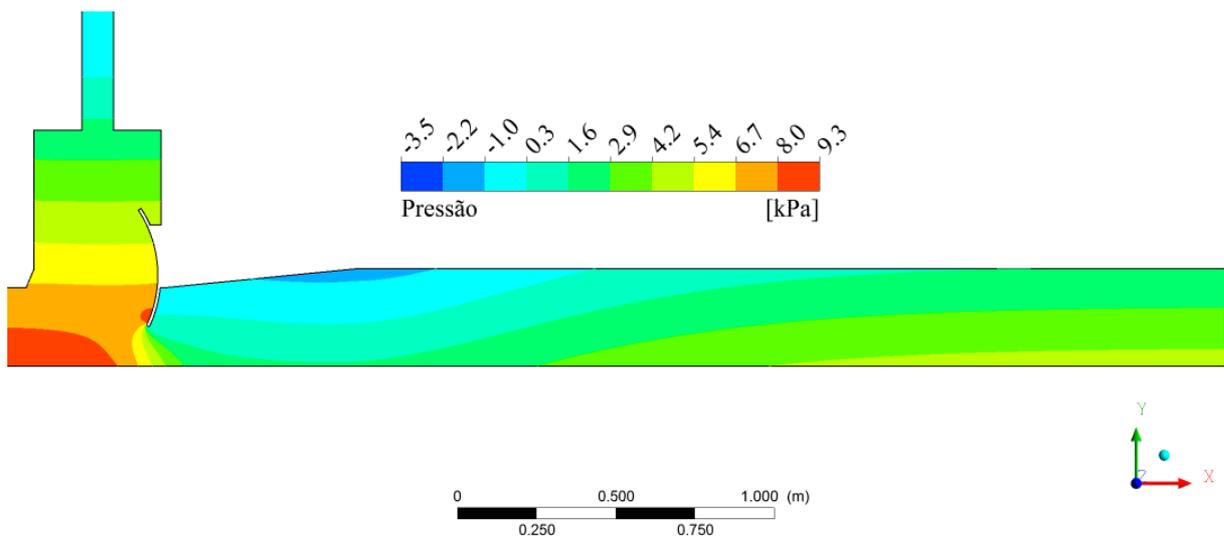


Figura 5.5 – Representação do campo (médio) de pressão.

De forma mais simplificada, para um escoamento hipotético, a Fig. 5.6 mostra o comportamento da pressão no conduto a jusante da comporta, indicando as posições L_{min} e

L_{max} , onde são verificadas, respectivamente, a mínimas e máximas pressões. Assim como neste caso hipotético, no próximo capítulo serão apresentados os resultados, para todas as condições de operação simuladas, com gráficos de aparência similar à Fig. 5.6, onde P_{max} , P_{min} , L_{max} e L_{min} serão constantemente referidos.

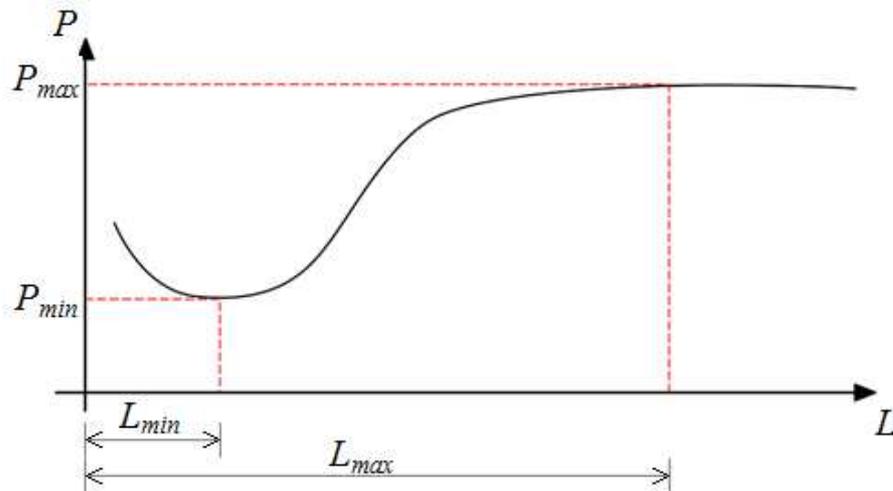


Figura 5.6 – Representação da linha piezométrica média.

6 RESULTADOS

Com o objetivo de conhecer as características hidrodinâmicas das alterações geométricas no escoamento de válvulas do tipo segmento invertida, para enchimento e esvaziamento de eclusas, foram analisados os resultados da simulação numérica. Procura-se com estes dados fornecer parâmetros que indiquem, para uma dada faixa de operação, uma geometria que alie aumento na pressão mínima (diminuir probabilidade de cavitação) e menores áreas (revestimentos contra erosões) sob condições críticas.

Inicialmente, no Item 6.1, são apresentados resultados dos campos de pressão (onde os resultados de pressão podem ser lidos através da escala de cores, sendo crescente da cor azul à cor vermelha) e linhas de corrente para os casos com a maior e a menor velocidade sob a comporta. Nestas figuras são analisadas as variações de pressão em relação aos diferentes comprimentos de expansão (L_{exp}) e condições de operação, tais como vazão volumétrica e abertura da válvula. Para fins de comparação entre as condições originais e aquelas propostas por este trabalho, também são apresentados os gráficos da variação de pressão no teto.

Também é apresentado neste Capítulo resultados para os coeficientes de contração e de perda de carga localizada. Sendo realizadas as comparações com dados de publicações utilizadas na revisão bibliográfica do presente trabalho.

6.1 VARIAÇÃO DE PRESSÃO

As Figuras 6.1(a-d) e 6.2(a-d) representam através dos campos de pressão, respectivamente, as condições de operação de maior e menor velocidade sob a comporta, assim como a maior e menor variação de pressão entre montante e jusante da comporta.. As Figuras 6.1(a-d) apresentam resultados para $a = 30\%$ e $Q = 0,18 \text{ m}^3/\text{s}$, para L_{exp} igual a 0, 0,3, 0,6 e 0,9 m, respectivamente. Já os resultados das Figs. 6.2(a-d) correspondem a $a = 70\%$ e $Q = 0,04 \text{ m}^3/\text{s}$, para os mesmos L_{exp} das Figs. 6.1(a-d).

Através das Figuras 6.1(a-d) verifica-se que, à medida que o comprimento da expansão aumenta, as pressões mínimas também aumentam, assim como a pressão a montante. Além disso, pode-se observar que o aumento de L_{exp} faz com que a recuperação da pressão ocorra numa localização mais distante da comporta, implicando em uma maior região com pressões próximas as negativas. Esta região é identificada por linhas entre a borda da comporta e mais a jusante, indicadas por setas na Fig 6.1(a) (omitidas nas Figs. 6.1(b-d)).

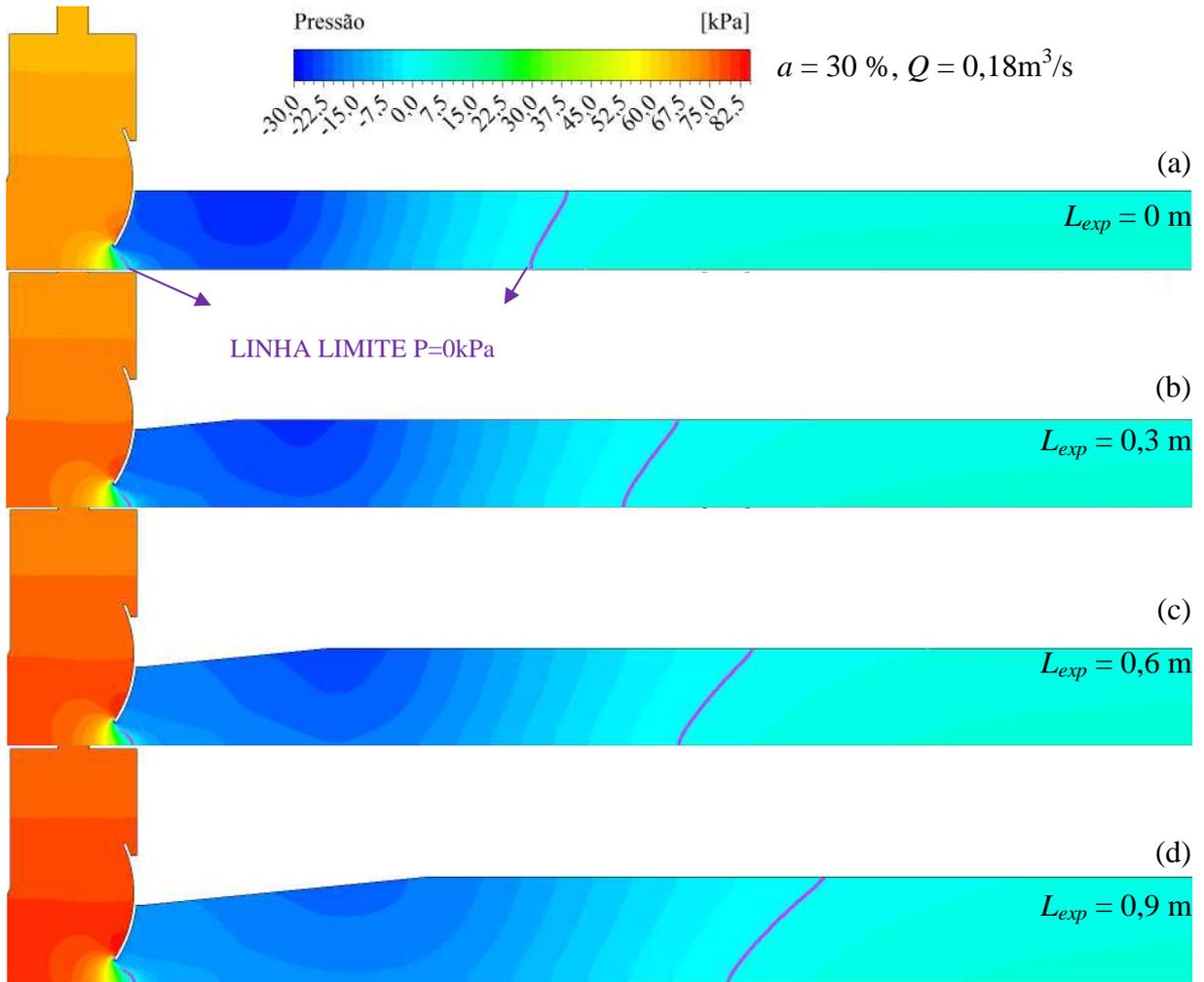


Figura 6.1 – Campo de pressão. $a = 30 \%$ e $Q = 0,18 \text{ m}^3/\text{s}$: (a) $L_{exp} = 0$, (b) $L_{exp} = 0,3 \text{ m}$, (c) $L_{exp} = 0,6 \text{ m}$ e (d) $L_{exp} = 0,9 \text{ m}$.

As Figuras 6.2(a-d) mostram resultados de campos de pressão para a menor vazão simulada, os quais indicam uma diminuição das pressões com o aumento do comprimento de expansão, principalmente no teto. Condição esta pode ser explicada pelo decréscimo da pressão hidrostática com a elevação do teto. Entretanto não se observam pressões negativas no duto a jusante da comporta (ou condições críticas), tampouco, para esta condição de operação, a alteração no teto apresenta melhor desempenho (aumento da pressão mínima média) da válvula.

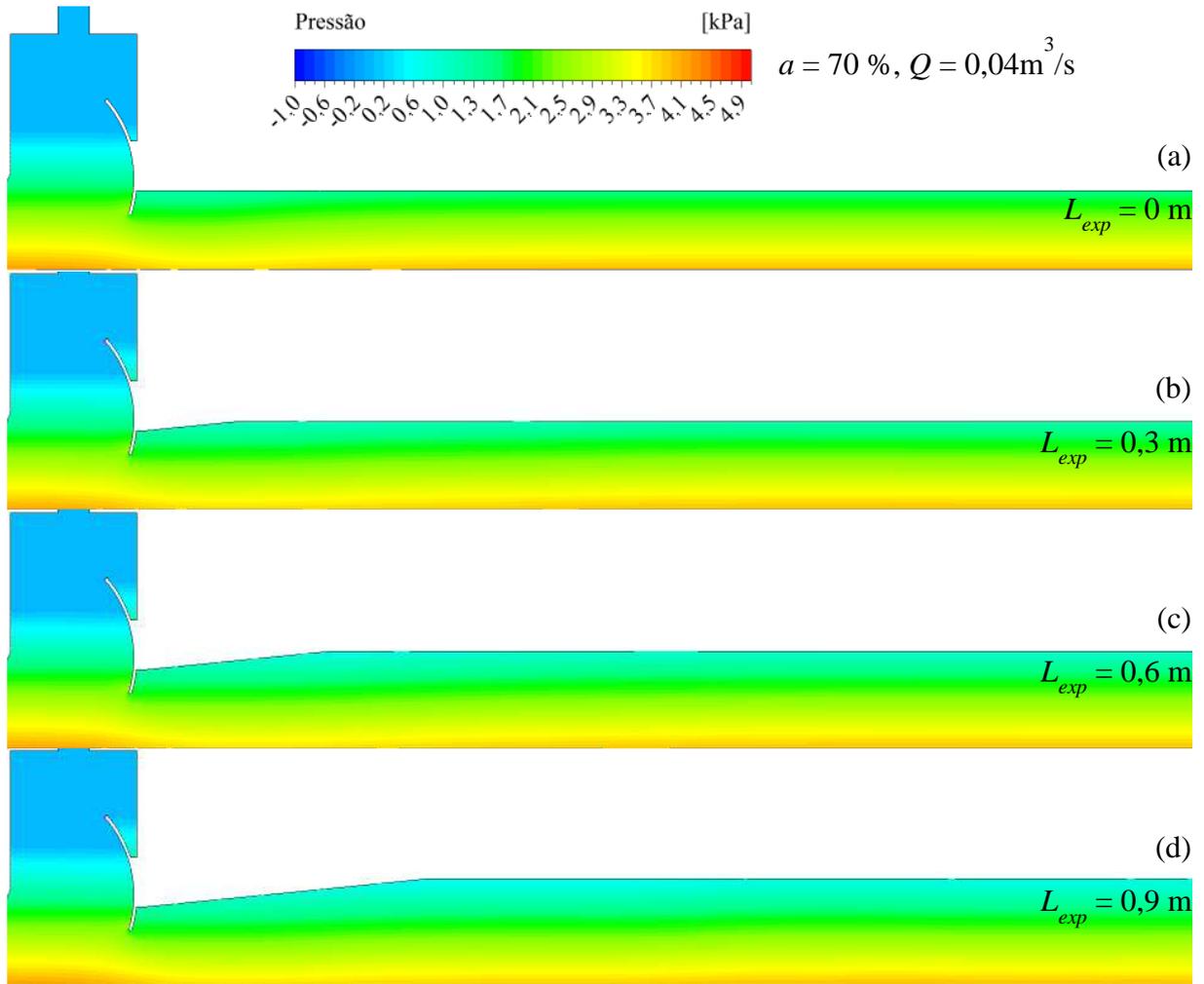


Figura 6.2 – Campo de pressão. $a = 70\%$ $Q = 0,4\text{ m}^3/\text{s}$: (a) $L_{exp} = 0\text{ m}$ e (b) $L_{exp} = 0,9\text{ m}$.

Nas Figuras 6.3(a-c) e 6.4(a-d) são mostradas linhas de corrente sobrepostas ao campo de pressão, para $Q = 0,18\text{ m}^3/\text{s}$. Inicialmente, pode-se observar nestas figuras duas regiões bastante diferentes entre si: uma região de recirculação, a qual é verificada logo após a comporta, e outra região com linhas de correntes praticamente paralelas entre si, mas com significados físicos diferentes, verificados através do afastamento entre linhas. O menor afastamento é verificado logo após a comporta, ou seja, na *vena contracta*.

As Figuras 6.3(a-c) apresentam resultados referentes aos casos com de $L_{exp} = 0\text{ m}$ e $a = 30, 50$ e 70% , respectivamente. Conforme pode ser observado, com o aumento de a , com conseqüente redução da velocidade média na comporta, ocorre redução da zona de recirculação, fazendo com que a recuperação da pressão ocorra antes para aberturas maiores do que para aberturas menores.

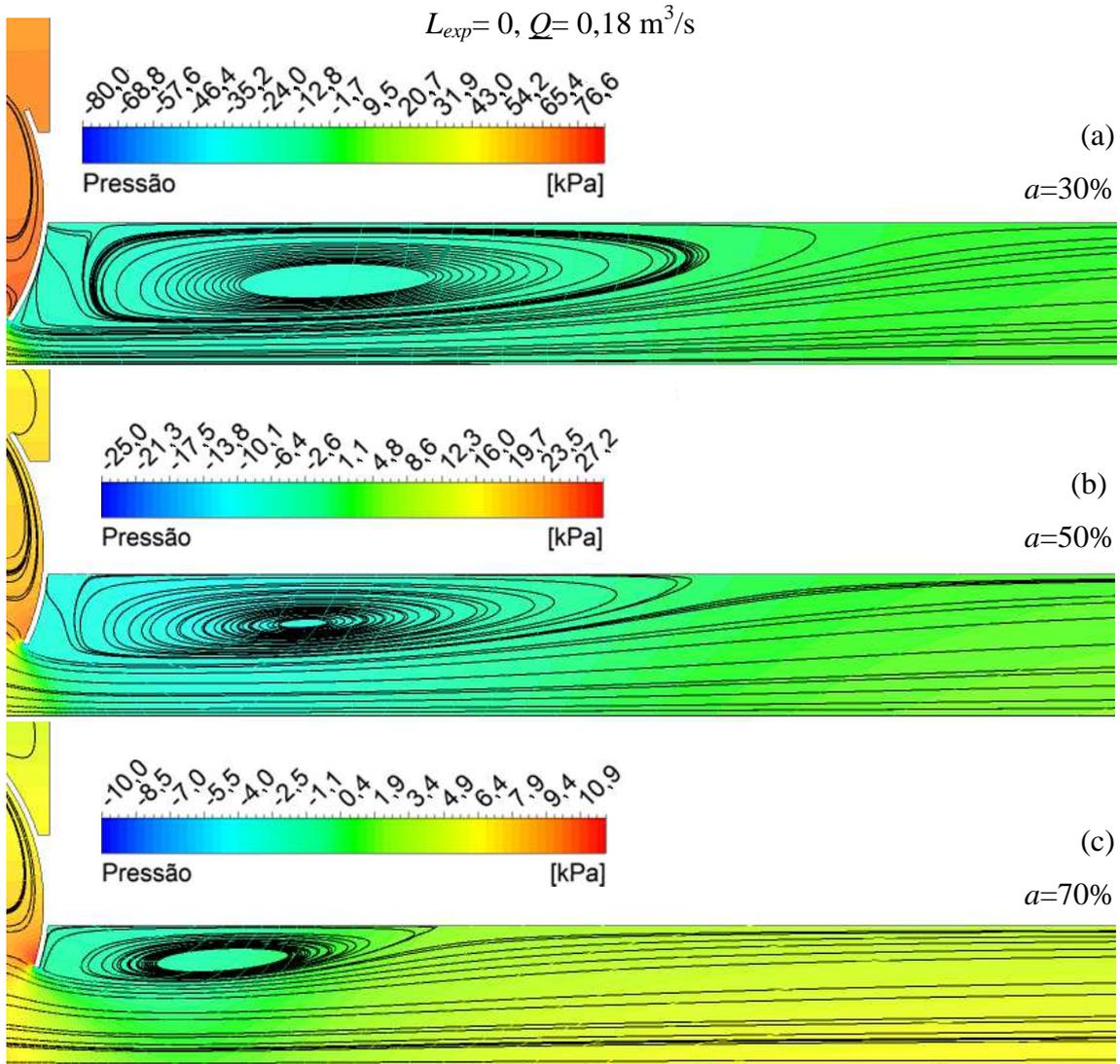


Figura 6.3 – Campo de pressão e linhas de corrente. $Q = 0,18 \text{ m}^3/\text{s}$ e $L_{exp} = 0 \text{ m}$; (a) $a = 30 \%$, (b) $a = 50 \%$ e (c) $a = 70 \%$.

Para avaliar a influência da alteração no teto com relação às linhas de corrente e campo de pressão, são apresentados nas Figs. 6.4(a-d) resultados para diferentes comprimentos de expansão: $L_{exp} = 0, 0,3, 0,6$ e $0,9 \text{ m}$, respectivamente, mas mantendo-se fixa a vazão e abertura ($a = 30\%$ e $Q = 0,18 \text{ m}^3/\text{s}$). Neste caso, pode-se verificar que o aumento de L_{exp} também resultou em maior zona de recirculação, indicando a relação com as observações feitas para a Fig. 5.1. Comportamento similar é observado para as demais vazões testadas. Resultados destas podem ser vistos no APÊNDICE A.

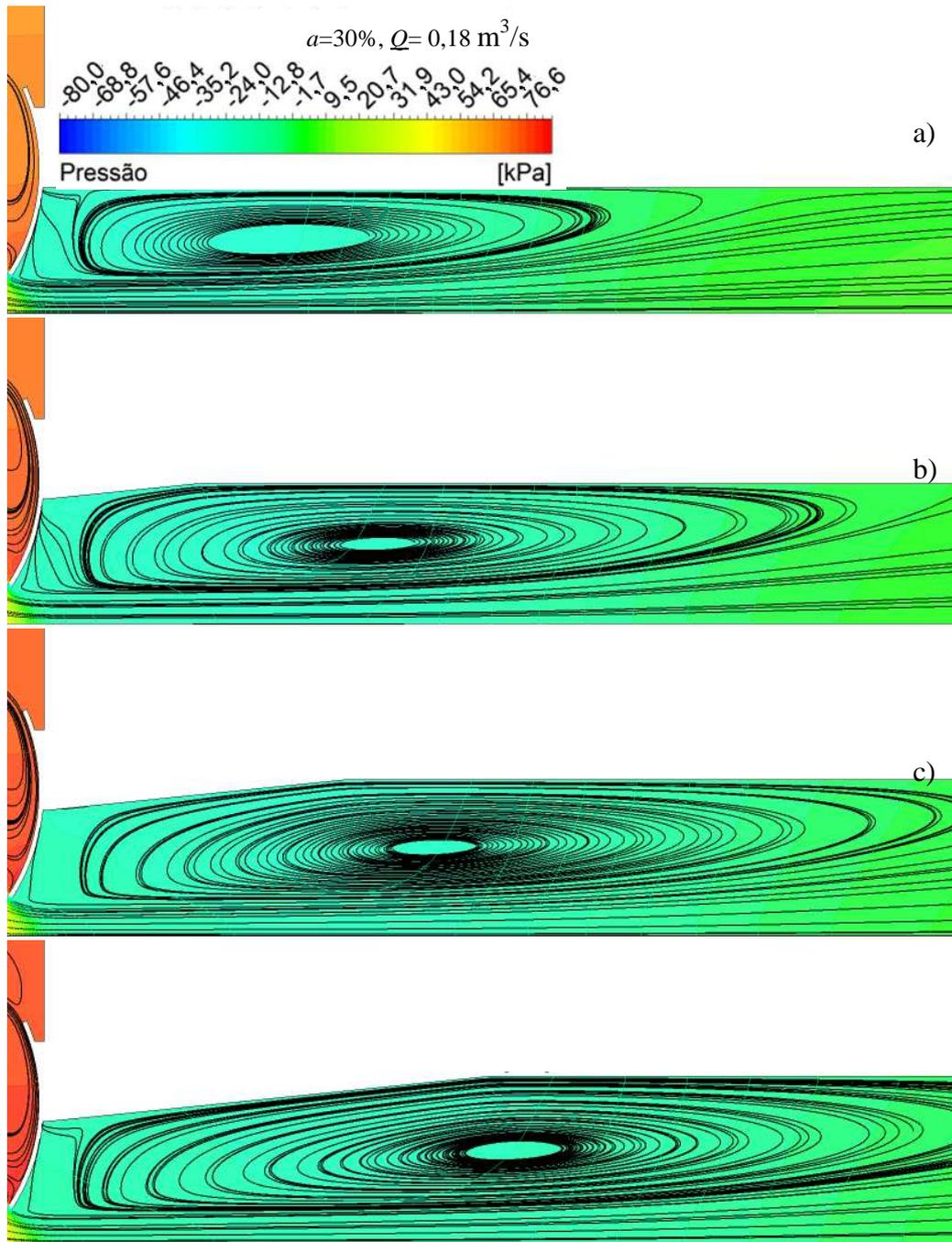


Figura 6.4 - Campo de pressão e linhas de corrente. $Q = 0,18\text{ m}^3/\text{s}$: (a) $L_{exp} = 0\text{ m}$, (b) $L_{exp} = 0,3\text{ m}$, (c) $L_{exp} = 0,6\text{ m}$ e (d) $L_{exp} = 0,9\text{ m}$.

As pressões negativas são as principais fontes de efeitos indesejáveis na operação de válvulas, e estas ocorrem no teto do conduto, independentemente das condições geométricas e de operação. Assim, os próximos resultados apresentados são específicos para o teto do conduto.

Com o aumento da pressão a montante, como observado nas Figs. 6.4(a-d), verifica-se a variação do nível d'água na chaminé de equilíbrio em função da alteração geométrica a

justante da comporta. Os valores desta variação, encontrados no APÊNDICE B Tab. B.1, podem ser utilizados tanto como condição inicial na câmara (modelo numérico bifásico), como previsão da altura mínima da chaminé para futuros modelos experimentais. A elevação do nível na chaminé praticamente não pode ser observada para $Q = 0,04 \text{ m}^3/\text{s}$, enquanto que, para $Q = 0,18 \text{ m}^3/\text{s}$ se observou um aumento de 1,28 m (17%) entre a geometrias com $L_{exp} = 0$ e 0,9 m para $a = 30\%$.

As Figuras 6.5(a-c) apresentam o L_{min} em função de L_{exp} e Q , para três aberturas: $a = 30, 50$ e 70% , respectivamente. Verifica-se nestas figuras que, tanto Q quanto L_{exp} e a influenciam na localização em que ocorrem as pressões mínimas (L_{min}). Para a maioria dos casos estudados, L_{min} aumenta com o acréscimo de L_{exp} . Este comportamento não é verificado nas condições de $a = 30$ e 70% , $Q = 0,09$ e $0,18 \text{ m}^3/\text{s}$, conforme pode ser observado na Fig. 6.5(c). Nestes casos observa-se que, para vazões maiores L_{min} torna-se constante a partir de um determinado L_{exp} , isto é, $L_{exp} > 0,6$ para $a=30\%$ ($Q = 0,09$ e $0,18 \text{ m}^3/\text{s}$), $L_{exp} > 0,6$ para $a=70\%$ ($Q = 0,09 \text{ m}^3/\text{s}$) e $L_{exp} > 0,3$ para $a=70\%$ ($Q = 0,18 \text{ m}^3/\text{s}$). Com isso pode-se, por exemplo, prever para a construção de modelo experimental regiões onde podem ser testados diferentes materiais de revestimentos, assim como a distribuição de sensores e pontos para adição de ar. Também pode-se determinar para uma condição de operação (relacionada a um protótipo ou condição extrema) a melhor geometria a ser construída em futuras etapas do projeto.

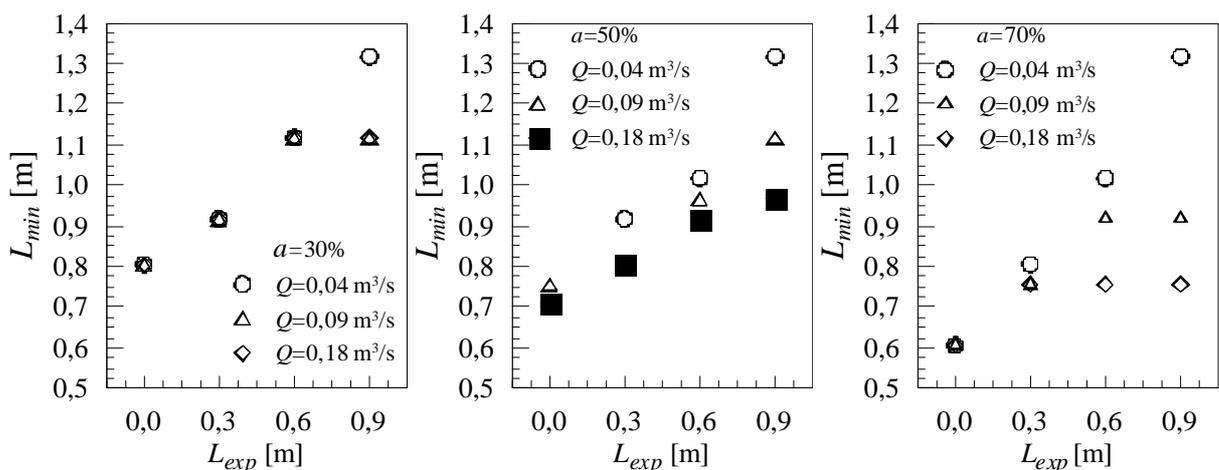


Figura 6.5 – Posição das pressões mínimas no teto vs. comprimento da expansão. $Q = 0,04, 0,09$ e $0,18 \text{ m}^3/\text{s}$: (a) $a = 30\%$, (b) $a = 50 \%$ e (c) $a = 70 \%$.

As Figura 6.6(a-c) apresentam o L_{max} em função de L_{exp} e Q , para três valores de abertura: $a = 30, 50$ e 70% , respectivamente. Nestas figuras pode-se observar que, para

$L_{exp} = 0$ m, as distâncias para recuperação da pressão (L_{max}) aumentaram aproximadamente 0,25 m quando Q aumentou de 0,04 para 0,18 m^3/s . Também pode-se verificar que, para L_{exp} superiores à 0,3 m L_{max} é praticamente independente de Q ou de a . Contudo, a coordenada máxima em x tem valores próximo à 3,8 m, ou seja, a seção analisada a jusante (duto) pode não ter comprimento suficiente para determinar o L_{max} (comprimento o qual foi mantido igual ao das geometrias originais, $L_{exp}=0$),. Esse aumento de L_{max} , como verificado na Fig. 6.1, pode indicar o comprimento de L_{exp} mais favorável para uma dada condição de operação levando em conta as relações com a pressão mínima.

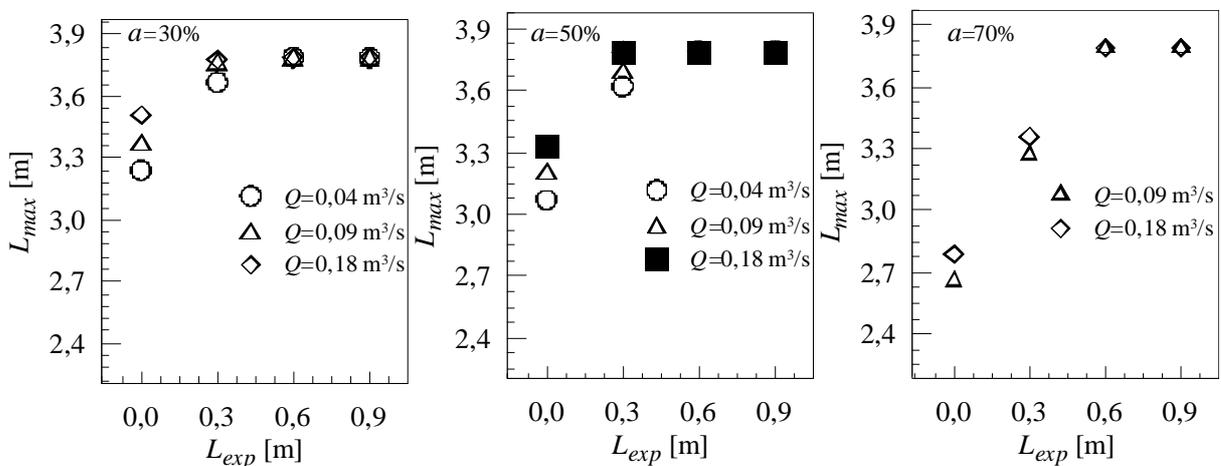


Figura 6.6 – Posição das pressões máximas no teto vs. comprimento da expansão. $Q = 0,04, 0,09$ e $0,18 m^3/s$: (a) $a = 30\%$, (b) $a = 50\%$ e (c) $a = 70\%$.

6.2 COMPARAÇÃO DA PRESSÃO NO TETO

Como observado nas Figs. 6.1-2, as pressões são menores no teto indicando a região com maior probabilidade de desencadear os efeitos nocivos. Para realizar as comparações de pressão no teto foram extraídos os resultados na superfície do teto, no plano de simetria, da mesma maneira dos trabalhos realizados no projeto de pesquisa. Esta informação dos perfis de pressão no teto possibilita (pela limitação da instalação de sensores na estrutura experimental) comparações com o futuros trabalhos experimentais com estas alterações geométricas.

As Figuras 6.7(a-c) mostram os perfis de pressão no teto, à jusante da comporta, em função do comprimento do conduto e de L_{exp} , para $a = 30, 50$ e 70% , respectivamente, com $Q = 0,04 m^3/s$. Já as Figs. 6.8 (a-c) apresentam resultados de pressão no teto para casos de a e L_{exp} apresentadas nas Figs. 6.7(a-c), mas com $Q = 0,09 m^3/s$. Seguindo a mesma sequência de apresentação, nas Figs. 6.9(a-c) são apresentados resultados para a pressão no teto do conduto

para $Q = 0,18 \text{ m}^3/\text{s}$, com os mesmos a e L_{exp} das figuras anteriores. Nestas figuras também são apresentados os resultados obtidos com o modelo numérico com geometria original, sem expansão (linha contínua).

Nas Figuras 6.7(a-c), nota-se que, para todos a , os valores de P_{min} diminuem à medida que L_{exp} aumenta, proporcionalmente, devido a pressão hidrostática, como observações feitas para a Fig. 6.2.

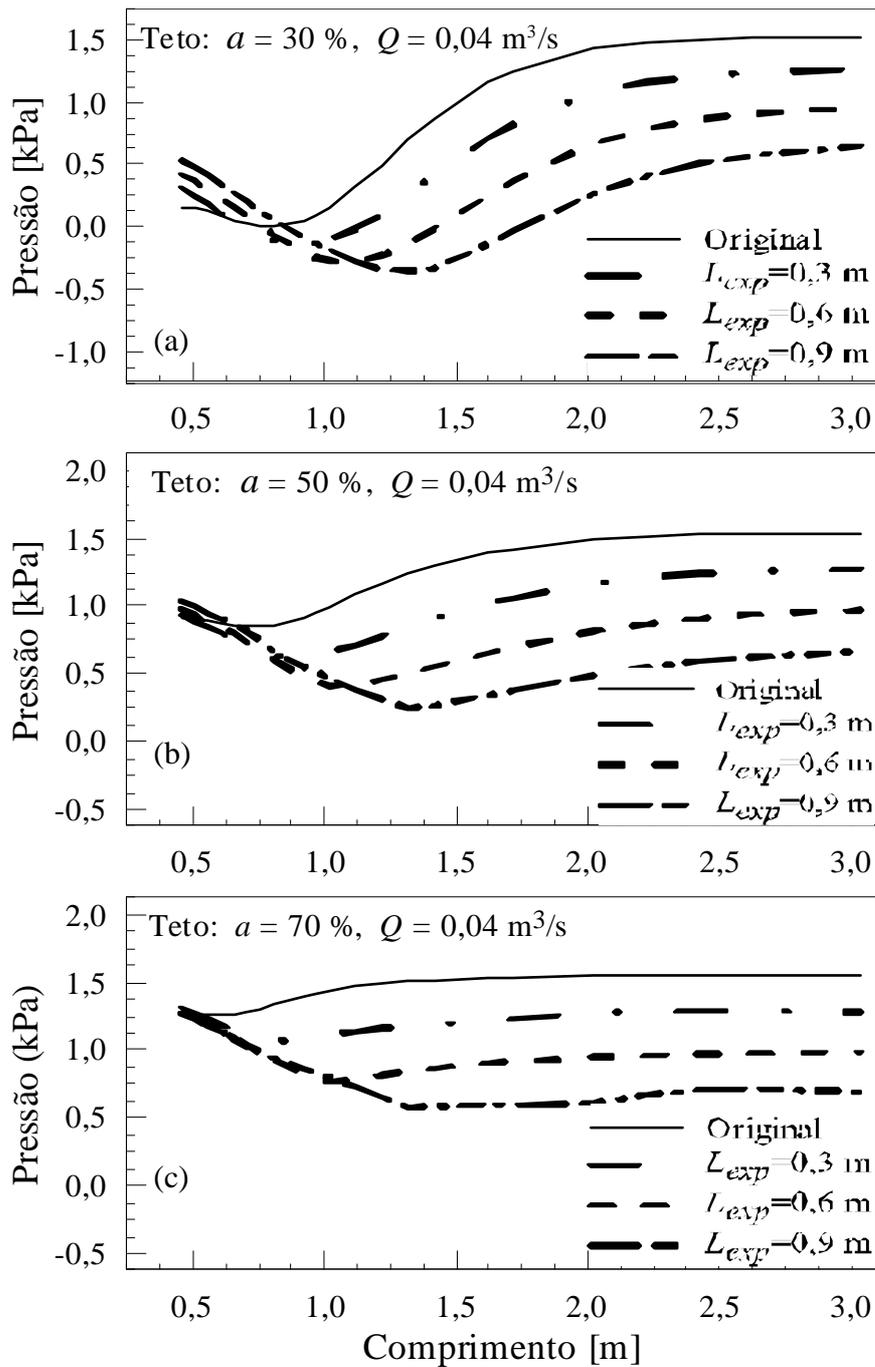


Figura 6.7 - Pressões no teto do conduto vs. Comprimento. $Q = 0,04 \text{ m}^3/\text{s}$: (a) $a = 30 \%$; (b) $a = 50 \%$ e (c) $a = 70 \%$.

Nas Figuras 6.8(a-b) verifica-se que, com o aumento de Q (de 0,04 para 0,09 m^3/s) as pressões mínimas aumentaram, para $a = 30\%$ de forma considerável e para $a = 50\%$, pouco relevante, com o aumento de L_{exp} , o que é desejável para este tipo de problema, pois reduz a possibilidade de ocorrência de cavitação. Entretanto para $a = 70\%$, Fig. 6.8(c) o perfil de pressão no teto indicou redução das pressões mínimas, assim como para Fig. 6.7(c).

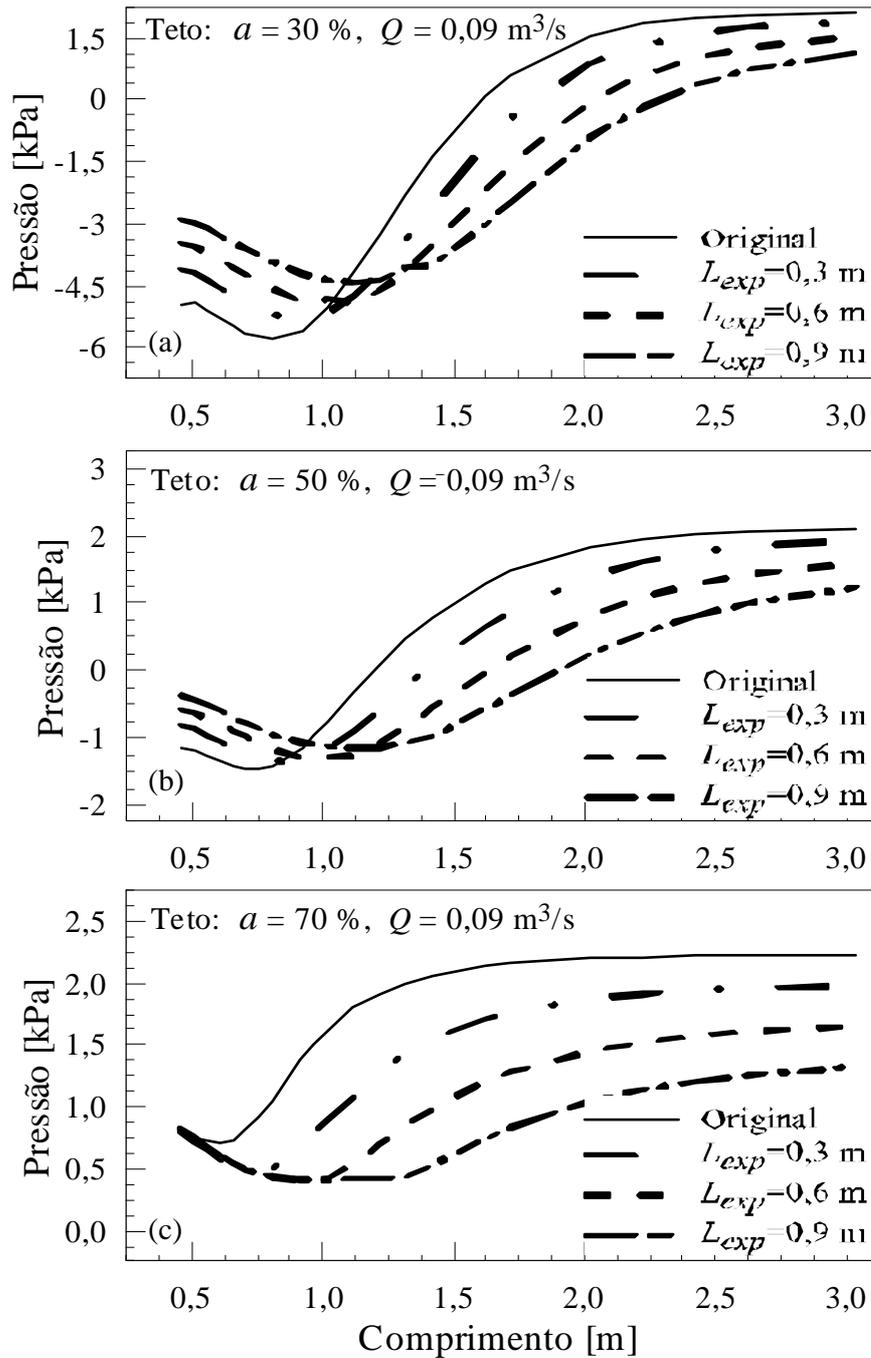


Figura 6.8 - Pressões no teto do conduto vs. Comprimento. $Q=0,09 \text{ m}^3/\text{s}$: (a) $a=30\%$; (b) $a=50\%$ e (c) $a=70\%$.

Com os resultados para $Q = 0,18 \text{ m}^3/\text{s}$ verifica-se que, para as Figs 6.9(a-b), repete a condição de aumento da pressão mínima com o aumento de L_{exp} (verificados anteriormente com $Q = 0,09 \text{ m}^3/\text{s}$), destacando também para $a = 50 \%$. Para $a = 70 \%$ e $Q = 0,18 \text{ m}^3/\text{s}$, Fig. 6.9(c), mesmo apresentando um aumento de pressão mínima, quase imperceptível, com o aumento de L_{exp} , a alteração geométrica não demonstrou ganhos em relação a geometria original.

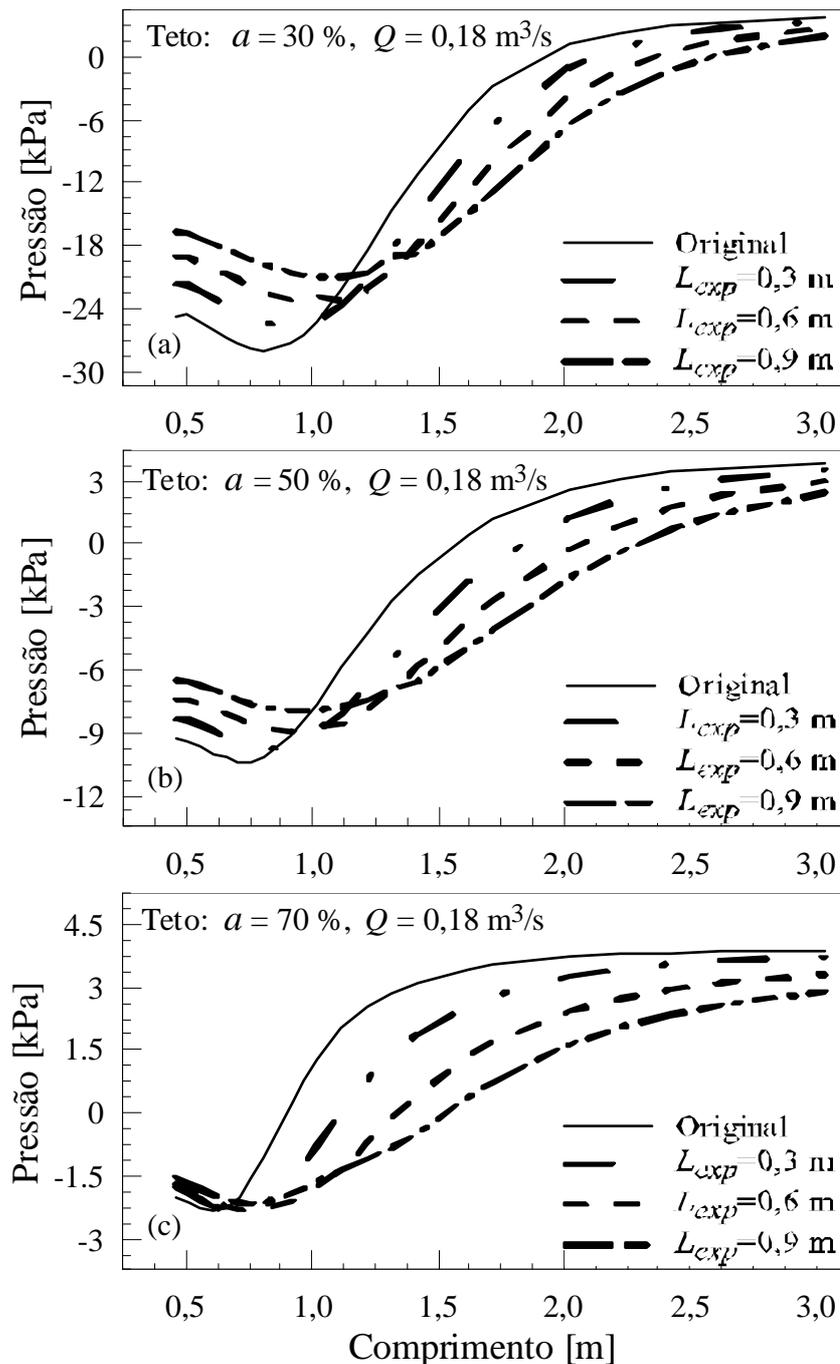


Figura 6.9 - Pressões no teto do conduto vs. Comprimento. $Q = 0,18 \text{ m}^3/\text{s}$: (a) $a = 30\%$; (b) $a = 50\%$ e (c) $a = 70\%$.

Verificou-se também que, nas Figs. 6.7-9 mesmo aumentando a pressão mínima, estas alterações no teto não foram suficientes para elevar as pressões negativas um patamar positivo ($P_{min} > 0\text{kPa}$). Contudo, como abordado por Santos (1998) e Tondowski (1988), em situações potenciais de cavitação é desejável que o aumento de pressão seja gradual, tornando o aumento de L_{exp} capaz de minimizar os efeitos das implosões das bolhas (responsáveis, por exemplo, pelas ondas de choque e ruidos).

Nas Figuras. 6.10(a-c) verifica-se a influência da alteração geométrica na variação de P_{min} em função de L_{exp} . Para estas figuras, para $Q = 0,04\text{ m}^3/\text{s}$, observa-se que P_{min} decresce com o aumento de L_{exp} . Para $Q = 0,09\text{ m}^3/\text{s}$ percebe-se um pequeno aumento de P_{min} no caso de $a = 30\%$, praticamente nenhuma influência para $a = 50\%$ e um pequeno decréscimo em $a = 70\%$. Enquanto que, para $Q = 0,18\text{ m}^3/\text{s}$, P_{min} apresentou um comportamento semelhante em todas as aberturas, ou seja, P_{min} no teto aumenta com L_{exp} .

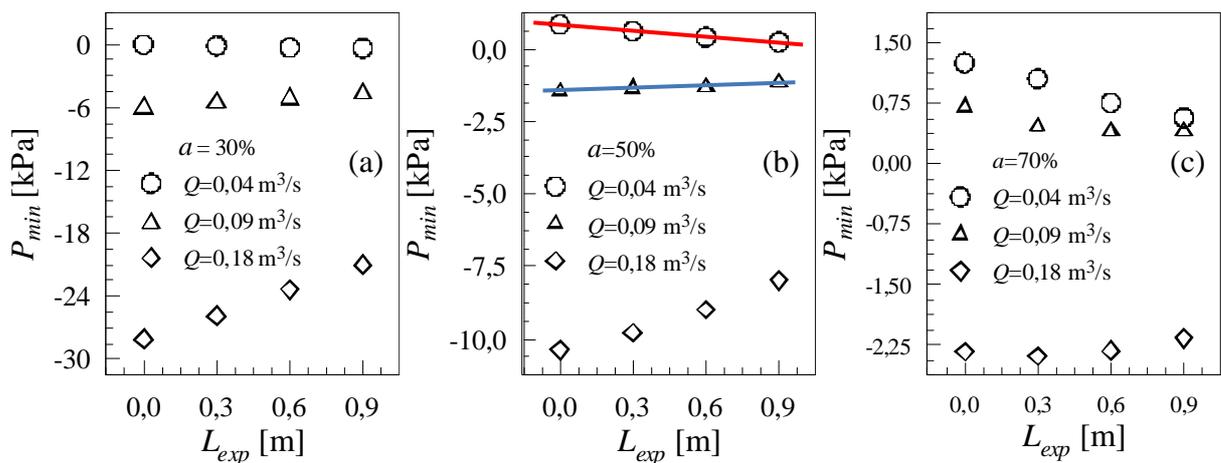


Figura 6.10 – Pressões mínimas no teto vs. Comprimento da expansão. $Q = 0,04, 0,09$ e $0,18\text{ m}^3/\text{s}$: (a) $a = 30\%$, (b) $a = 50\%$ e (c) $a = 70\%$.

Analisando a Fig. 6.10(b), onde foram inseridas linhas de tendência sobre os pontos, podemos verificar na Fig. 6.11 que, a linha traçada sobre os pontos com vazão de $0,04\text{ m}^3/\text{s}$ (em vermelho) tem característica de uma curva linear decrescente ($-ax + b$), enquanto que, para a vazão de $0,09\text{ m}^3/\text{s}$ é crescente ($ax+b$), traçado azul. A partir desta observação pode-se encontrar para uma dada abertura a respectiva vazão, onde, tanto na geometria original quanto na alteração geométrica a P_{min} será a mesma ou muito próxima. Para determinação destas vazões, encontra-se no APÊNDICE C a Tab. C.1 com valores de P_{min} utilizados para a interpolação e a metodologia aplicada. Com estes dados, Tab. C.1, foram determinadas as vazões interpoladas (Q_{inter}) correspondentes à P_{min} entre $L_{exp} = 0$ e cada alteração ($L_{exp} = 0,3,$

0,6 e 0,9) para cada a . e graficados na Fig. 6.11(simbolos pretos), juntamente, com as referências mais próximas simuladas (simbolos verde) . Nesta figura pode-se verificar, para $a = 30\%$, que a P_{min} será maior nas alterações geométricas quando $Q > 0,05\text{ m}^3/\text{s}$. Para $a = 50\%$ as alterações geométricas começam apresentar aumento de P_{min} para vazões maiores que aproximadamente $0,08\text{ m}^3/\text{s}$. Sendo para $a = 70\%$ um caso particular (necessidade de extrapolação para $L_{exp} = 30\%$), pois obteve-se vazões mínimas com maiores diferenças entre cada L_{exp} , onde seriam necessárias vazões mínimas de aproximadamente $0,21, 0,18$ e $0,15\text{ m}^3/\text{s}$ para L_{exp} de $0,3, 0,6$ e $0,9\text{ m}$, respectivamente. Desta forma, para que se obtenha aumento da pressão mínima, com a utilização da expansão no teto em relação à geometia original, devem ser utilizadas vazões superiores àquelas interpoladas para cada abertura. Com isso têm-se uma possibilidade investigação, em futuros trabalhos, quanto a efetividade de cada alteração geométrica em função da vazão e abertura, assim como dados para otimização de leis manobras e dimensionamento do duto a jusante.

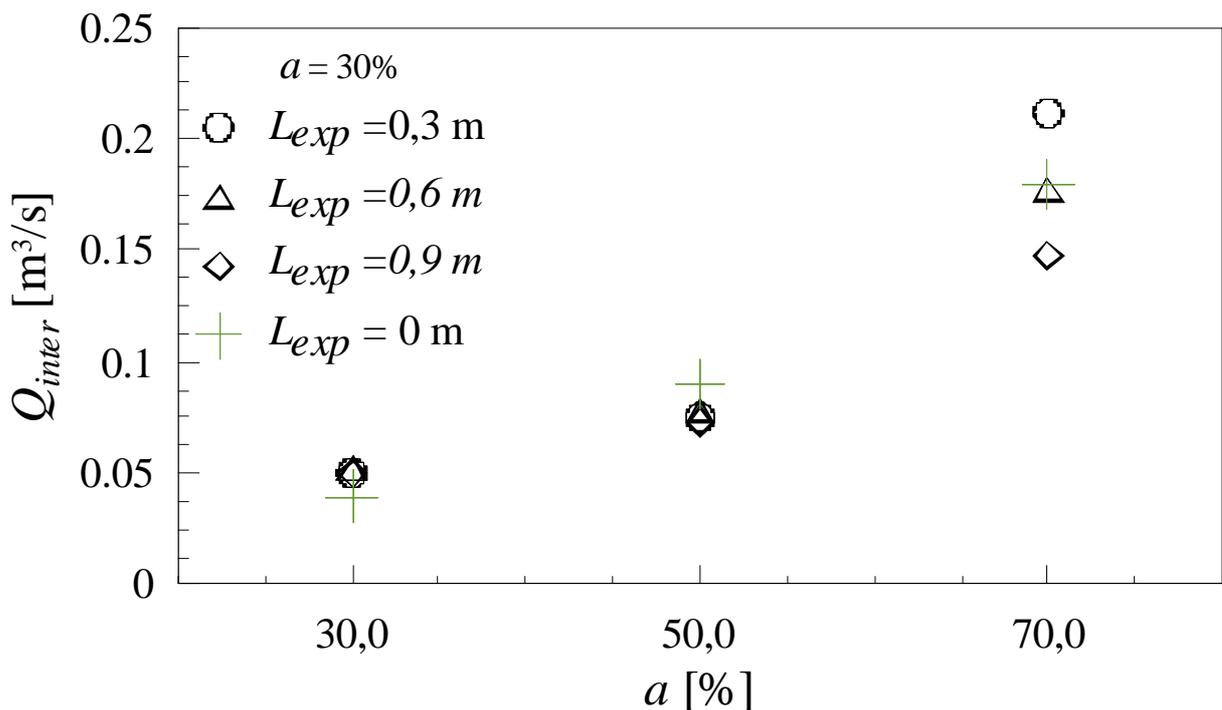


Figura 6.11 – Vazão vs. abertura, para mesmos P_{min} : simulado (símbolo verde) e interpolado (símbolos pretos).

6.3 COEFICIENTES DE PERDA DE CARGA E DE CONTRAÇÃO

Neste item são apresentados os coeficientes baseados em pressões e velocidades, de acordo com os verificados na revisão bibliográfica, tais com o coeficiente de perda de carga localizada da válvula (K_V) e o coeficiente de contração (C_C).

Na Figura 6.12(a-c) são apresentados resultados da diferença entre a pressão na entrada da câmara e a máxima pressão a jusante da comporta (ΔP), ambas na base, em função L_{exp} , para $Q= 0,04, 0,09$ e $0,18 \text{ m}^3/\text{s}$ e $a = 30, 50$ e 70% . Conforme pode ser visto na Fig. 6.12(a), para $L_{exp} = 0,9 \text{ m}$, ΔP foi, aproximadamente, 9 kPa (14%) maior que a geometria original com $a = 30\%$ e $Q = 0,18 \text{ m}^3/\text{s}$. Enquanto que, para $a = 50\%$ e 70% , apresentaram um aumento de aproximadamente 2 kPa (12% , Fig. 6.12(b)) e $0,15 \text{ kPa}$ (3% Fig.6.12(c)), respectivamente .

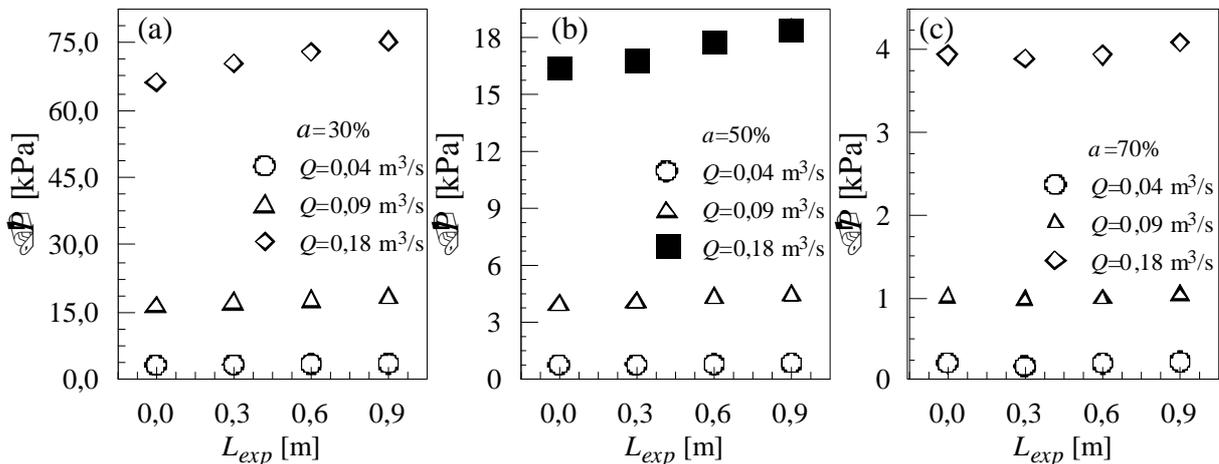


Figura 6.12 – Variação de pressão na base vs. comprimento da expansão. $Q = 0,04, 0,09$ e $0,18 \text{ m}^3/\text{s}$: (a) $a = 30\%$, (b) $a = 50\%$ e (c) $a = 70\%$.

6.3.1 Coeficiente de perda de carga localizada (K_V)

O coeficiente de perda de carga localizada da válvula, baseado na Eq. 3.3, onde pode ser calculado pela diferença de pressão entre a montante e a jusante (ΔP), nestas simulações tomadas na base, Eq. 6.1:

$$K_V = \frac{2\Delta P}{\rho V^2} \quad (6.1)$$

As Figuras 6.13 (a-c) mostram a variação do coeficiente de perda de carga localizada (K_V) em função do comprimento de expansão para todas as condições operacionais simuladas.

Através destas figuras pode-se observar que, K_V aumenta com o acréscimo de L_{exp} . Outra característica que pode ser visualizada nestas figuras é de que K_V é, praticamente, independente da vazão. Pode-se observar também que a ordem de grandeza dos valores de K_V mudam significativamente com a . Por exemplo, para $L_{exp} = 0,6$ m: $K_V = 17,5$ para $a = 30$ %, enquanto que, $K_V = 0,95$ para $a = 70$ %.

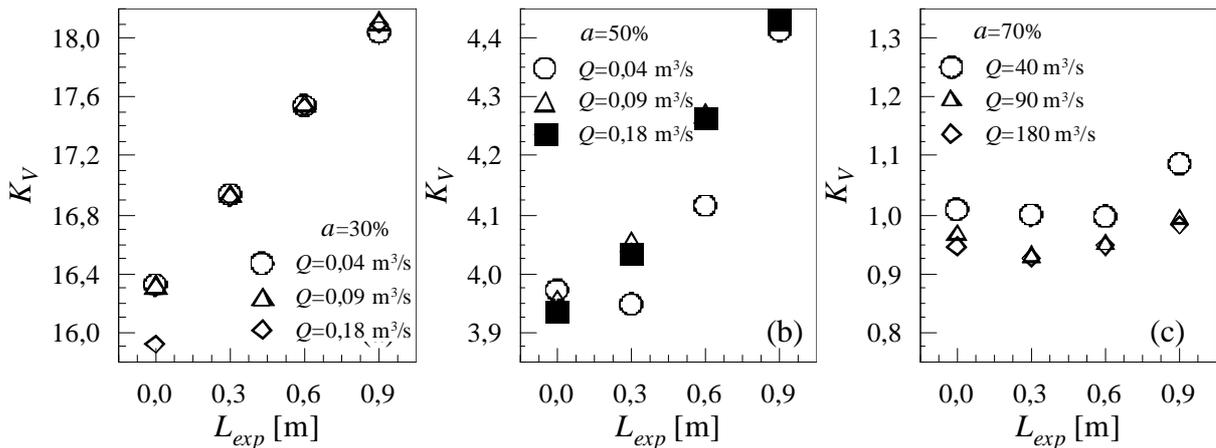


Figura 6.13 – Coeficiente de perda de carga (K_V) vs. comprimento da expansão. $Q = 0,04$, $0,09$ e $0,18$ m³/s: (a) $a = 30\%$, (b) $a = 50\%$ e (c) $a = 70\%$.

As diferentes ordens de grandeza de K_V , verificadas nas Fig. 6.13(a-c), deixam de ser tão expressivas quando os valores são inseridos no gráfico em função de a , conforme pode ser observado na Fig. 6.14. Nesta figura, adaptada de USACE (1975), a qual apresenta também resultados experimentais, como os das eclusas de McNary (modelos e protótipos), pode-se observar a concordância dos resultados obtidos com o presente trabalho com resultados da literatura aberta.

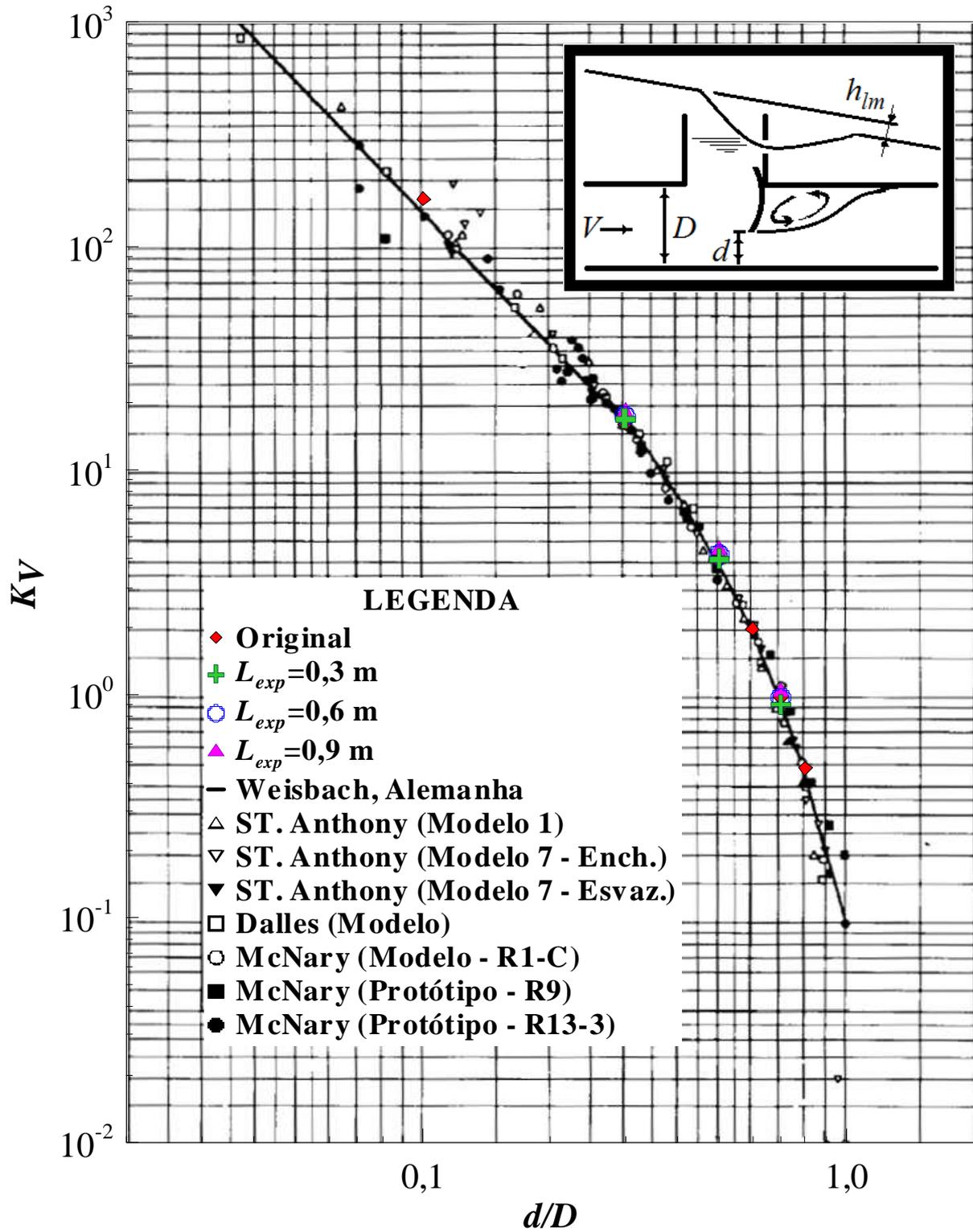


Figura 6.14 – Coeficiente de perda de carga (K_V) vs. abertura da válvula.
 Fonte: Adaptado de USACE (1975).

6.3.2 Coeficiente de contração (C_C)

Nas Figuras. 6.15(a-b) são apresentadas as relações entre a abertura da válvula pelo o coeficiente de contração (C_C). O C_C é calculado a partir da menor área transversal, do jato na *vena contracta*, no caso das válvulas estudadas é a razão entre altura do jato e a altura da borda da comporta na respectiva posição de abertura. Na Fig. 6.15(a) são mostrados valores de C_C obtidos por vários autores, incluindo os resultados obtidos neste trabalho. Para uma melhor identificação, na Fig. 6.15(b) são mostrados apenas resultados deste trabalho em comparação com a curva de Von Misses, onde pode-se observar a proximidade dos resultados.

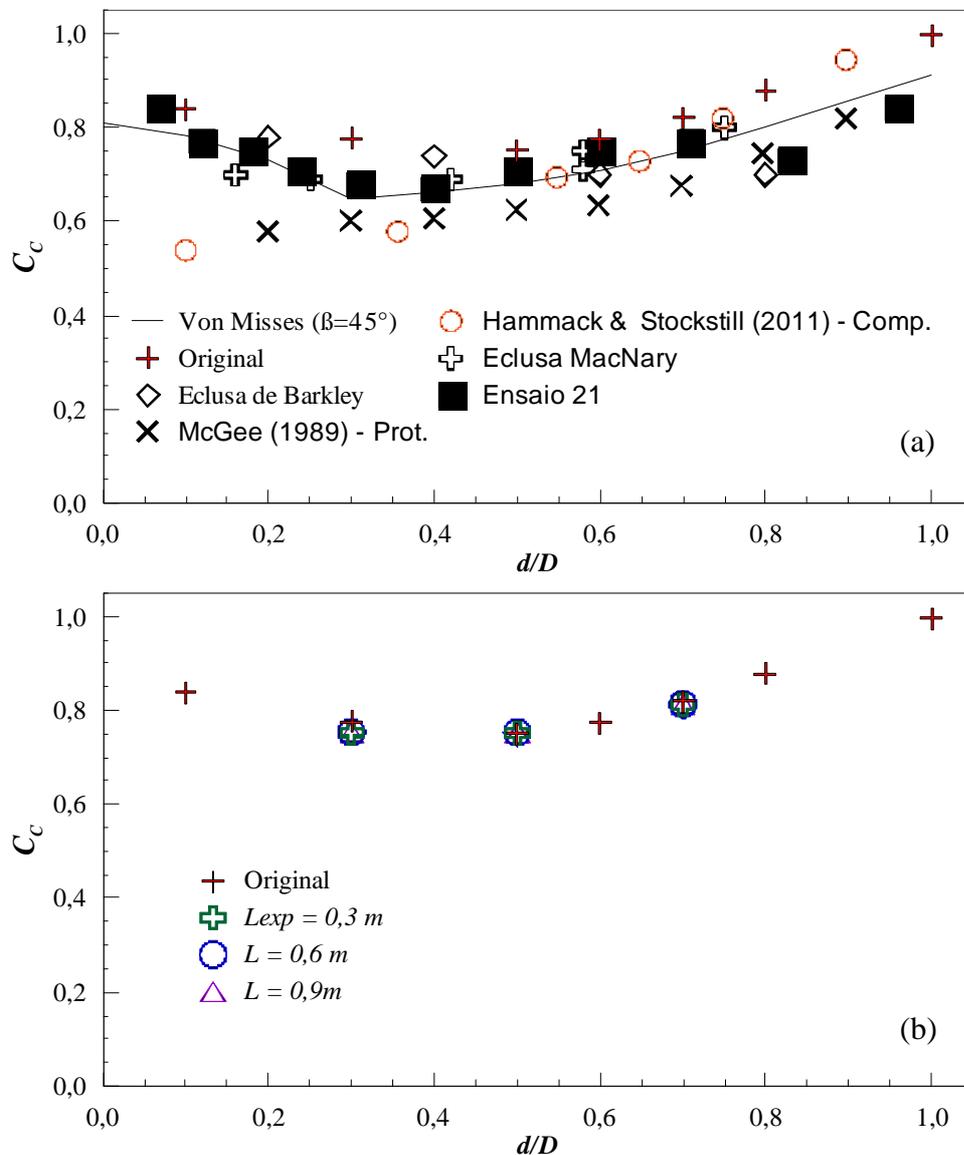


Figura 6.15 – Coeficientes de contração de referência vs. abertura da válvula: (a) completo e (b) parcial.

7 CONCLUSÕES

O objetivo geral deste trabalho foi conhecer o comportamento hidrodinâmico de válvulas de enchimento e esvaziamento de eclusas. Utilizando-se de simulação numérica por CFD, comparando as alterações geométricas com modelo numérico em escala reduzida. Enquanto, o objetivo principal é propor alterações geométricas no conduto à jusante de comportas eclusas, de forma a minimizar a queda de pressão (devido às altas velocidades) nesta região. A pesquisa também é parte do projeto de pesquisa FINEP (AQUECLUSA-Análise dos esforços hidrodinâmicos a jusante de válvulas de sistemas de enchimento/esvaziamento de eclusas de navegação), o qual é desenvolvido em rede pelas universidades: UFPEL, UFRGS, UNISINOS e URI, sendo a UNISINOS a responsável pela abordagem numérica.

Os resultados obtidos neste trabalho foram extraídos através de simulações numéricas utilizando-se o software comercial Ansys CFX. O modelo matemático implementado é composto pelas equações da conservação da massa e quantidade de movimento, acrescidas do modelo de turbulência k- ϵ . Neste problema também foi considerada a variação de nível d'água na chaminé de equilíbrio da câmara durante a operação. Desta forma, para contemplar os dois fluidos envolvidos no domínio computacional, utilizou-se um modelo bifásico, água-ar.

Com o modelo numérico utilizado pode-se observar que, à medida que o comprimento da expansão (L_{exp}) aumenta, as pressões mínimas também aumentam, assim como a pressão a montante da comporta. Além disso, pode-se observar que o aumento de L_{exp} faz com que a recuperação da pressão mínima ocorra numa localização mais distante da comporta, implicando em uma maior região com pressões mínimas, que podem ser negativas conforme as condições de abertura da válvula e a vazão, observa-se também uma maior zona de recirculação acima do escoamento.

Através da observação dos campos de pressão, identifica-se que as menores pressões ocorrem junto ao teto, independentemente das condições geométricas e de operação. Com isso, as análises são realizadas, preferencialmente, a partir das pressões no teto.

Observou-se que a expansão no teto não melhora de maneira significativa as pressões mínimas. Todavia, quando imposta uma condição de velocidades mais altas (neste caso velocidades acima de aproximadamente 4,8 m/s, na abertura da válvula), a expansão aumentou significativamente as pressões mínimas no teto.

De uma forma geral, L_{min} aumenta com L_{exp} . No entanto, para $a = 30\%$ e $Q = 0,04 \text{ m}^3/\text{s}$, L_{min} demonstrou ser função de L_{exp} . Por outro lado, para $Q > 0,04 \text{ m}^3/\text{s}$, L_{min}

permanece constante. Com o aumento de a , verifica-se que o aumento de L_{exp} . deixa de influenciar L_{min} com o aumento da vazão.

Para o aumento de L_{exp} , observou-se também que, a distância em relação a comporta onde as pressões mínimas começam a se recuperar (L_{max}) aumenta, resultando em maior área de pressões mínimas, que podem estar próximas à valores negativos. Através das linhas de correntes e campos de pressão, observou-se um aumento da região de recirculação e do comprimento do jato, resultando em uma maior distância para a expansão plena do jato. Para a mesma a e Q , com o aumento de L_{exp} , aumentam a pressão a montante e a perda de carga.

Na comparação entre a geometria original ($L_{exp} = 0$) e as geometrias com expansão no teto ($L_{exp} = 0,3, 0,6$ e $0,9$ m) verificou-se que o aumento da pressão mínima acontecerá somente a partir de uma vazão mínima para cada abertura (a). Foram encontradas para as aberturas simuladas, $a = 30, 50$ e 70 %, suas respectivas vazões de $0,05, 0,08$ e $0,21$ m³/s que coincidem as pressões mínimas (P_{min}) da geometria original com as geometrias alteradas (expandidas no teto). Desta forma, para que se obtenha melhores resultados no aumento de P_{min} deve-se trabalhar com vazões superiores cada abertura. Sugere-se então, para futuros trabalhos a determinação de curvas de efetividade das alterações geométricas, com maior número de aberturas e até mesmo de vazões (para determinar o aumento percentual das P_{min}).

Para aberturas específicas, verifica-se um pequeno aumento de KV com o acréscimo de L_{exp} . Entretanto, as alterações geométricas testadas não apresentam diferenças significativas em relação a K_V , quando comparados com aqueles obtidos com o modelo original e literatura aberta de uma forma geral.

Nos casos em que ocorreram pressões mínimas abaixo daquelas verificadas no modelo numérico original, estas não se mostraram inferiores a 2 kPa. Para pressões mínimas mais baixas (valores em torno de -28 kPa), o aumento foi da ordem de 7 kPa, com $L_{exp} = 0,9$ m, indicando uma pequena melhora nas pressões mínimas. Verificou-se ainda que, não ocorreram alterações significativas para o coeficiente de contração com a variação de L_{exp} .

A expansão no teto apresentou características favoráveis de aumento das pressões médias mínimas, confirmando os resultados encontrados em USACE (2006). Entretanto, este aumento foi muito pequeno, não sendo possível afirmar que o emprego de uma expansão elimine os efeitos da erosão por cavitação.

As principais características discutidas anteriormente são apresentadas resumidamente na Tab 7.1, informando o parâmetro avaliado, seu resultado e as restrições (particularidades).

Tabela 7.1: Resumo dos resultados.

Parâmetro	Resultado	Restrições
$\uparrow L_{exp}$	$\uparrow L_{max}$	
	\uparrow região com pressões negativas	vazões abaixo de $0,04 \text{ m}^3/\text{s}$
	\uparrow região de recirculação	
	$\uparrow P_{min}$ em relação a $L_{exp} = 0 \text{ m}$	$a = 30\%: Q > 0,05 \text{ m}^3/\text{s};$ $a = 50\%: Q > 0,08 \text{ m}^3/\text{s};$ $a = 70\%: Q > 0,21 \text{ m}^3/\text{s}$
	$\uparrow \Delta P$	
	$\uparrow K_V$ entre as alterações propostas	porém diferença é mínima quando comparado à curvas características da literatura
	$\approx C_C$	
$\uparrow L_{exp}$ e $\uparrow a$	Q exerce maior influência no L_{min}	

Tais resultados motivam a utilização dos métodos de simulação numérica para a otimização geométrica de galeria a jusante de comporta tipo segmento invertida. A análise das pressões mínimas permitirá inferir as condições de escoamento que podem vir a causar danos na estrutura e ajudar a projetar e dimensionar estruturas, mais eficientes e seguras.

Para trabalhos futuros, sugere-se investigar a influência de outras formas de alterações geométricas (expansão ou redução) na galeria a jusante da comporta. Neste caso, o objetivo seria identificar onde estariam os pontos críticos para cada geometria, de maneira criar gráficos que indiquem qual seria a estimativa das pressões mínimas para uma dada geometria e condições de escoamento em relação a recomendações, assim como outras formas de alteração geométrica a jusante da comporta.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANEEL, Atlas 1ª edição, Disponível em: <http://www3.aneel.gov.br/atlas/atlas_1edicao/atlas/energia_hidraulica/3_5_capacidade.html> Acesso em: 29 de Abril de 2012.

ANTAQ, Disponível em: <<http://www.antaq.gov.br/portal/pdf/Palestras/ForumHidroviarias2009/Painel3/MarcosSoaresCNTFenavega.pdf>> Acesso em: 22 de dezembro de 2012.

BATTISTON, C. C., SCHETTINI, E. B. C., CANELLAS, A. V. B., MARQUES, M. G. Eclusas de navegação: Caracterização hidráulica do escoamento a jusante das válvulas de enchimento/esvaziamento. **Proc. of XVIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**, Campo Grande, Brasil. 2009.

BATTISTON, C. C., BOMBARDELLI, F. A., SCHETTINI, E. B. C., MARQUES, M. G. (2009a). "Numerical simulations of the flow through a reverse Tainter gate in a conduit". **33rd IAHR 2009 Congress - Water Engineering for a Sustainable Environment**. Vancouver, Canada. 2009

DALLA CORTE, M., OLIVESKI, R. C., MARQUES, M. G., SOUZA, P. K., Numerical analysis of the hydrodynamic behavior of lock navigation filling and emptying systems. **Proc. of COBEM 2011 - 21st Brazilian Congress of Mechanical Engineering**, Natal, Brasil. 2011.

DALLA CORTE, MARCELO; OLIVESKI, REJANE DE CÉSARO; MARQUES, M. G.; SCHETTINI, EDITH B. C. Analysis of Flow Characteristics Downstream of Reverse Tainter Gates. In: **4th IAHR International Symposium on Hydraulic Structures, 2012**, Porto, Portugal. 2012.

DIÁRIO OFICIAL DA UNIÃO, Disponível em: <<http://www.in.gov.br/visualiza/index.jsp?jornal=1&pagina=67&data=10/09/2012>> Acesso em: 22 de dezembro de 2012.

FOX, ROBERT W., MCDONALD, ALAN T., **Introdução à mecânica dos fluidos**. LTC Editora. 2001.

MASSEY, B. S. **Mecânica dos fluidos**. Lisboa: fundação calouste gulbenkian, 2002.

MEES, A. A. A., BATTISTON, C. C., MARQUES, M. G., Downstream flow from reverse Tainter gates in conduits as a hydraulic jump. **Proc. of 2nd International Junior Researcher and Engineer Workshop on Hydraulic Structures**, Pisa, Italia. 2008.

MINISTÉRIO DOS TRANSPORTES, Disponível em: <<http://www.transportes.gov.br/conteudo/36391>> Acesso em: 22 de dezembro de 2012.

OLIVEIRA, D.T., GOMES, P.M.L., REIS, L.F.B., Considerações sobre alguns resultados obtidos nos modelos físico da eclusa de Tucuruí. **Simpósio Luso-Brasileiro sobre Simulação e Modelação Hidráulica**, Blumenau-SC, Brasil. 1983.

PALMIER, L. R., **Otimização de leis de manobras de comportas dos circuitos de enchimento e esgotamento de eclusas de navegação**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, Brasil. 1990.

PLEC, D. F., **Otimização de leis de manobras de componentes de eclusas de navegação com uso de algoritmo genético**. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos). Universidade Federal Minas Gerais. Belo Horizonte, Brasil. 2010.

SANTOS J. B. V., OLIVESKI, R. C., MARQUES, M. G., PRA M. D., DALLA CORTE, M., OLIVEIRA, L. L. M. Alteração geométrica no teto a jusante de comporta do sistema de enchimento e esvaziamento para eclusas de navegação: Simulação numérica do escoamento e análise das pressões no teto do conduto. **CONEM 2012 - VII Congresso Nacional de Engenharia Mecânica**, São Luis, Brasil. 2012.

SANTOS, S. R., **Projeto hidráulico de eclusas de alta queda**. Dissertação (Professor livre Docente). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, Brasil. 1998.

SHENGYI, Z., HUICHAO, D., WENLI, W. Effect study of valve hoisting way to the flow field for ship lock in the TGP. **XXXI IAHR Congress**, Seoul, Korea. 2005.

SHIQIN, L., YIHONG, W., SHENZONG, X., CHANGHE, L., Hydrodynamic pressure of filling and emptying system and flow-induced vibration of reversed tainter gate of the lock at Wuqiangxi Hydroproject. **XXVIII IAHR Congress**. Graz, Austria. 1999.

TONDOWSKI, L., **Modelismo físico e efeitos de escala em eclusas de navegação**. Dissertação (Mestrado). Universidade de São Paulo. São Paulo, 1988, Brasil.

USACE, UNITED STATES ARMY CORPS OF ENGINEERS, Hydraulic design of lock culvert valves. **EM 1110-2-1610**. 1975. Disponível em: <<http://publications.usace.army.mil/publications/eng-manuals/em1110-2-1610/entire.pdf>> Acesso em: 19 de janeiro de 2012.

USACE, UNITED STATES ARMY CORPS OF ENGINEERS, Hydraulic Design of Navigation Locks. **EM 1110-2-1604**. 2006. Disponível em: <<http://publications.usace.army.mil/publications/eng-manuals/em1110-2-1604/entire.pdf>> Acesso em: 19 de janeiro de 2012.

USSAMI, H., **Comportamento hidráulico dos sistemas de enchimento e esgotamento de eclusas de navegação**. Dissertação (Mestrado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, Brasil. 1980.

USSAMI, H., CORADINI, L., CANHOLI, A.P., Aplicações da modelagem matemática em sistemas de enchimento e esgotamento de eclusas. **Simpósio Luso-brasileiro Sobre Simulação e modelação Hidráulica**. Blumenau, Brasil. 1983.

APÊNDICE A

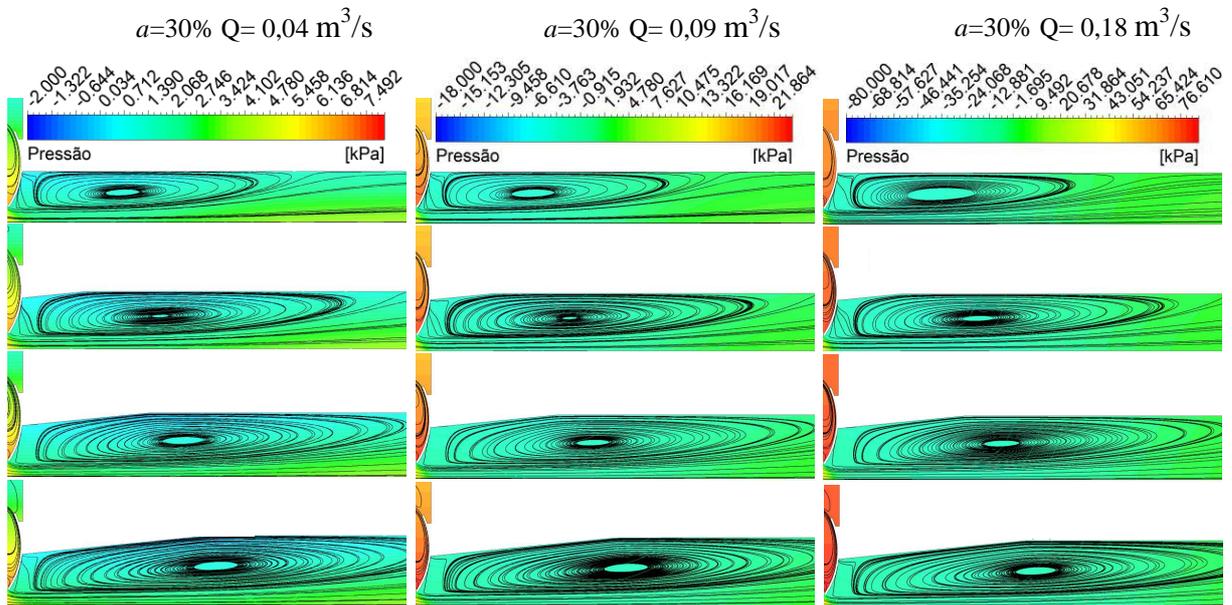


Figura A.1 - Campo de pressão e linhas de corrente. $a = 30\%$: $Q = 0,04 \text{ m}^3/\text{s}$, $Q = 0,09 \text{ m}^3/\text{s}$ e $Q = 0,18 \text{ m}^3/\text{s}$; (a) $L_{exp} = 0 \text{ m}$, (b) $L_{exp} = 0,3 \text{ m}$, (c) $L_{exp} = 0,6 \text{ m}$ e (d) $L_{exp} = 0,9 \text{ m}$.

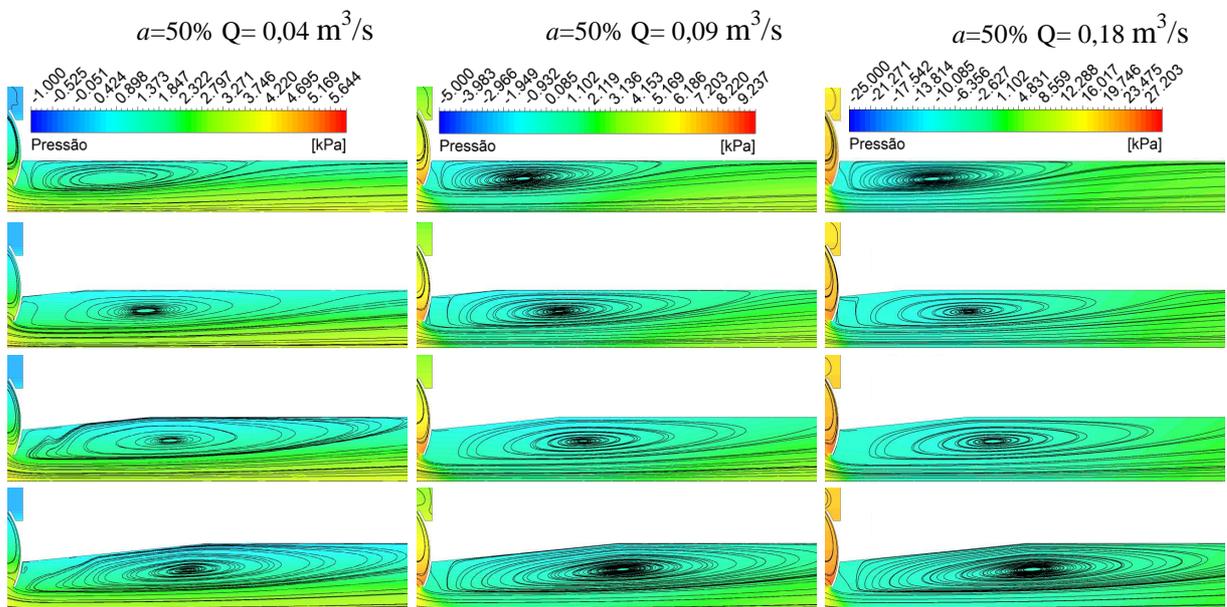


Figura A.2 - Campo de pressão e linhas de corrente. $a = 50\%$: $Q = 0,04 \text{ m}^3/\text{s}$, $Q = 0,09 \text{ m}^3/\text{s}$ e $Q = 0,18 \text{ m}^3/\text{s}$; (a) $L_{exp} = 0 \text{ m}$, (b) $L_{exp} = 0,3 \text{ m}$, (c) $L_{exp} = 0,6 \text{ m}$ e (d) $L_{exp} = 0,9 \text{ m}$.

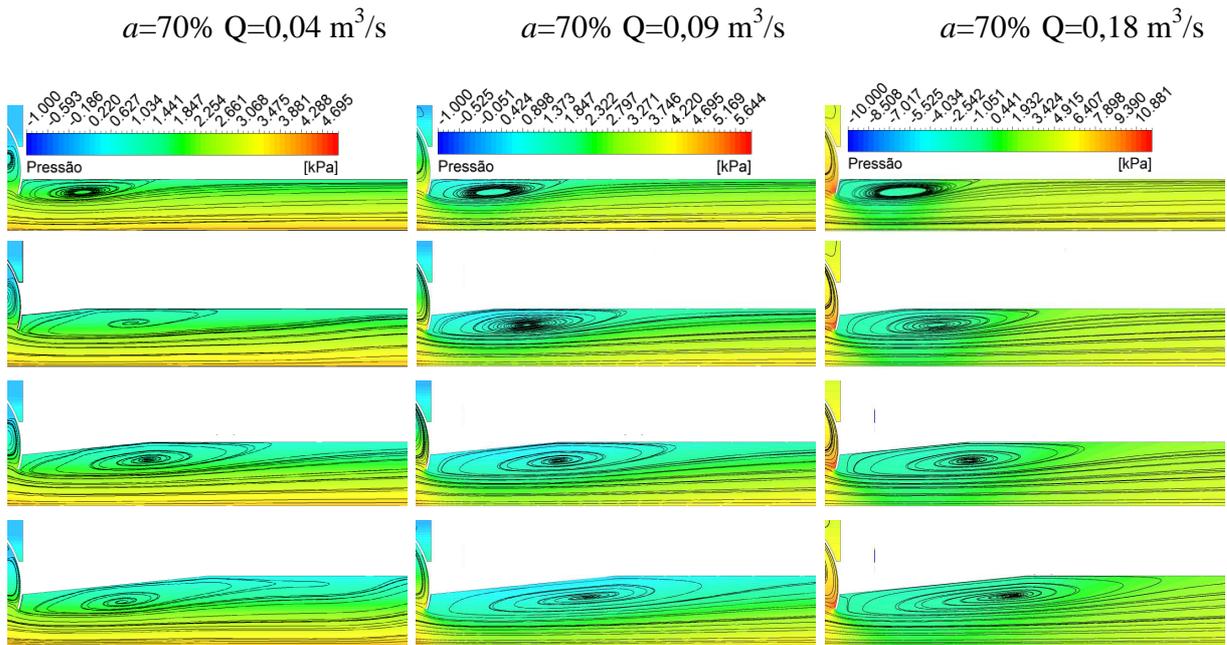


Figura A.3 - Campo de pressão e linhas de corrente. $a = 70\%$: $Q = 0,04 \text{ m}^3/\text{s}$,
 $Q = 0,09 \text{ m}^3/\text{s}$ e $Q = 0,18 \text{ m}^3/\text{s}$; (a) $L_{exp} = 0 \text{ m}$, (b) $L_{exp} = 0,3 \text{ m}$, (c) $L_{exp} = 0,6 \text{ m}$ e
 (d) $L_{exp} = 0,9 \text{ m}$.

APÊNDICE B

A Tab. B.1 apresenta o nível d'água no chaminé de equilíbrio:

Tabela B.1: Nível d'água na câmara/chaminé de equilíbrio.

A [%]	Q [m ³ /s]	Nível da chaminé em relação a base [m]			
		L _{exp} =0 [m]	L _{exp} =0.3 [m]	L _{exp} =0.6 [m]	L _{exp} =0.9 [m]
30	0,04	0,75	0,76	0,77	0,79
	0,09	2,27	2,35	2,42	2,66
	0,18	7,53	8,13	8,41	8,81
50	0,04	0,50	0,50	0,51	0,51
	0,09	0,93	0,94	0,96	0,98
	0,18	2,45	2,47	2,57	2,66
70	0,04	0,45	0,45	0,45	0,45
	0,09	0,60	0,59	0,59	0,60
	0,18	1,11	1,10	1,11	1,12

APÊNDICE C

Para determinar qual é a melhor opção de alteração geométrica é necessário saber as condições de operação, neste apêndice, busca-se detalhar como foram obtidas as vazões que proporcionam as mesmas P_{min} entre as geometrias com expansão no teto e original. Como verificado nos resultados da Fig. 6.11, vazões superiores às encontradas por interpolação favorecem a utilização da expansão para o teto.

Para estimar as vazões onde P_{min} de $L_{exp} = 0$ é igual as cada L_{exp} (0,3, 0,6 e 0,9 m), primeiramente devem ser selecionados os dados de P_{min} e classificados pelas respectivas a , Q e L_{exp} , com isso calcula-se a variação de pressão entre as geometrias alteradas e a geometria original, Eq. C.1. Para esta variação, a P_{min} da geometria original será utilizada como referência, logo ΔP_{min} para $L_{exp} = 0$ será nula, conforme a Tab. C.1. Verifica-se nesta tabela que os valores negativos correspondem a P_{min} (com expansão) inferiores à geometria original, consequentemente, para valores positivos P_{min} serão superiores. Com isso, é conveniente utilizar interpolação linear para determinar a vazão, onde ΔP_{min} será nula para as alterações geométricas. Para isto, utiliza-se preferencialmente os valores entre ΔP_{min} positivo e negativo (a excessão foi o caso $a = 70\%$, $L_{exp} = 0,3$ m, onde foi necessário utilizar extrapolação), os valores não utilizados são identificados por asterisco (*).

$$\Delta P_{Min} = P_{Min,Lexp} - P_{Min,Orig} \quad (C.1)$$

Tabela C.1: Seleção das vazões.

Q [m ³ /s]		0,04	0,09	0,18
L_{exp}	a	ΔP_{Min} [Pa] (ref. P_{min} em $L_{exp}=0$ (original))		
0	30	0,00	0,00	0,00
0,3		-122,50	475,78	*2222,88
0,6		-285,66	860,76	*4672,50
0,9		-348,28	1368,90	*7062,45
0	50	0,00	0,00	0,00
0,3		-221,41	94,86	*592,77
0,6		-438,40	131,05	*1386,86
0,9		-603,60	298,56	*2395,15
0	70	0,00	0,00	0,00
0,3		*-264,73	-242,01	-72,07
0,6		*-493,51	-306,60	8,43
0,9		*-681,44	-297,71	166,44