

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE A REDAÇÃO FINAL DA
TESE DEFENDIDA POR ALEX CRISTIANO
RODRIGUES..... E APROVADA
PELA COMISSÃO JULGADORA EM 07.12.2009

Luiz Felipe Moura
ORIENTADOR

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
COMISSÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

Simulação Numérica do Escoamento
sob a Comporta de um Túnel de
Desvio de Usina Hidrelétrica

Autor: Eng. Alex Cristiano Rodrigues
Orientador: Prof. Dr. Luiz Felipe Mendes de Moura

10/2010

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
COMISSÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA
DEPARTAMENTO DE TÉRMICA E FLUIDOS

Simulação Numérica do Escoamento sob a Comporta de um Túnel de Desvio de Usina Hidrelétrica

Autor: Eng. Alex Cristiano Rodrigues
Orientador: Prof. Dr. Luiz Felipe Mendes de Moura

Curso: Engenharia Mecânica
Área de Concentração: Térmica e Fluidos

Dissertação de mestrado acadêmico apresentada à comissão de Pós Graduação da Faculdade de Engenharia Mecânica, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Campinas, Dezembro de 2009
S.P. – Brasil

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA E ARQUITETURA - BAE - UNICAMP

R618a Rodrigues, Alex Cristiano
Análise numérica do escoamento sob a comporta de um túnel de desvio de usina hidrelétrica / Alex Cristiano Rodrigues. --Campinas, SP: [s.n.], 2009.

Orientador: Luiz Felipe Mendes de Moura.
Dissertação de Mestrado - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica.

1. Escoamento. 2. Análise numérica. 3. Usinas hidrelétricas. 4. Fluidodinâmica computacional (CFD). 5. Comportas. I. Moura, Luiz Felipe Mendes. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Mecânica. III. Título.

Título em Inglês: Numerical simulation of the flow under a hydraulic gate in a deviation tunnel of a hydroelectric power plant

Palavras-chave em Inglês: Flow under, Numerical analysis, hydroelectric power , Computational fluid power, Slices

Área de concentração: Térmica e Fluidos

Titulação: Mestre em Engenharia Mecânica

Banca examinadora: Marcelo Moreira Ganzarolli, Yvone de Faria Lemos de Lucca

Data da defesa: 07/12/2009

Programa de Pós Graduação: Engenharia Mecânica

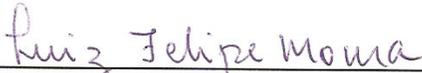
UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
COMISSÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA
DEPARTAMENTO DE TÉRMICA E FLUIDOS

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO ACADÊMICO

**Simulação Numérica do Escoamento
sob a Comporta de um Túnel de
Desvio de Usina Hidrelétrica**

Autor: Eng. Alex Cristiano Rodrigues
Orientador: Prof. Dr. Luiz Felipe Mendes de Moura

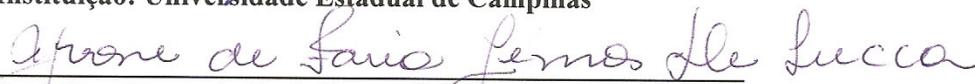
A Banca Examinadora composta pelos membros abaixo aprovou esta Dissertação:



Prof. Dr. Luiz Felipe Mendes de Moura
Instituição: Universidade Estadual de Campinas



Prof. Dr. Marcelo Moreira Ganzarolli
Instituição: Universidade Estadual de Campinas



Prof. Dra. Yvone de Faria Lemos de Lucca
Instituição: Fundação Armando Álvares Penteado

Campinas, 07 de Dezembro de 2009.

Dedicatória:

Dedico este trabalho à minha esposa Solange, companheira de todas as horas.

Agradecimentos:

Agradeço, sobretudo a Deus, pela proteção que sempre me concedeu, durante todo período de estudos e viagens para concretização deste trabalho, e por ser uma presença constante em minha vida.

Aos meus pais Clarice e Ademar e minha irmã Érica, anjos que sempre guiaram meus passos com muita dedicação, carinho e apoio.

A minha esposa Solange, pelo carinho, paciência e compreensão, principalmente nas muitas horas em que estive ausente.

A empresa Bardella S.A. – Indústrias Mecânicas, em especial aos engenheiros Ticao Siguemoto, Rubens Geraldo Günther e Dr. José Roberto Mendes da Silva, pela permissão de utilização das instalações da empresa e por sempre apoiarem com muito entusiasmo os projetos de Pesquisa & Desenvolvimento.

Ao meu orientador, prof. Dr. Luiz Felipe Mendes de Moura, por compartilhar seus conhecimentos, pela confiança e apoio durante minha trajetória de estudos e dissertação.

Ao meu eterno professor e amigo José Afonso Pedrazzi; pessoa rara, que sempre me ensinou e incentivou com muito carinho, paciência e companheirismo durante nossas “*batalhas numéricas*”.

Ao meu grande amigo Germano Gavarrão de Freitas, pelo constante incentivo, apoio e imensa ajuda nas revisões finais.

A todos meus amigos que de alguma forma, contribuíram para a realização deste trabalho: Bia, César, Cibeli, Daniela, Fábio, Rodarte, Toninho e Vitor.

*“Sereis tanto mais influentes quanto
mais fortes, corretos e justos”*
Juscelino Kubitschek de Oliveira

RESUMO

RODRIGUES, Alex Cristiano, *Simulação Numérica do Escoamento sob a Comporta de um Túnel de Desvio de Usina Hidrelétrica*, Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2009. 130 p. Dissertação (Mestrado).

Este trabalho apresenta a utilização de um modelo numérico para a determinação das forças hidrodinâmicas atuantes em comportas planas tipo vagão, utilizadas em obras de desvio de Usinas Hidrelétricas. Para isso foi utilizado o software comercial Fluent, onde foi gerado um modelo numérico tridimensional para diversas aberturas da comporta vagão ensecadeira, a qual é responsável pelo fechamento em definitivo do desvio. A validação dos resultados numéricos foi realizada através da comparação de dados de um modelo físico reduzido previamente estudado em laboratório, onde constatou-se a correta captação e interpretação dos fenômenos hidráulicos presentes, permitindo utilizar sua metodologia para aplicações em obras semelhantes. A vazão e seu respectivo coeficiente de descarga apresentaram diferenças médias da ordem de 8%, as pressões atuantes no fundo do canal apresentam diferenças máximas de 3,6%, enquanto que os esforços hidrodinâmicos registraram diferenças médias de 7%. As maiores variações foram observadas nas menores aberturas, quando a vazão é determinada pela comporta, e as velocidades são mais altas. A título de comparação dos fenômenos hidráulicos, foram levantados os dados pertinentes a outros três ensaios físicos de túneis de desvio. Estes resultados foram comparados com o ensaio numérico e a formulação teórica, indicando que esta última, de uma forma geral, possui resultados mais conservadores.

Palavras Chave: Escoamento, Análise numérica, Usinas hidrelétricas, Fluidodinâmica computacional (CFD), Comportas.

ABSTRACT

RODRIGUES, Alex Cristiano, *Numerical Simulation of The Flow Under a Hydraulic Gate in a Deviation Tunnel of a Hydroelectric Power Plant*, Campinas, Mechanical Engineering, Universidade Estadual de Campinas, 2009. 130 p. Dissertation (Masters Degree).

This work presents a proposal of a numerical model to determine the hydraulic forces acting in fixed wheel gates utilized in hydroelectric power plants. Fluent commercial CFD (computational fluid dynamics) software was used to generate a three-dimensional model of the hydraulic gate; different models were generated for different opening positions of the hydraulic gate. The results obtained from the numerical model were validated by comparing them to results obtained from a reduced model previously built in a hydraulic laboratory. When comparing these results it was possible to realize that the numerical model could well represent the hydraulic effects, allowing possibility of the methodology application for similar works. The volume flow and discharge coefficients presented a average variation of 8%; pressure distribution at the bottom of the canal presented a average variation of 3,6%; and hydraulic forces presented an average of 7% difference. Higher differences occurred at lowest openings, when the flow is mostly controlled by the gate and speed is higher. As a complement to the work, results from three other laboratory reduced models were compared to analytical proposals found in literature and numerical simulation results. These comparisons show that these analytical models are usually conservative.

Key Words: Flow under, Numerical analysis, Hydroelectric power, Computational fluid power, Slices.

Índice

Índice	x
Lista de Figuras	xiii
Lista de Tabelas	xviii
Nomenclatura	xxi
CAPÍTULO 1: INTRODUÇÃO	1
1.1 Considerações gerais	2
1.1.1 Usina hidrelétrica	2
1.1.2 Obras de desvio em usinas hidrelétricas	3
1.1.3 Operação para o fechamento do desvio	6
1.2 Considerações sobre os métodos de solução	8
1.3 Objetivos do presente trabalho	10
1.3.1 Objetivo principal	10
1.3.2 Objetivo secundário	10
1.4 Estrutura do trabalho	11
CAPÍTULO 2: REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	12
2.1 Origem da força de tração para baixo	12
2.2 Cálculo da vazão	13
2.3 Cálculo da abertura crítica	15
2.4 Modelos analíticos	16

2.4.1	Método segundo Knapp	16
2.4.2	Método segundo Hydraulic Design Criteria	18
2.4.3	Método segundo Naudascher, Kobus e Rao	22
2.5	Modelos físicos em escala reduzida	27
2.6	Características hidráulicas dos protótipos	32
2.6.1	UHE Itaparica	32
2.6.2	UHE Capanda	34
2.6.3	UHE Itá	35
CAPÍTULO 3: MODELO FÍSICO REDUZIDO		37
3.1	O empreendimento da UHE Machadinho	37
3.1.1	Principais características hidráulicas	38
3.1.2	Obras de desvio	39
3.1.3	Mecanismo de fechamento	39
3.2	Técnicas de ensaio em modelo físico reduzido	42
3.3	Teoria da semelhança	43
3.3.1	Escalas de correlação	44
3.4	O laboratório de hidráulica da empresa Bardella S.A. Indústrias Mecânicas	45
3.5	Ensaio: túnel de desvio – UHE Machadinho	48
3.5.1	Objetivo e escopo do ensaio realizado	48
3.5.2	Descrição geral do modelo físico reduzido	48
3.5.3	Aparelhagem utilizada e técnica de condução dos ensaios	52
3.5.4	Ensaio realizados	54
3.5.5	Resultados obtidos	57
CAPÍTULO 4: SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL		65
4.1	Modelagem numérica via CFD (Computational Fluids Dynamics)	65
4.2	Software de CFD utilizado	66
4.3	Modelo numérico proposto	66
4.3.1	Considerações gerais	66
4.3.2	Geometria proposta	67
4.3.3	Condições de contorno	68
4.3.4	Geração da malha computacional	71

4.3.5	Condições gerais das simulações	74
4.4	Resultados obtidos	75
4.4.1	Vazão e coeficiente de vazão	75
4.4.2	Pressões ao longo do modelo	78
4.4.3	Força hidrodinâmica	79
CAPÍTULO 5: COMPARAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS		85
5.1	Vazão	85
5.2	Coeficiente de descarga	89
5.3	Pressões atuantes no fundo do canal	92
5.4	Forças hidrodinâmicas	95
CAPÍTULO 6: CONCLUSÕES E SUGESTÕES		106
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS		109
ANEXO I – MECÂNICA DOS FLUIDOS		111
ANEXO II – SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL		121

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO 1

1.1	Potencial Hidráulico no Brasil, segundo relatório do Balanço Energético Nacional	1
1.2	Corte transversal com os principais componentes de uma usina hidrelétrica	2
1.3	Vista geral da construção UHE Itá, localizada na divisa dos municípios de Itá (SC) e Aratiba (RS)	3
1.4	Vista geral da construção da UHE Machadinho, localizado na divisa dos municípios de Maximiliano de Almeida (RS) e Piratuba (SC)	4
1.5	Seção transversal típica de um túnel de desvio	5
1.6	Presas Limón – Peru. Início da abertura do túnel de desvio com a utilização de explosivos, limpeza e conformação da seção do túnel	5
1.7	AHE Serra do Facão – GO. Vista interna do túnel de desvio, e vista do emboque do túnel (montante para jusante)	6
1.8	Desenho ilustrativo de um corte típico de um desvio, identificando os poços das comportas e a comporta vagão ensecadeira	7

CAPÍTULO 2

2.1	Método gráfico para determinação da força de tração para baixo	13
2.2	Valores do coeficiente de descarga de comportas planas, segundo HDC, planilha 320-1	14
2.3	Variáveis aplicadas para o cálculo prático dos esforços de tração para baixo	17

2.4	Variáveis aplicadas para o cálculo da espessura equivalente em comportas com soleiras inclinadas e horizontais	17
2.5	Variáveis aplicadas para o cálculo dos esforços verticais, segundo HDC, planilha 320-2	19
2.6	Valores das forças verticais de baixo para cima de quatro projetos, com cutelo a 45°, segundo HDC, planilha 320-2/1	20
2.7	Valores das forças verticais de cima para baixo de quatro projetos, com cutelo a 45°, segundo HDC, planilha 320-2/1	21
2.8	Parâmetros geométricos da comporta e instalação	22
2.9	Efeito do fluxo em torno de comportas instaladas em túneis	23
2.10	Variação de \bar{K}_B com abertura da comporta para diversos ângulos θ	24
2.11	Variação de \bar{K}_B com abertura da comporta para diversos e/d	24
2.12	Variação de \bar{K}_B com abertura da comporta para diversos r/d	25
2.13	Variação de \bar{K}_B com abertura da comporta para diversos y_0/d	25
2.14	Esquema de definição do local e valores médios de \bar{K}_B	26
2.15	Arranjo de possível cutelo inferior para comportas tipo vagão	27
2.16	Desenho esquemático identificando os principais dados comparados na tabela 2.3	29
2.17	Desenho esquemático da geometria dos cutelos dos ensaios analisados	30
2.18	Vazões dos modelos analisados	31
2.19	Coefficiente de vazão dos modelos analisados	31
2.20	Força hidráulica dos modelos analisados	32
2.21	Vista geral da UHE Luiz Gonzaga	33
2.22	Vista geral da UHE Capanda	34
2.23	Vista geral da UHE Itá	36
CAPÍTULO 3		
3.1	Vista geral da UHE Machadinho	38
3.2	Desenho ilustrativo do tabuleiro da comporta vagão com identificação de seus principais elementos	40
3.3	Comporta vagão acionada através de guincho	40

3.4	Vista da comporta vagão ensecadeira do túnel de desvio da UHE Machadinho	41
3.5	Fases da construção de modelo tridimensional	43
3.6	Vista geral das unidades fabris da empresa Bardella S.A. – Indústrias Mecânicas, unidade de Sorocaba e Guarulhos	45
3.7	Vista geral do Laboratório de Hidráulica da empresa Bardella S.A. – Indústrias Mecânicas localizado na cidade de Sorocaba, S.P.	46
3.8	Visualização de formação de vórtice em ensaio de modelo reduzido	47
3.9	Vista lateral e superior do modelo físico reduzido do túnel de desvio da UHE Machadinho, escala de 1:30	49
3.10	Vista lateral do modelo reduzido do túnel de desvio	50
3.11	Vista da comporta ensecadeira construída em latão, escala de 1:30	50
3.12	Vista superior dos poços da comporta ensecadeira e corta fluxo	51
3.13	Vertedor retangular de soleira delgada	52
3.14	Quadro de multipiezômetro	53
3.15	Vista geral da bancada de ensaios da UHE Machadinho, escala de 1:30	54
3.16	Vista do reservatório de montante com nível d'água na cota 391 m	56
3.17	Vista lateral do modelo reduzido com abertura de 30 % da comporta vagão ensecadeira	56
3.18	Vertedor retangular	57
3.19	Vazão vs abertura da comporta vagão ensecadeira para o protótipo	59
3.20	Coefficiente de vazão do modelo físico reduzido da UHE Machadinho	60
3.21	Indicação das incógnitas utilizadas para o cálculo do coeficiente de vazão	61
3.22	Localização das tomadas de pressão central inferiores do modelo	62
3.23	Pressões nas tomadas inferiores do modelo	63
3.24	Esforços hidrodinâmicos do protótipo	64
CAPÍTULO 4		
4.1	Vista lateral do modelo numérico tridimensional	67
4.2	Perspectiva de parte do modelo numérico tridimensional	67
4.3	Detalhe da comporta vagão ensecadeira do modelo numérico	68
4.4	Condições de contorno aplicadas ao modelo numérico tridimensional	70

4.5	Detalhe da geometria da comporta vagão enseadeira do modelo numérico	70
4.6	Vista lateral da malha computacional tipo M ₄ para 50% de abertura da comporta vagão enseadeira	72
4.7	Perspectiva da malha computacional tipo M ₄ para 50% de abertura da comporta vagão enseadeira	73
4.8	Detalhe da malha computacional tipo M ₄ para a região próxima do cutelo da comporta vagão enseadeira	73
4.9	Vazão em função da abertura da comporta vagão enseadeira para o modelo numérico	76
4.10	Coefficiente de vazão do modelo numérico da UHE Machadinho	77
4.11	Distribuição da pressão no fundo do canal do modelo numérico	78
4.12	Esforços hidrodinâmicos do modelo numérico	80
4.13	Distribuição das pressões no modelo numérico – vista geral para abertura da comporta em 20%	80
4.14	Distribuição das pressões no modelo numérico – detalhe da região próxima a comporta com abertura em 20%	81
4.15	Distribuição das velocidades no modelo numérico – vista geral para abertura da comporta em 20%	81
4.16	Distribuição das pressões no modelo numérico – vista geral para abertura da comporta em 50%	82
4.17	Distribuição das pressões no modelo numérico – detalhe da região próxima a comporta com abertura em 50%	82
4.18	Distribuição das velocidades no modelo numérico – vista geral para abertura da comporta em 50%	83
4.19	Distribuição das pressões no modelo numérico – vista geral para abertura da comporta em 90%	83
4.20	Distribuição das pressões no modelo numérico – detalhe da região próxima a comporta com abertura em 90%	84
4.21	Distribuição das velocidades no modelo numérico – vista geral para abertura da comporta em 90%	84

CAPÍTULO 5

5.1	Vazão em função da abertura da comporta do modelo analítico, físico reduzido e numérico da UHE Machadinho	87
5.2	Vazão em função da abertura da comporta do modelo físico reduzido e numérico da UHE Machadinho	89
5.3	Coefficiente de descarga em função da abertura da comporta para os estudos propostos	90
5.4	Coefficiente de descarga em função da abertura da comporta do modelo físico reduzido e numérico tridimensional da UHE Machadinho	92
5.5	Comparação das pressões atuantes no fundo do canal com abertura da comporta em 20%	93
5.6	Comparação das pressões atuantes no fundo do canal com abertura da comporta em 40%	94
5.7	Comparação das pressões atuantes no fundo do canal com abertura da comporta em 70%	94
5.8	Geometria considerada para o exemplo de aplicação	95
5.9	Gráfico dos valores da abertura crítica e sua localização	97
5.10	Valores dos esforços hidrodinâmicos calculados segundo formulação de Naudascher e Knapp	102
5.11	Comparação dos esforços hidrodinâmicos calculados através dos métodos teóricos e modelo físico reduzido da UHE Machadinho	104
5.12	Comparação dos esforços hidrodinâmicos calculados através do modelo físico reduzido e modelo numérico da UHE Machadinho	106

LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO 2

2.1	Coeficiente de descarga de comportas planas	14
2.2	Ensaio de túneis de desvio de usinas hidrelétricas	28
2.3	Principais características geométricas dos ensaios descritos	29
2.4	UHE Luiz Gonzaga, características gerais do protótipo	33
2.5	UHE Capanda, características gerais do protótipo	35
2.6	UHE Itá, características gerais do protótipo	36

CAPÍTULO 3

3.1	Principais dimensões da comporta ensecadeira da UHE Machadinho	41
3.2	Escalas de correlação modelo / protótipo	48
3.3	Resultados das vazões obtidas no modelo físico reduzido da UHE Machadinho	58
3.4	Resultados dos coeficientes de vazão do modelo físico reduzido da UHE Machadinho	60
3.5	Distância das tomadas inferiores do modelo	61
3.6	Resultados das tomadas de pressão central inferiores para três aberturas da comporta vagão ensecadeira	62
3.7	Força hidrodinâmica no modelo físico reduzido da UHE Machadinho	63

CAPÍTULO 4

4.1	Resultado em função da discretização utilizada no modelo numérico da UHE Machadinho	72
4.2	Coefficientes do modelo k-ε de turbulência	75
4.3	Coefficientes de sub-relaxação utilizados para os modelos numéricos	75
4.4	Resultados da vazão do modelo numérico	76
4.5	Resultados dos coeficientes de vazão do modelo numérico da UHE Machadinho	77
4.6	Resultados numéricos da pressão no fundo do canal para três aberturas da comporta vagão ensecadeira	78
4.7	Resultados da força hidrodinâmica do modelo numérico	79

CAPÍTULO 5

5.1	Cálculo analítico da vazão para a UHE Machadinho	86
5.2	Vazões analíticas, modelo físico reduzido e modelo numérico para a UHE Machadinho	87
5.3	Comparação entre os valores de vazão do modelo físico reduzido e modelo numérico para a UHE Machadinho	88
5.4	Coefficientes de descarga dos estudos propostos	90
5.5	Comparação dos coeficientes de descarga entre o modelo físico reduzido e numérico da UHE Machadinho	91
5.6	Pressões atuantes no fundo do canal para o modelo físico reduzido e numérico da UHE Machadinho	92
5.7	Comparação das diferenças entre os resultados das pressões atuantes no fundo do canal para o modelo físico reduzido e numérico da UHE Machadinho	93
5.8	Cálculo da abertura crítica para a comporta vagão ensecadeira da UHE Machadinho	96
5.9	Cálculo da vazão e velocidade para a abertura crítica	98
5.10	Valores de \bar{K}_B para UHE Machadinho	99
5.11	Valores da força hidrodinâmicas atuantes na UHE Machadinho	100
5.12	Cálculo da espessura equivalente pelo método de Knapp, para a UHE	101

	Machadinho	
5.13	Cálculo dos esforços hidrodinâmicos pelo método de KNAPP para a UHE Machadinho	102
5.14	Valor dos esforços hidráulicos pelos métodos teóricos e modelo físico reduzido da UHE Machadinho	103
5.15	Comparação dos esforços hidráulicos do modelo físico reduzido e modelo numérico da UHE Machadinho	105

NOMENCLATURA

A	Área da seção transversal – [m ²]
a	Abertura da comporta medida a partir da soleira – [m]
A ₁	Área da seção de passagem de montante – [m ²]
A ₂	Área da seção de passagem de jusante – [m ²]
A _s	Área da vedação superior – [m ²]
B	Largura total da comporta – [m]
b	Largura livre – [m]
C ₁	Coefficiente de descarga da seção A ₁
C ₂	Coefficiente de descarga da seção A ₂
C _{cy}	Altura do jato de água contraído – [m]
C _d	Coefficiente de descarga
d	Espessura da comporta – [m]
D	Altura da seção livre a jusante – [m]
d _f	Média da força atuante unitária no topo da comporta – [tf]
D _{P1}	Força hidrodinâmica – [tf]
D _{P2}	Força hidrodinâmica residual – [tf]
D _{P3}	Força hidrodinâmica adicional – [tf]
e	Faca do cutelo – [m]
E	Empuxo de Arquimedes – [tf]
F ₁	Força obtida no transdutor no fechamento – [tf]

$f_1(a)$	Abertura crítica – [m]
F_2	Força obtida no transdutor na abertura – [tf]
F_a	Força de atrito mecânico – [tf]
F_h	Força hidrodinâmica total – [tf]
F_m	Número de Froude no modelo
F_p	Número de Froude no protótipo
g	Aceleração da gravidade – [m/s ²]
H	Carga hidráulica – [m.c.H ₂ O]
h	Carga piezométrica referida ao topo da veia contraída do jato – [m.c.H ₂ O]
H'	Altura medida da superfície do reservatório até o topo da veia contraída – [m]
H''	Diferença entre a carga hidráulica e a metade da abertura da comporta – [m]
h_j	Carga piezométrica referida do perfil inferior da comporta – [m.c.H ₂ O]
h_T	Carga piezométrica referida ao topo da comporta – [m.c.H ₂ O]
k	Coefficiente de correção devido a perda de borda
K	Aferição no transdutor
K_B	Coefficiente da parte inferior da comporta
K_T	Coefficiente da parte superior da comporta
L	Dimensão primária do comprimento – [m]
L_1, L_2	Leituras no transdutor de força – [tf]
L_v	Largura do vertedor – [m]
m	Tangente do ângulo da inclinação da comporta
P	Força hidrodinâmica e gravitacional atuante – [tf]
P_c	Peso do modelo da comporta – [tf]
Q	Vazão – [m ³ /s]
Q_c	Vazão crítica – [m ³ /s]
Q_m	Vazão média – [m ³ /s]
r	Raio do cutelo da comporta – [m]
S	Resultante das forças atuantes no polígono das forças – [kgf]
S_1	Força perpendicular – [kgf]
S_2	Força vertical – [kgf]
S_v	Força de tração para baixo – [kgf]

T	Espessura da comporta – [m]
T_1	Espessura do cutelo da comporta – [m]
T_e	Espessura equivalente da comporta – [m]
u_f	Média da força atuante unitária no fundo da comporta – [kgf]
V	Velocidade – [m/s]
V_1	Velocidade na seção contraída – [m/s]
V_c	Velocidade crítica – [m/s]
V_j	Velocidade na veia contraída – [m/s]
W	Peso seco da comporta – [tf]
y	Abertura da comporta – [m]
y_0	Altura livre – [m]
α	Inclinação da soleira – [°]
β	Ângulo do cutelo da comporta – [°]
γ	Peso específico da água – [kgf/m ³]
λ	Escala de correlação modelo / protótipo
μ_m	Coefficiente local do vertedor

CAPÍTULO 1: INTRODUÇÃO

O Brasil possui aproximadamente 18% dos recursos hídricos superficiais do planeta e 11% da produção hidrelétrica mundial, estando a frente de países como Canadá, Rússia e Estados Unidos. Segundo Balanço Energético de 2009 – ano base 2008, emitido pela EPE – Empresa de Pesquisa Energética, o potencial hidráulico nacional é de 260 GW, embora apenas 32% são aproveitados; dos 68% não aproveitados, 56% correspondem à região amazônica.

Atualmente 80% da energia gerada no país provêm de usinas hidrelétricas. Este tipo de energia é de fundamental importância para o país, pois é uma energia limpa e renovável, possuindo emissão de CO₂ não significativa, e é desenvolvida com engenharia e parque industrial 100% nacional.

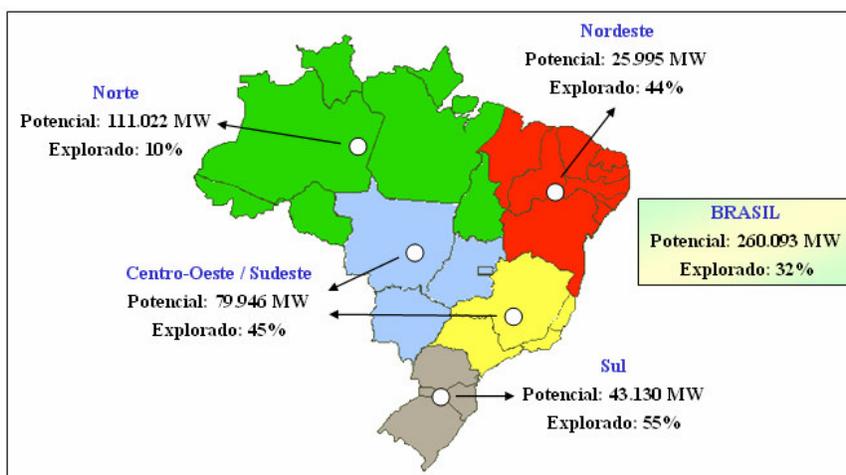


Figura 1.1 – Potencial Hidráulico no Brasil, segundo relatório do Balanço Energético Nacional

[<https://ben.epe.gov.br/>]

1.1 – Considerações Gerais

1.1.1 – Usina Hidrelétrica

Uma usina hidrelétrica é um complexo arquitetônico ou um conjunto de obras e equipamentos, projetados para operar de forma harmoniosa e eficiente, com a finalidade de geração de energia elétrica, através do aproveitamento do potencial hidráulico existente em um rio.

Basicamente, uma usina hidrelétrica compõe-se das seguintes partes: barragem do reservatório, sistema de captação e adução de água, sistema de controle de nível d'água, casa de força e sistema de restituição da água ao leito natural do rio.

De maneira geral, a água que está represada no rio entra por uma estrutura hidráulica denominada tomada d'água. Esta estrutura realiza a condução da massa de água através de condutos forçados (grandes tubulações metálicas) até a casa de força. Após passar pela turbina hidráulica, na casa de força, essa massa de água é restituída ao leito natural do rio através do tubo de sucção.

Dessa forma, a água passa pela turbina, faz com que a mesma adquira determinada rotação, aproveitando assim a energia mecânica potencial. Um gerador elétrico que também está acoplado mecanicamente à turbina é o responsável pela transformação da energia mecânica em energia elétrica.

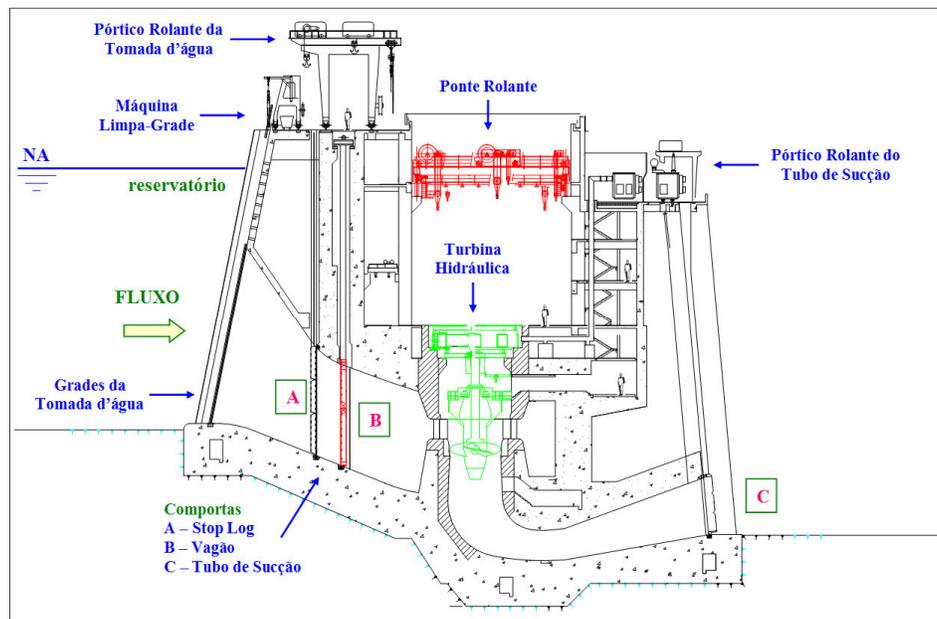


Figura 1.2 – Corte transversal com os principais componentes de uma usina hidrelétrica.

A energia elétrica gerada é levada através de cabos ou barras condutoras dos terminais do gerador até o transformador elevador. Sua tensão (voltagem) é elevada para adequada condução, através de linhas de transmissão até os centros de consumo. Nesses centros, através de transformadores abaixadores, a energia tem sua tensão reduzida a níveis adequados para utilização e distribuição aos consumidores.

1.1.2 – Obras de Desvio em Usinas Hidrelétricas

Um dos ramos da engenharia hidráulica, ligado diretamente à produção de energia elétrica, possui interesse particular em estudar o comportamento da massa de água através de um túnel de desvio de uma usina hidrelétrica.

É fato que a construção de uma usina hidrelétrica se dá dentro do leito do rio, por essa razão existe a necessidade de desviar o mesmo, para possibilitar a construção em área seca. Para a realização dessa primeira etapa são construídas obras denominadas de ensecadeiras.

Em sua maioria, as ensecadeiras são construídas de terra ou de enrocamento (maciço composto por blocos de rochas compactados), com núcleo ou tapete de material impermeável. Tais obras possuem como característica grande largura em razão da necessidade de estabilidades dos taludes.

Pela variedade das condições do local da obra, e das possibilidades de sua subdivisão em fases de construção e do desvio do rio, não é possível estabelecer regras comuns para todos os casos (SCHREIBER, 1987), pois se trata de um estudo de soluções pertencentes à engenharia.



Figura 1.3 – Vista geral da construção da UHE Itá, localizada na divisa dos municípios de Itá (SC) e Aratiba (RS).



Figura 1.4 – Vista geral da construção da UHE Machadinho, localizada na divisa dos municípios de Maximiliano de Almeida (RS) e Piratuba (SC)

As obras destinadas ao desvio do curso d'água, juntamente com as ensecadeiras, fazem parte das primeiras movimentações; que dependem de condições geográficas, topológicas, regimes hidrológicos e principalmente da vazão máxima que deve ser esperada durante a construção.

Desvios são em geral obras provisórias, e devem ser pelo menos parcialmente destruídos ou fechados depois de sua utilização. O custo dos desvios pode ser diminuído, nos casos em que estes possam ser utilizados em definitivo.

Uma opção para a viabilização de obras de desvio é através de um canal escavado em rocha, localizado em uma abertura lateral a montante do empreendimento, que permita o desvio do rio. Essa opção de utilização se dá basicamente pela topografia do local de implantação da barragem, onde os vales são mais estreitos e os rios caracterizam-se por serem mais encaixados.

Além das favoráveis condições topográficas do empreendimento, obras de desvio, através de canais escavados em rocha, possuem grande dependência da hidráulica, que devem analisar e considerar os seguintes aspectos:

- curva chave do rio, para a determinação da vazão de projeto, assim como a estimativa de período de retorno e cheias,
- quantidade de túneis utilizados e seus respectivos diâmetros,
- carga hidráulica atuante, juntamente com o nível d'água em que o túnel estará submetido durante a manobra de fechamento.

Túneis de desvio possuem secção geométrica transversal “tipo túnel”, conforme sugere o nome, o qual é constituído por duas partes: a inferior de secção quadrada ou retangular, e a superior, em forma de arco. Dessa forma, trabalha como um canal fechado; possui essa geometria para evitar a ocorrência de ressalto hidráulico contra o teto, que por razões de flutuação de pressão poderiam provocar danos ao mesmo.

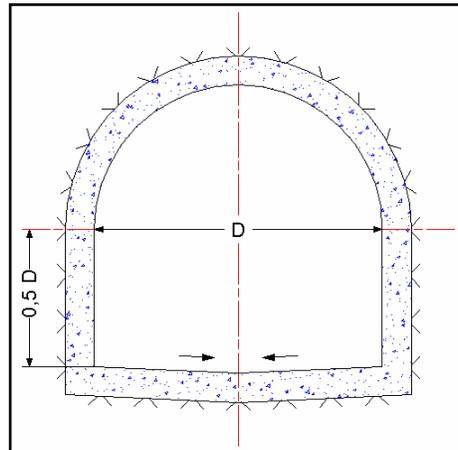


Figura 1.5 – Seção transversal típica de um túnel de desvio

Sua escavação inicial é feita através de explosivos. Em seguida são utilizadas máquinas projetadas para escavação de túneis ou mesmo tratores para se obter sua geometria final. Pode ainda receber revestimento interno com o objetivo de impermeabilização, ou reforço para estabilização estrutural.



Figura 1.6 – Presa Limón – Peru. Início da abertura do túnel de desvio com a utilização de explosivos, limpeza e conformação da seção do túnel.



Figura 1.7 – AHE Serra do Facão – GO. Vista interna do túnel de desvio, e vista do emboque do túnel (montante para jusante).

No interior do túnel é instalado um conjunto de comportas que serão responsáveis pelo fechamento em definitivo do desvio. Por razões de segurança nesta operação, a mesma deve ocorrer na época em que o nível do rio encontra-se em sua menor cota.

A partir dessa manobra de fechamento, a qual é realizada uma única vez, inicia-se naturalmente o enchimento do reservatório a montante da obra, comumente denominado de alteamento do lago.

1.1.3 – Operação para o Fechamento do Desvio

O procedimento de fechamento de um desvio é sempre motivo de apreensão por parte dos engenheiros hidráulicos e mecânicos. Além dos riscos de possíveis atrasos e alterações de custos, há os riscos da adequação do projeto dos equipamentos ao sucesso da operação.

Em relação aos equipamentos hidromecânicos utilizados, de uma forma geral, a configuração do desvio é composta por:

- uma unidade de comporta vagão ensecadeira
- uma unidade de comporta vagão corta fluxo
- mecanismo de manobra (guindaste / servomotor)

A primeira comporta tipo vagão é a principal comporta da operação de fechamento e recebe o nome de comporta vagão ensecadeira; a comporta secundária nessa operação recebe o nome de comporta vagão corta fluxo, ambas estão indicadas no desenho ilustrativo da figura 1.8.

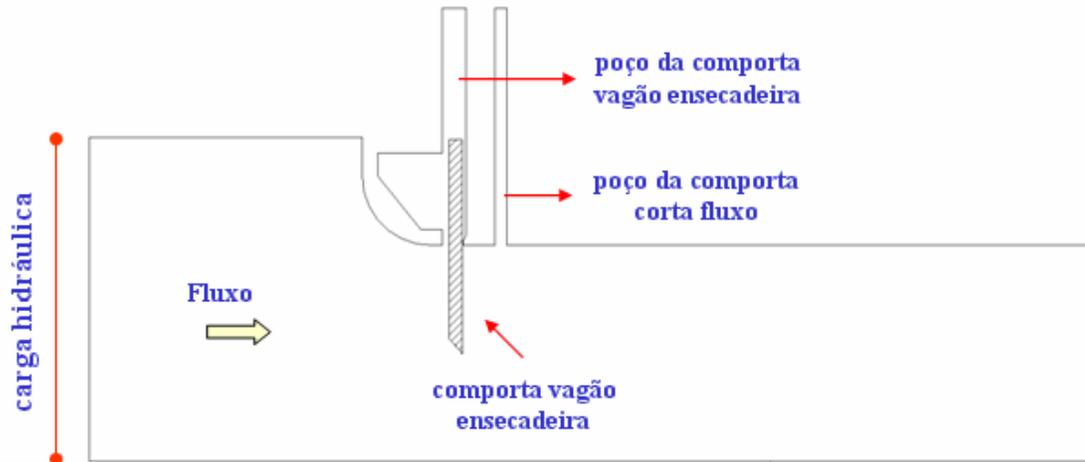


Figura 1.8 - Desenho ilustrativo de um corte típico de um desvio, identificando os poços das comportas e a comporta vagão ensecadeira.

O início da operação de fechamento se dá pelo abaixamento da comporta vagão ensecadeira, através de guindaste ou pórtico rolante. É a principal comporta do conjunto, possui a função de fechar o desvio e deve possuir preponderância para tal, isto é; seu peso próprio deve ser superior as forças contrárias ao fechamento como: uplift (força para cima) somados a parcela das forças de atrito adicionadas em 25% (NBR 8883, 2008).

Além disso, verifica-se através da geometria mostrada na figura 1.8, a presença de um reservatório de montante, juntamente com a sua ranhura, sendo uma garantia adicional de carga d'água a ser imposta na comporta, auxiliando no fechamento da mesma e pressionando a vedação que se encontra a jusante.

A comporta vagão ensecadeira é dimensionada para resistir aos esforços da carga hidráulica do projeto quando o reservatório atingir sua capacidade máxima, portanto, seu perfeito fechamento é de vital importância para a continuidade dos trabalhos na obra.

Caso a comporta vagão ensecadeira apresente algum impedimento do movimento na descida, imediatamente deve-se acionar a comporta corta fluxo, que possui estrutura menos robusta que a principal comporta. Essa manobra é necessária, pois se a primeira comporta está impedida de realizar seu movimento vertical o nível de carga hidráulica a montante vai, naturalmente, atingindo níveis cada vez maiores, pressionando a vedação e aumentando significativamente as forças que impedem a retirada da mesma.

Sendo assim, a comporta corta fluxo entra em operação somente no caso da principal comporta não fechar corretamente, interrompendo o fluxo local e aliviando a carga hidráulica atuante na primeira comporta.

Segundo (QUINTELA e ABECASIS, 1971) as comportas devem ser dotadas de servomotores para as manobras, pois o planejamento feito para o fechamento em definitivo do desvio, deve prever que o nível de montante possa subir rapidamente após a descida da comporta.

Dá-se o nome de lei de manobra a todas as considerações e cálculos necessários para o correto manuseio da comporta; dessa forma a estrutura é analisada de uma forma geral, levando-se em consideração seu peso próprio, atritos advindos das vedações e rodas, tempo e velocidade de abaixamento, portanto os esforços hidrodinâmicos atuantes na comporta é um item que está implícito na lei de manobra.

Apesar disso, sua correta determinação é de vital importância, pois envolve coeficientes hidráulicos, que muitas vezes só são possíveis de se determinar em laboratórios, utilizando modelos físicos reduzidos, em escala adequada, isto é, seguindo as leis de semelhança mecânica (MOTTA, 1972).

Os demais itens envolvidos na lei de manobra, e não de menor importância, possuem vasta literatura, com comportamento físico bem caracterizado e descrito pela engenharia mecânica.

Percebe-se então, a necessidade da correta interpretação da física envolvida na determinação das forças hidrodinâmicas da comporta, pois esses valores são utilizados em seu próprio dimensionamento, bem como na capacidade do equipamento de levantamento (pórtico rolante ou guindaste).

1.2 – Considerações sobre os Métodos de Solução

Para resolução de problemas aplicados a engenharia, temos a possibilidade de utilização de três métodos, a saber:

- método analítico: trata-se da formulação clássica, mais conservativa; é baseado na resolução de equações diferenciais onde existe uma simplificação da complexidade e das condições de contorno do problema a ser resolvido. Possui como vantagem a resolução do

problema de uma forma teórica, com utilização de poucos recursos, faz uso de coeficientes experimentais consagrados, porém não abrangível para todas as aplicações.

- modelo físico em escala reduzida: trata-se de experimentação em laboratório. Possui como grande vantagem o fato de se tratar da configuração real. Na ausência de modelos matemáticos estabelecidos e geometrias complexas, muitas vezes é a única alternativa; entretanto, apesar dos resultados laboratoriais sejam os que melhor representem o problema físico, muitas vezes a sua execução e a quantidade de ensaios realizados são limitadas pelo tempo e custo disponível para o projeto.
- modelagem numérica: de forma análoga ao modelo analítico, também é baseada na resolução de equações diferenciais; porém, praticamente não apresenta restrições, podendo resolver problemas com geometrias mais complexas e várias condições de contorno. Com o crescente avanço da informática, torna-se uma poderosa ferramenta; entretanto, deve-se tomar extrema cautela na análise e confiabilidade dos resultados obtidos, pois trata-se da interpretação da física através de equacionamento matemático.

Tanto a utilização do método analítico como a construção de modelo físico reduzido, são recursos bastante explorados para a resolução de problemas nessa área da engenharia, isso se dá pelo fato de que as formulações atuais propostas se mostram eficientes, para a grande maioria dos casos estudados. A análise numérica voltada para a área de fluidos, é mais uma importante ferramenta para a resolução dos problemas; fenômenos como superfície livre, turbulência e modelos tridimensionais complexos são passíveis de resolução apenas recentemente, pois os pacotes comerciais de CFD têm evoluído com grande rapidez, mas ainda com aplicações pouco utilizadas.

É importante salientar que este trabalho, não tem a intenção de definir qual a melhor ferramenta a ser utilizada para resolução de problemas aplicados à engenharia; mesmo porque, as aplicações são extremamente variadas. Uma regra básica, que deve ser observada em engenharia, (MALISKA, 1995) é o uso da ferramenta adequada ao tamanho do problema em questão.

1.3 – Objetivos do Presente Trabalho

1.3.1 – Objetivo Principal

O objetivo principal deste trabalho é apresentar uma solução numérica, para a determinação dos esforços hidrodinâmicos em uma comporta vagão ensecadeira de um túnel de desvio, escavado em rocha.

Para isso será utilizado um pacote comercial de CFD (Computational Fluids Dynamics), onde será implementado um modelo numérico representativo de um túnel de desvio, juntamente com o equipamento hidráulico responsável pelo seu fechamento.

Através desse modelo numérico serão determinadas as forças hidrodinâmicas atuantes na comporta vagão, e com o intuito de avaliar a capacidade da simulação numérica seus resultados serão comparados com ensaios em modelo físico reduzido e resultados teóricos.

O modelo numérico proposto neste trabalho, também contribui significativamente para:

- segurança: os esforços hidrodinâmicos encontrados serão utilizados para auxiliar na determinação da lei de manobra e a estrutura da comporta,
- custo: a utilização de coeficientes de segurança mais próximos da realidade física, possui um peso significativo no custo do equipamento,
- tempo de análise: a diminuição da quantidade de ensaios em modelo físico reduzido, proporcionam maior rapidez na análise dos resultados.

1.3.2 – Objetivo Secundário

Como objetivo secundário, pretende-se dar mais uma contribuição à engenharia hidráulica voltada a área de usinas hidrelétricas. Estruturas hidráulicas para a produção de energia são bastante discutidas, mas a aplicação de modelagem numérica é ainda objeto de constante investigação, pois envolvem grandes modelos e coeficientes hidráulicos de difícil implementação.

Deseja-se ainda afirmar que modelos numéricos fornecem uma grande contribuição; sendo uma alternativa viável em estudos iniciais (fase de implementação) ou mesmo na decisão final dos projetos (geometrias e dimensionamento dos equipamentos).

1.4 – Estrutura do Trabalho

Este presente trabalho apresenta um estudo numérico realizado através de um pacote computacional de CFD disponível no mercado, a respeito das forças hidráulicas atuantes em comportas tipo vagão, no interior de túneis de desvio escavados em rochas, de usinas hidrelétricas.

O trabalho está dividido em outros cinco capítulos e dois anexos.

O capítulo dois apresenta as principais referências bibliográficas para o cálculo das forças hidráulicas verticais, conhecido também como downpull. Abrange ainda uma série de resultados obtidos através de modelos físicos reduzidos, que comprovam os cálculos teóricos propostos, apresentando assim os coeficientes obtidos através desses ensaios.

No capítulo três é apresentado o modelo físico reduzido que servirá como base de comparação. Trata-se de um ensaio de túnel de desvio executado pelo Laboratório de Hidráulica da empresa Bardella S.A. – Indústrias Mecânicas, confeccionado na escala de 1:30.

O capítulo quatro mostrará a modelagem numérica realizada, baseado no modelo físico reduzido, apresentado no capítulo anterior.

No quinto capítulo serão comparados os resultados obtidos através da formulação teórica, com os resultados do laboratório e os ensaios realizados através de modelo computacional.

No capítulo final serão apresentadas as conclusões do trabalho com base nos resultados obtidos, os quais avaliam a aplicabilidade da metodologia, bem como as suas contribuições no desenvolvimento de um projeto. Serão também apresentadas sugestões para novas avaliações e considerações necessárias para complementação dos estudos nessa área.

Os anexos I e II apresentam respectivamente os equações representativas dos escoamentos, advindos da formulação clássica da mecânica dos fluidos e a metodologia adotada pelo método dos volumes finitos.

CAPÍTULO 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo é apresentada uma revisão bibliográfica, sobre a carga que age ao longo da linha de movimento da comporta, conhecida por “downpull” ou força de tração para baixo.

Os efeitos hidrodinâmicos presente nas comportas, em especial na sua parte inferior, são ainda objeto de constantes estudos e pesquisas. A quantidade de literatura técnica disponível sobre o assunto é pequena e muitas vezes aplicada somente aos casos particulares estudados, gerando dificuldade na extrapolação dos dados para outras configurações.

A magnitude das forças hidrodinâmicas envolvidas dependem das condições totais de fluxo da estrutura, da geometria da comporta e do canal. Por razões econômicas e principalmente de segurança, uma confiável estimativa de valores é essencial para o projeto da comporta e do seu respectivo mecanismo de elevação.

2.1 – Origem da força de tração para baixo

Ao se realizar o movimento de uma comporta, o estado de carga estático transforma-se em um estado dinâmico. Portanto, a explicação para a existência da força de tração para baixo está no fato de que a maior parte do fluxo (massa de água) passa sob a comporta, onde é acelerado e conseqüentemente ocorre a diminuição da pressão.

Na parte superior da comporta, a velocidade do escoamento é baixa, portanto, a diminuição da pressão é menor nessa região, podendo ser considerada, em termos práticos, igual a pressão estática.

A força de tração para baixo, depende do projeto da comporta e principalmente da geometria da parte inferior da mesma, também conhecida como cutelo. De uma forma geral, é necessária uma investigação das forças atuantes em qualquer superfície de uma comporta, que apresente declive em relação ao escoamento e esteja em um local de grande velocidade de água.

Na prática a pressão exercida pela água atua sempre perpendicularmente a superfície da comporta, pode-se para efeitos de visualização e identificação, desenhar um polígono das forças de tração para baixo atuantes na região do cutelo, conforme demonstrado na figura 2.1.

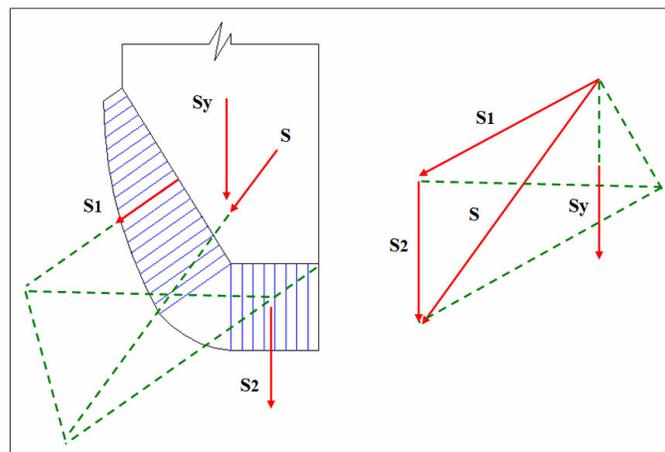


Figura 2.1 – Método gráfico para determinação da força de tração para baixo.

Para aplicação do método gráfico é indispensável o conhecimento do valor da vazão para cada abertura da comporta, uma vez que, a força de tração para baixo sofre constante modificação enquanto a comporta estiver em movimento.

2.2 – Cálculo da Vazão

O cálculo da vazão que passa sob a comporta possui ligação direta com o coeficiente de descarga, denominado de C_d . Em comportas planas tipo vagão, esse coeficiente é bastante sensível a abertura e conformação geométrica do cutelo da comporta.

Segundo (U. S. ARMY CORPS OF ENGINEERS, Hydraulic Design Criteria, 1961), o cálculo da vazão pode ser expresso pela equação básica do orifício, da seguinte forma:

$$Q = C_d \cdot y \cdot b \cdot \sqrt{2gH'} \quad (2.1)$$

onde: Q = vazão [m^3/s], C_d = coeficiente de descarga (ou coeficiente de vazão), y = abertura da comporta [m], b = largura livre da comporta [m], H' = altura medida da superfície do reservatório de montante até o topo da veia contraída [m], e g = aceleração da gravidade [m/s^2].

O Hydraulic Design Criteria (HDC), na planilha 320-1, apresenta coeficientes de descarga que foram determinados através de testes em modelos reduzidos e medições “*in loco*”, também denominados de protótipos, com comportas apresentando variados perfis de cutelo.

Os valores dos coeficientes de descarga devem ser determinados para cada caso, realizando para isso medições através de modelos físicos reduzidos; porém, na ausência de valores específicos pode-se utilizar os valores sugeridos pelo HDC, independente do ângulo do cutelo da comporta (ERBISTI, 2002).

Os respectivos valores do coeficiente de descarga ou vazão, para cada abertura da comporta, são mostrados na tabela 2.1 e de forma gráfica na figura 2.2.

Tabela 2.1 – Coeficiente de descarga de comportas planas, segundo HDC, planilha 320-1.

abertura da comporta [%]	10	20	30	40	50	60	70	80	90
coeficiente de descarga [C_d]	0,73	0,73	0,74	0,74	0,75	0,77	0,78	0,80	0,80

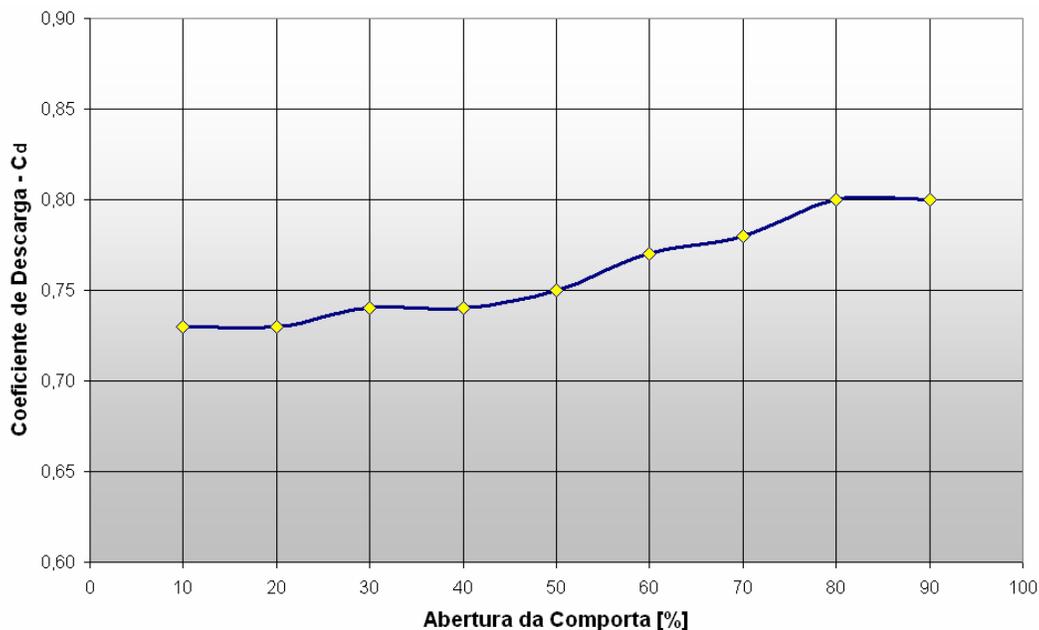


Figura 2.2 – Valores do coeficiente de descarga para comportas planas, segundo HDC, planilha 320-1.

2.3 – Cálculo da Abertura Crítica

O cálculo analítico das forças hidrodinâmicas atuantes em comportas tipo vagão, é uma tarefa que exige uma série de considerações de ordem geométrica. Essas considerações são explicadas pelas inúmeras configurações adotadas na concepção do projeto, onde cada equipamento é dimensionado de acordo com as características da obra e de sua utilização.

Dessa maneira, nem sempre é possível encontrar diretamente nas tabelas e gráficos os valores correspondentes às incógnitas, como consequência os resultados analíticos em geral apresentam valores mais conservadores ou ainda, necessitam de ensaios em modelo físico reduzido, para comprovação dos seus resultados.

Na manobra de fechamento da comporta vagão ensecadeira, a vazão que está passando tende a diminuir inicialmente, de forma lenta, devido ao estrangulamento da seção. A partir de um determinado valor da abertura, essa vazão é controlada exclusivamente pela comporta.

Essa referida abertura é denominada abertura crítica, sua posição pode ser expressa pela seguinte equação:

$$f_1(a) = b^2 \cdot a^2 \cdot \left\{ 1 + \left(\frac{S}{b \cdot D} \right)^2 \cdot \left[k' \cdot \left(\frac{D}{a} - 1 \right)^2 \right] \right\} \quad (2.2)$$

onde: b = largura livre [m], a = abertura da comporta medida a partir da soleira [m], D = altura da seção livre a jusante [m], k' = coeficiente de correção devido a perda de borda, com valor constante de 0,6.

O valor de S , onde H é a carga hidráulica, pode ser expresso como:

$$S = \frac{Q}{\sqrt{2 \cdot g \cdot H}} \quad (2.3)$$

A localização para a abertura crítica pode ser expressa por:

$$f_2(a) = S^2 \cdot \frac{(D/2)}{H - D} \quad (2.4)$$

Para valores acima da abertura crítica, a equação (2.5) é aplicada para o novo cálculo da vazão e velocidades correspondentes.

$$Q_C = S \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot g \cdot H}{1 + \left(\frac{S}{b \cdot D}\right)^2 \cdot \left[k \cdot \left(\frac{D}{a} - 1\right)^2\right]}} \quad (2.5)$$

2.4 – Modelos Analíticos

2.4.1 – Método segundo Knapp

Um método simplificado para a obtenção das forças hidrodinâmicas, que possui uma boa correspondência com dados obtidos nos ensaios, porém apresentando resultados conservadores foi desenvolvido por (KNAPP, 1960) onde a comporta é considerada como tendo uma abertura regular e constante ao longo de sua espessura, dessa forma introduz o conceito de “espessura equivalente”.

Esse valor varia ao longo do movimento de abertura da comporta e é determinado em função da forma do perfil inferior (cutelo) e da geometria da soleira. Através desse método, Knapp analisa somente comportas tipo face de barragem e não faz qualquer menção às folgas entre a comporta e as paredes do poço vertical, portanto, a influência da projeção da vedação superior e da chapa de paramento não é considerada.

O cálculo da força de tração para baixo, pode ser obtido através da seguinte equação:

$$S_v = \gamma \cdot b \cdot \left(\frac{V_1^2}{2g}\right) \cdot T_e \quad (2.6)$$

onde: γ = peso específico do fluido [kg/m^3], b = largura da comporta [m], V_1 = velocidade na seção contraída [m/s], g = aceleração da gravidade [m/s^2].

A variável T_e representa a espessura equivalente da comporta, expressa por:

$$T_e = S^2 \int_0^T \frac{dx}{r^2} \quad (2.7)$$

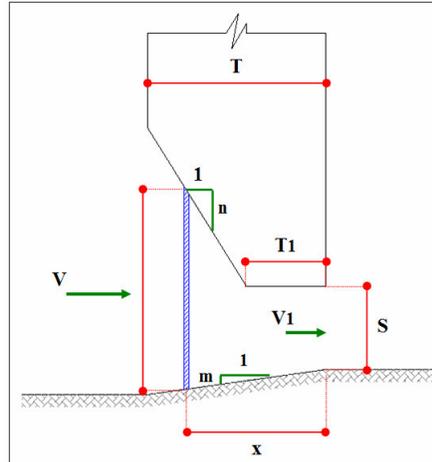


Figura 2.3 – Variáveis aplicadas para o cálculo prático dos esforços de tração para baixo.

A expressão (2.7) que representa a espessura equivalente da comporta, também pode ser apresentada da seguinte forma:

$$Te = \left[\frac{T_1}{S \cdot (mT_1 + s)} + \frac{T - T_1}{(m + n)^2 \cdot \left(T + \frac{S - nT_1}{m + n}\right) \cdot \left(T_1 + \frac{S - nT_1}{m + n}\right)} \right] \cdot S^2 \quad (2.8)$$

Todas as grandezas contidas na equação (2.8) representam dimensões da geometria do cutelo da comporta, portanto, o cálculo da espessura equivalente depende exclusivamente de uma única variável, a abertura da comporta. A comporta pode ainda apresentar soleira inclinada ou horizontal, conforme ilustrado na figura 2.4.

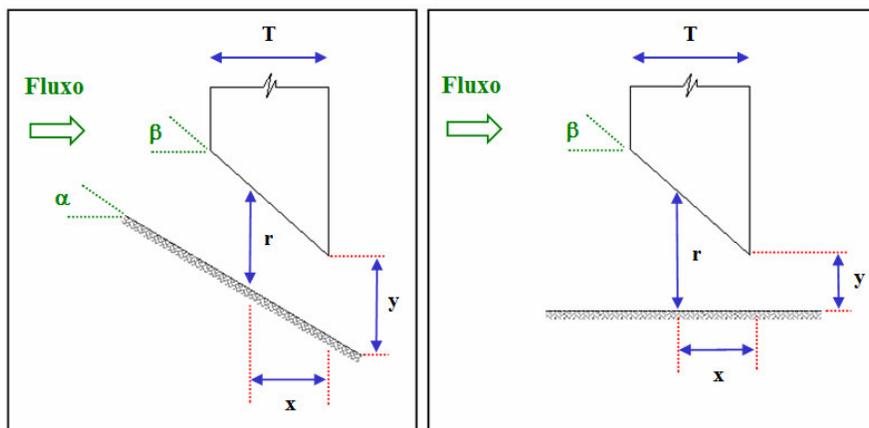


Figura 2.4 – Variáveis aplicadas para o cálculo da espessura equivalente em comportas com soleiras inclinadas e horizontais.

Para o caso da soleira inclinada, a equação (2.7) é apresentada da seguinte forma:

$$T_e = y^2 \int_0^T \frac{dx}{[y + x \cdot (\operatorname{tg}\beta - \operatorname{tg}\alpha)]^2} = \frac{T y}{T \cdot (\operatorname{tg}\beta - \operatorname{tg}\alpha) + y} \quad (2.9)$$

De maneira análoga, quando a soleira apresenta-se na posição horizontal, a equação (2.7) é escrita da seguinte forma:

$$T_e = y^2 \int_0^T \frac{dx}{(y + x \cdot \operatorname{tg}\beta)^2} = \frac{T y}{T \cdot \operatorname{tg}\beta + y} \quad (2.10)$$

2.4.2 – Método segundo Hydraulic Design Criteria

Segundo (U. S. ARMY CORPS OF ENGINEERS, Hydraulic Design Criteria, 1961), as forças verticais atuantes em comportas planas podem ser determinadas considerando-se um paralelepípedo retangular, apresentado na figura 2.1, onde o eixo vertical coincide com a direção da gravidade.

Sendo o corpo estanque, a força pode ser calculada como a diferença entre a pressão no topo (força para baixo) e a pressão no fundo (força para cima); não levando em consideração a pressão de água na face de montante.

Dessa maneira, a resultante dos esforços verticais, sem considerar nenhum fator de atrito, pode ser apresentada da seguinte forma:

$$P = W + A \cdot (d_f - u_f) \cdot \gamma \quad (2.11)$$

onde: P = força hidrodinâmica e gravitacional atuante [tf], W = peso seco da comporta [tf], A = área da seção transversal [m²], d_f = média da força atuante unitária no topo da comporta [tf], u_f = média da força atuante unitária no fundo da comporta [tf]; e γ = peso específico da água [998,2 kgf/m³].

A figura 2.5 reproduz o gráfico 320-2 do HDC, onde demonstra as variáveis aplicadas na expressão (2.11), para o cálculo dos esforços verticais.

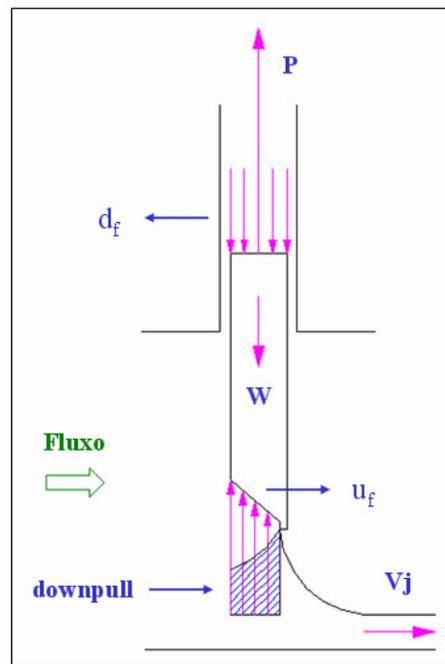


Figura 2.5 – Variáveis aplicadas para o cálculo dos esforços verticais, segundo HDC, planilha 320-2.

O valor das variáveis u_f e d_f que representam respectivamente as forças atuantes no fundo e no topo da comporta podem ser obtidos, através dos gráficos 320-2/1 e 320/2-2 apresentados respectivamente nas figuras 2.6 e 2.7, propostos pelo HDC.

A variável u_f , força de baixo para cima foi determinada através de dados de pressão observados de quatro projetos, onde os mesmos apresentavam inclinação do cutelo igual a 45° ; os traçados dos dados indicam que a largura média da tubulação em razão da espessura da comporta é um fator na magnitude da força para cima.

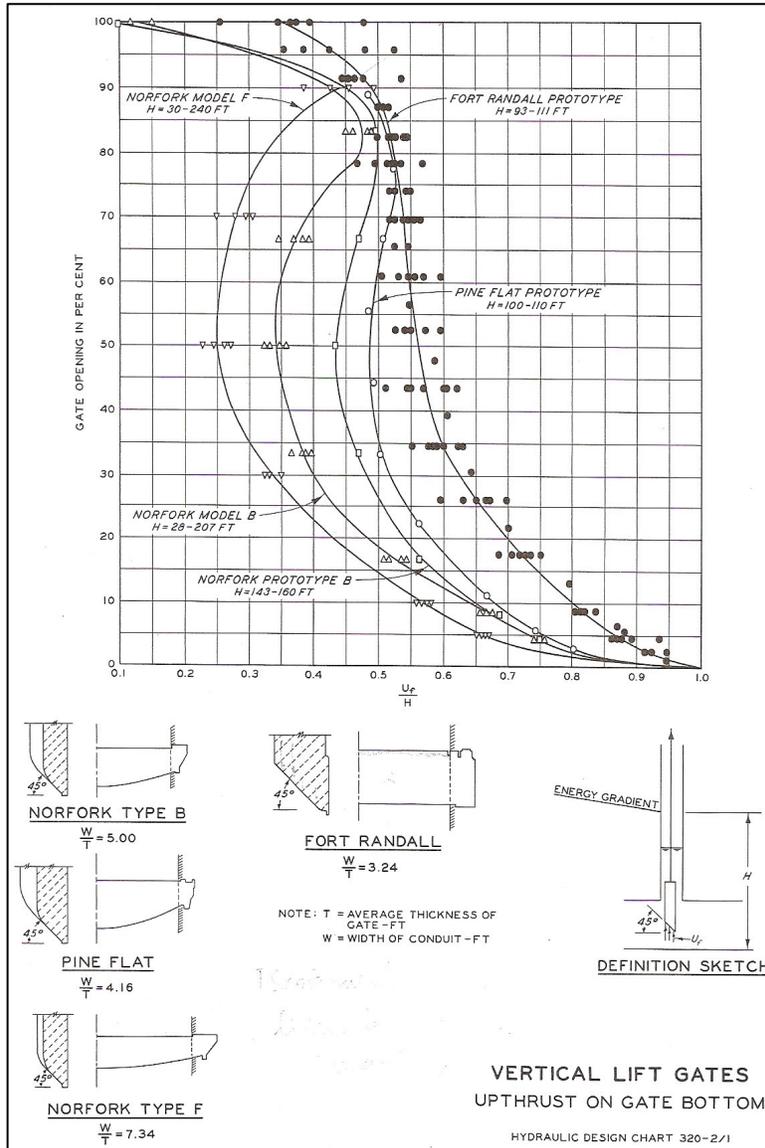


Figura 2.6 – Valores das forças verticais de baixo para cima de quatro projetos, com cutelo a 45°, segundo HDC, planilha 320-2/1.

O gráfico que demonstra os valores das forças de baixo para cima d_f , foram obtidos através de ensaios realizados em campo, tendo como base as pressões exercidas pela altura da coluna d'água no poço da comporta.

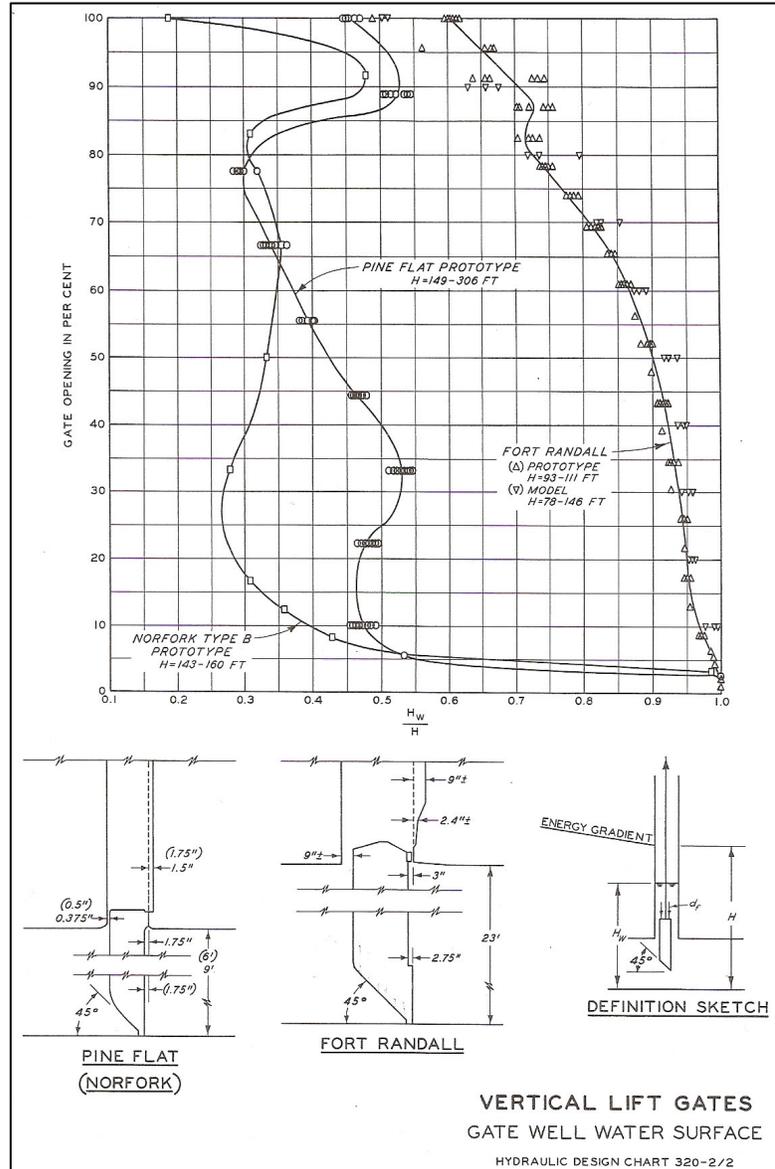


Figura 2.7 – Valores das forças verticais de cima para baixo de quatro projetos, com cutelo a 45°, segundo HDC, planilha 320-2/2.

2.4.3 – Método segundo Naudascher, Kobus e Rao

Segundo (NAUDASCHER, KOBUS e RAO, 1964) a maior parte da força de tração para baixo é resultante das diferenças entre as forças de pressão que agem nas superfícies superior e inferior da comporta, e uma porção residual de menor valor, agindo sobre a vedação e outras saliências da comporta.

Cada uma das forças pode ser expressa pela razão k da respectiva carga piezométrica e uma referida carga de velocidade. O significado dos termos k assim obtido é independente da magnitude absoluta da velocidade do fluxo. Uma vez determinado, ele pode ser usado em combinação com qualquer condição de fluxo, desde que a geometria de contorno seja similar e que o número de Reynolds seja suficientemente grande.

Dessa forma, a análise da força de tração para baixo é reduzida ao cálculo dos termos k , para uma particular configuração da geometria, carga de velocidade e condição de fluxo. Nesses termos a carga hidrodinâmica pode ser calculada pela expressão:

$$D_{PI} = (\bar{K}_T - \bar{K}_B) B d \gamma \frac{V_j^2}{2g} P \quad (2.12)$$

onde: \bar{K}_T e \bar{K}_B = coeficientes da parte superior e inferior da comporta respectivamente, B = largura total da comporta [m], d = espessura da comporta [m], γ = peso específico da água [tf/m^3], V_j = velocidade na veia contraída [m/s]; e g = aceleração da gravidade [m/s^2].

Para o cálculo dos coeficientes \bar{K}_T e \bar{K}_B é necessária uma consideração sobre os parâmetros geométricos da comporta e sua instalação, apresentados na figura 2.8.

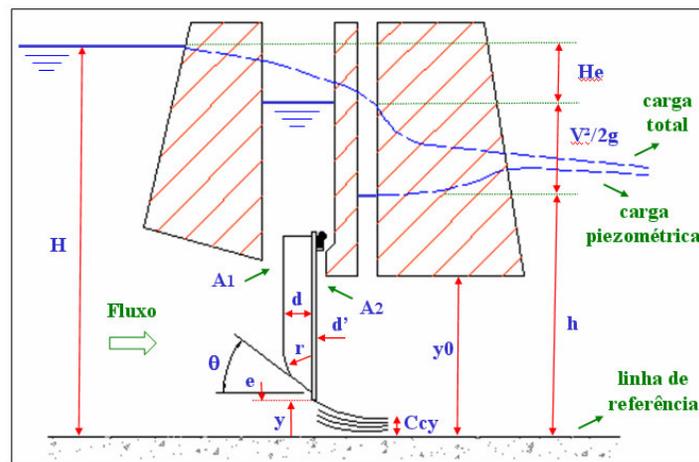


Figura 2.8 – Parâmetros geométricos da comporta e instalação.

Os coeficientes \bar{K}_T e \bar{K}_B são respectivamente:

$$\bar{K}_T = \frac{1}{Bd} \int_0^d \int_0^B \frac{h_T - h}{\frac{V_j^2}{2g}} dB dx = \frac{1}{1 + \left(\frac{C_2 A_2}{C_1 A_1} \right)^2} \quad (2.13)$$

$$\bar{K}_B = \frac{1}{Bd} \int_0^d \int_0^B \frac{h_j - h}{\frac{V_j^2}{2g}} dB dx \quad (2.14)$$

onde: h_T , h_j , e h = cargas piezométricas referidas ao topo da comporta, a um ponto qualquer do perfil inferior da comporta, e ao topo da veia contraída do jato, respectivamente; A_1 e A_2 são as áreas de seção de passagem entre montante e jusante da comporta e C_1 e C_2 são os coeficientes de descarga das seções A_1 e A_2 .

Sendo conhecidos os valores de C_1 , C_2 , A_1 e A_2 , o coeficiente \bar{K}_T pode ser determinado graficamente, através da figura 2.9.

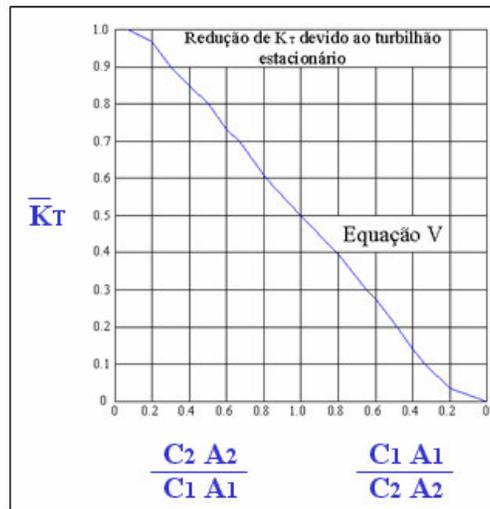


Figura 2.9 – Efeito do fluxo em torno do topo de comportas instaladas em túneis.

Experiências realizadas por (NAUDASCHER, KOBUS E RAO, 1964) demonstraram uma boa correspondência entre o método analítico proposto, equação (2.12), e valores obtidos em testes de modelo físico reduzido.

Os gráficos apresentados nas figuras 2.10 a 2.13 demonstram a influência de vários parâmetros geométricos da comporta para o cálculo do coeficiente \bar{K}_B .

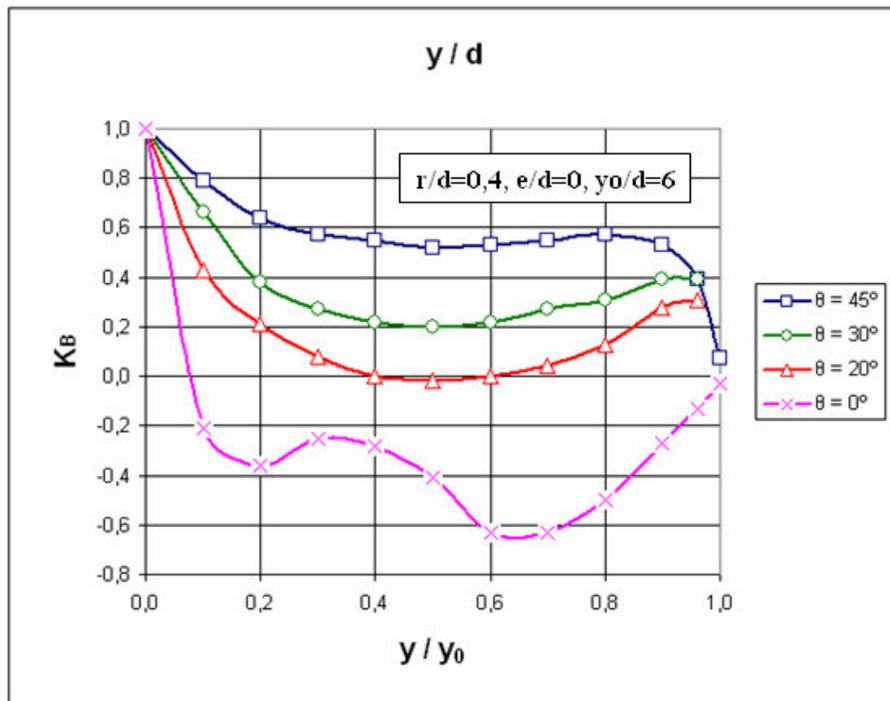


Figura 2.10 – Variação de \bar{K}_B com abertura da comporta para diversos ângulos θ .

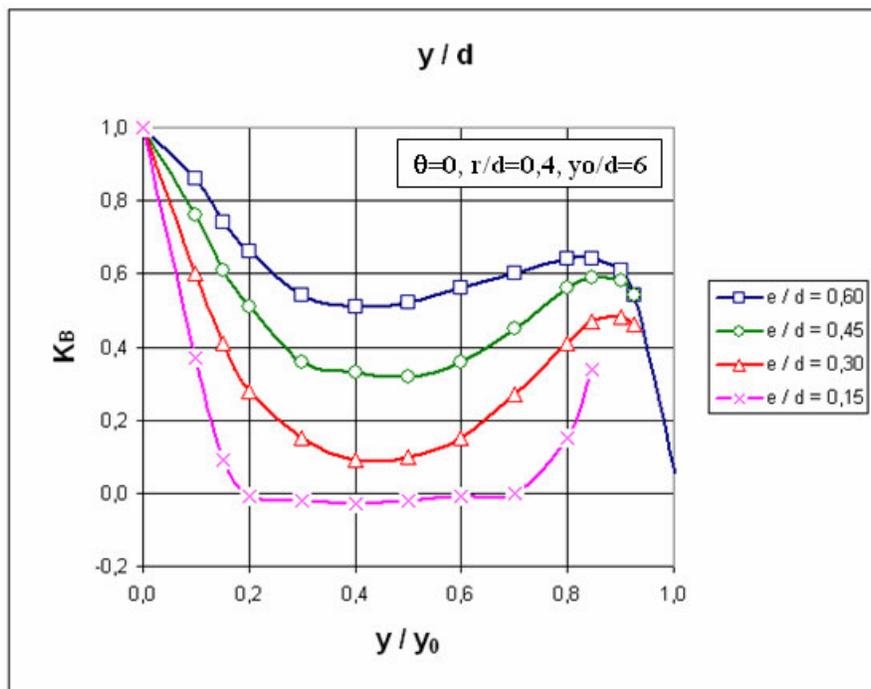


Figura 2.11 – Variação de \bar{K}_B com abertura da comporta para diversos e/d .

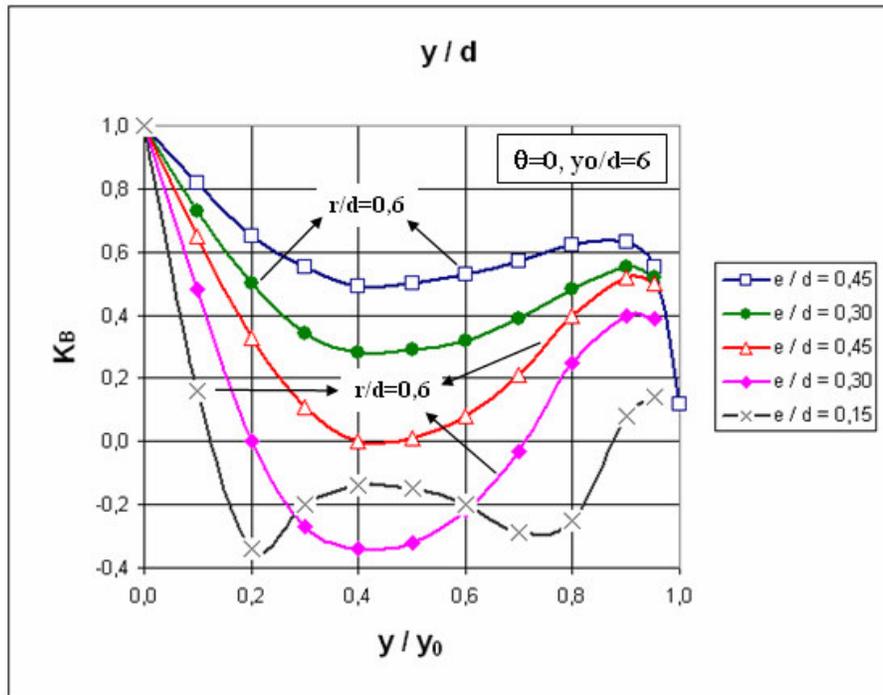


Figura 2.12 – Variação de \bar{K}_B com abertura da comporta para diversos r/d .

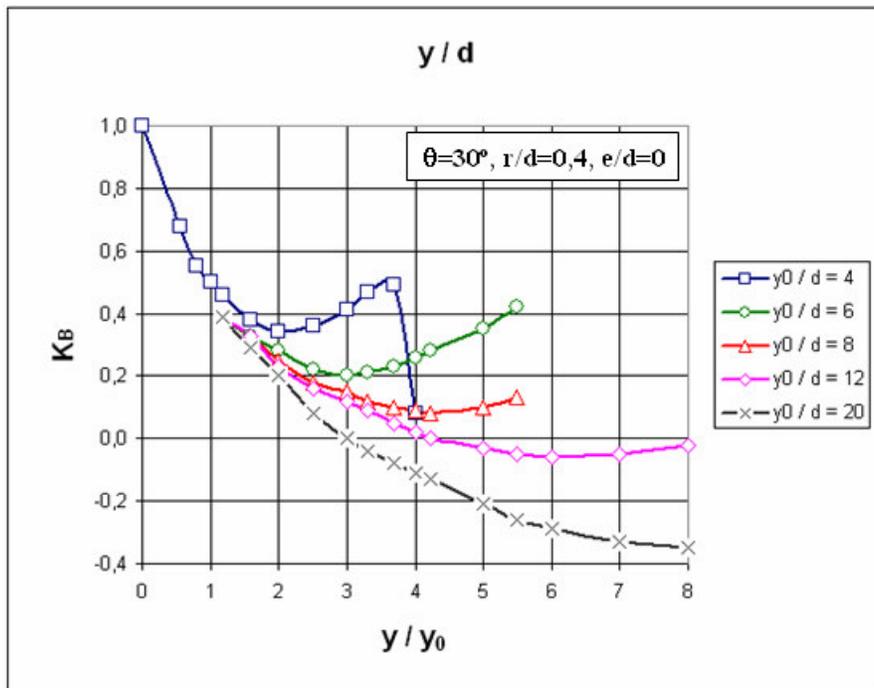


Figura 2.13 – Variação de \bar{K}_B com abertura da comporta para diversos y_0/d .

Os dados do coeficiente \bar{K}_B foram obtidos por integração gráfica da distribuição da carga piezométrica, medida ao longo do perfil inferior da comporta, conforme ilustrado na figura 2.14 e de acordo com a equação (2.14).

O monitoramento do valor da força hidrodinâmica pode ser feito através do coeficiente \bar{K}_B , através da definição ou dimensionamento das passagens em torno do topo da comporta, essas variáveis são de grande importância em comportas instaladas em poços ou túneis, pois pequenas mudanças na relação entre as áreas A_1 e A_2 afetam sensivelmente o valor da força hidrodinâmica D_{P1} (ERBISTI 2002).

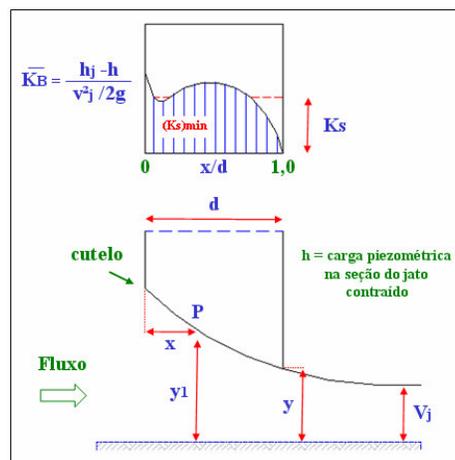


Figura 2.14 – Esquema de definição do local e valores médios de \bar{K}_B .

A parte denominada de residual da força de tração para baixo tem origem na diferença de pressões que agem nas saliências horizontais da comporta, como por exemplo, a vedação superior, denominada por A_s .

Para os casos onde a água não é liberada sobre a comporta, a força residual pode ser escrita da seguinte forma:

$$D_{P2} = \bar{K}_T A_s \gamma \frac{V_j^2}{2g} \quad (2.15)$$

Porém, a presença de uma fenda na face frontal da vedação superior, agirá para equalizar a pressão no lado superior e inferior, eliminando a referida força nessa região.

Para as comporta que apresentam um formato de cutelo semelhante ao ilustrado na figura 2.15, uma força adicional D_{P3} deve ser considerada.

$$D_{P3} = \bar{K}_T d' \gamma \frac{V_j^2}{2g} \quad (2.16)$$

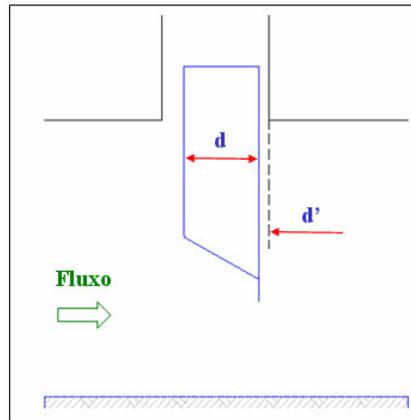


Figura 2.15 – Arranjo de possível cutelo inferior para comportas vagão.

2.5 – Modelos Físicos em Escala Reduzida

Uma ferramenta bastante explorada é a utilização de modelos físicos em escala reduzida, para a determinação das forças hidrodinâmicas, em especial, as forças de tração para baixo, atuantes em comportas tipo vagão de usinas hidrelétricas.

Apontada como a metodologia mais confiável, por se tratar da configuração real do problema, seu custo e tempo de execução levam desvantagem em relação aos modelos matemáticos e numéricos. Porém, em muitos casos o ensaio laboratorial é a única alternativa para complementação e validação desses modelos.

A engenharia hidráulica voltada para essa específica área de investigação, procura as melhores formas e dimensões atribuídas às grandes obras hidráulicas, com o objetivo de se chegar aos melhores rendimentos do equipamento estudado, bem como as condições de segurança e economia.

As pesquisas que se fundamentam na teoria da semelhança (MOTTA, 1972) para a construção dos modelos, são realizadas para definir o projeto de uma única obra de alto custo, cujo investimento justifique as despesas de construção, exploração e manutenção dos modelos reduzidos.

As forças predominantes em comporta vagão, no interior de túneis de desvio, são também objetos de investigação através de modelos físicos em escala reduzida.

É verdadeira a idéia de que cada ensaio em laboratório é único, por possuir características peculiares de cada obra. Porém, com a finalidade de buscar relações gerais entre os modelos, são apresentados para comparação, quatro ensaios de modelos físicos reduzidos, relativos a comporta vagão no interior de túneis de desvio; a tabela 2.2 apresenta os respectivos ensaios.

Tabela 2.2 – Ensaio de túneis de desvio de usinas hidrelétricas.

usina hidrelétrica	data	escala	responsável pelo estudo
Itaparica	07/1982	1:28	CTH – Centro Tecnológico de Hidráulica
Capanda	07/1988	1:25	CTH – Centro Tecnológico de Hidráulica
Itá	03/1997	1:30	Bardella S.A. – Indústrias Mecânicas
Machadinho	04/1999	1:30	Bardella S.A. – Indústrias Mecânicas

Em todos os ensaios citados na tabela 2.2 o objetivo principal foi a determinação das forças hidrodinâmicas atuantes na comporta vagão ensecadeira, que é a principal comporta do equipamento, pois é a responsável pelo fechamento em definitivo do desvio. Além disso, os valores máximos encontrados são utilizados para dimensionar o mecanismo de manobra.

Os relatórios, além dos esforços na comporta vagão ensecadeira, apresentam os resultados da vazão, para vários níveis de carga e a distribuição das pressões ao longo do modelo físico, para aberturas da comporta no intervalo de 5 a 100%.

Com o objetivo de demonstrar similaridade dos resultados, entre os modelos físicos, serão comparadas as vazões para o máximo nível de carga hidráulica e seus respectivos coeficientes; e os esforços hidrodinâmicos atuantes na comporta vagão ensecadeira.

As técnicas utilizadas para os ensaios são as tradicionais e documentadas na Associação Brasileira de Normas Técnicas, Norma Brasileira 8883, atualmente em sua versão / ano 2009; detalhes dos procedimentos e premissas adotados nos ensaios são descritos no capítulo três.

De maneira geral o procedimento se resume em: definição da escala, construção do modelo (utilização de chapas metálicas e acrílicas), locação do modelo, instalação e aferição do sistema de aquisição de dados, coleta dos dados experimentais nos pontos de interesse e confecção de relatório final.

As principais características geométricas dos protótipos apresentados como objeto de comparação, estão indicadas na tabela 2.3 e ilustradas de maneira esquemática na figura 2.16.

Tabela 2.3 – Principais características geométricas dos ensaios descritos.

Dados	Itaparica	Capanda	Itá	Machadinho
Cota nível máximo [m]	290	864	281,5	291
Cota soleira [m]	249	847	262,5	270
Carga hidráulica [m]	41	17	19	21
Altura livre [m]	9	16,9	14	14
Largura livre [m]	5,3	12	4,2	4,2
Espessura da comporta [m]	0,8	2,6	1,05	0,86

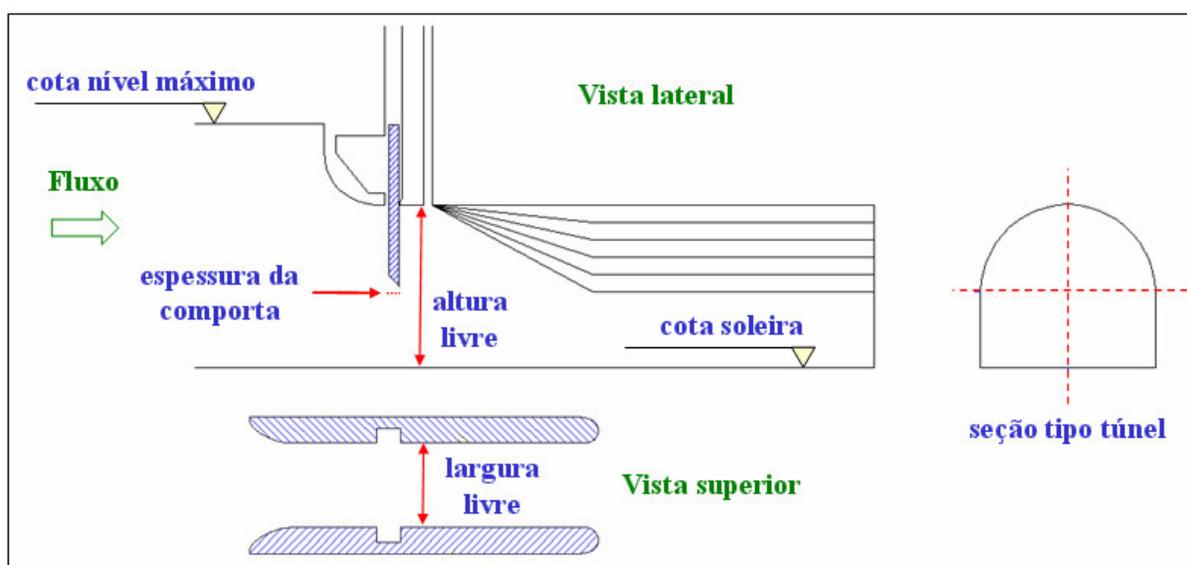


Figura 2.16 – Desenho esquemático identificando os principais dados comparados na tabela 2.3.

Para todos os ensaios apresentados a comporta utilizada para o fechamento do desvio é do tipo vagão, confeccionada em elemento único com vedação a jusante. Os respectivos cutelos de cada comporta estão indicados na figura 2.17.

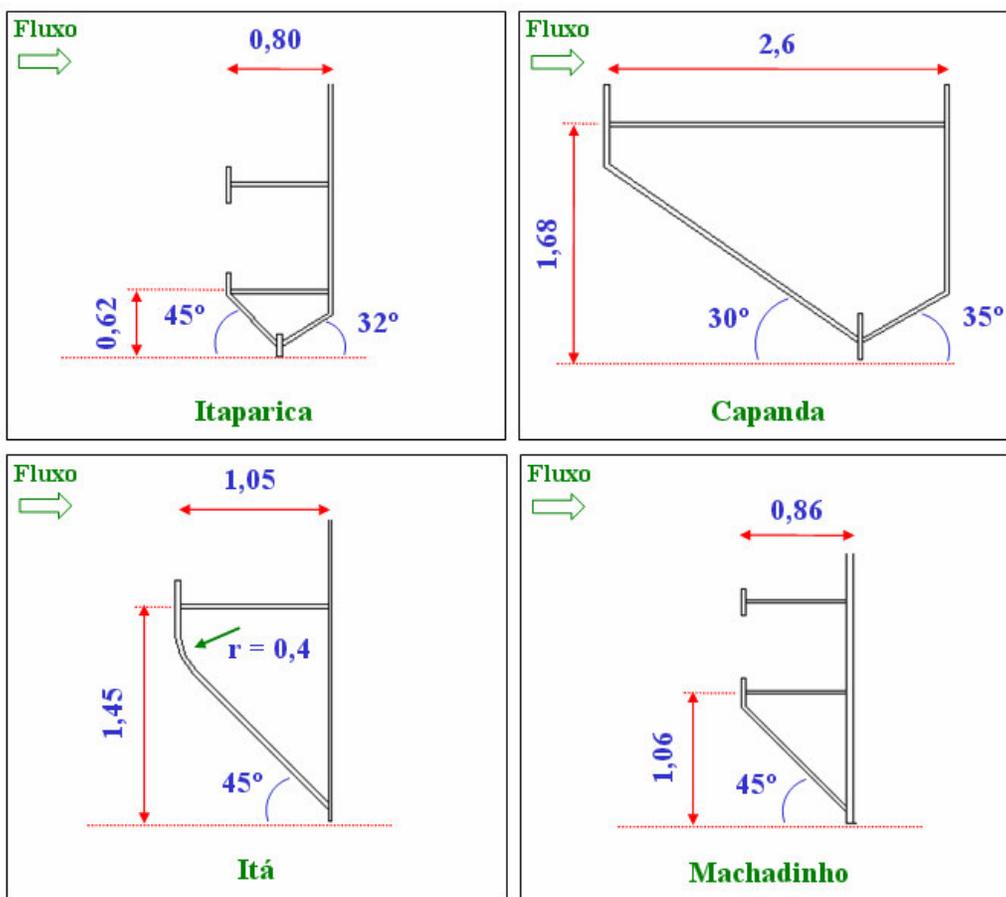


Figura 2.17 – Desenho esquemático da geometria dos cutelos dos ensaios analisados.

Os gráficos com os resultados das vazões, coeficiente de vazão e esforços hidrodinâmicos, são mostrados nas figuras 2.18 a 2.20, respectivamente. A análise dos resultados bem como seus respectivos comentários estão descritos no capítulo cinco.

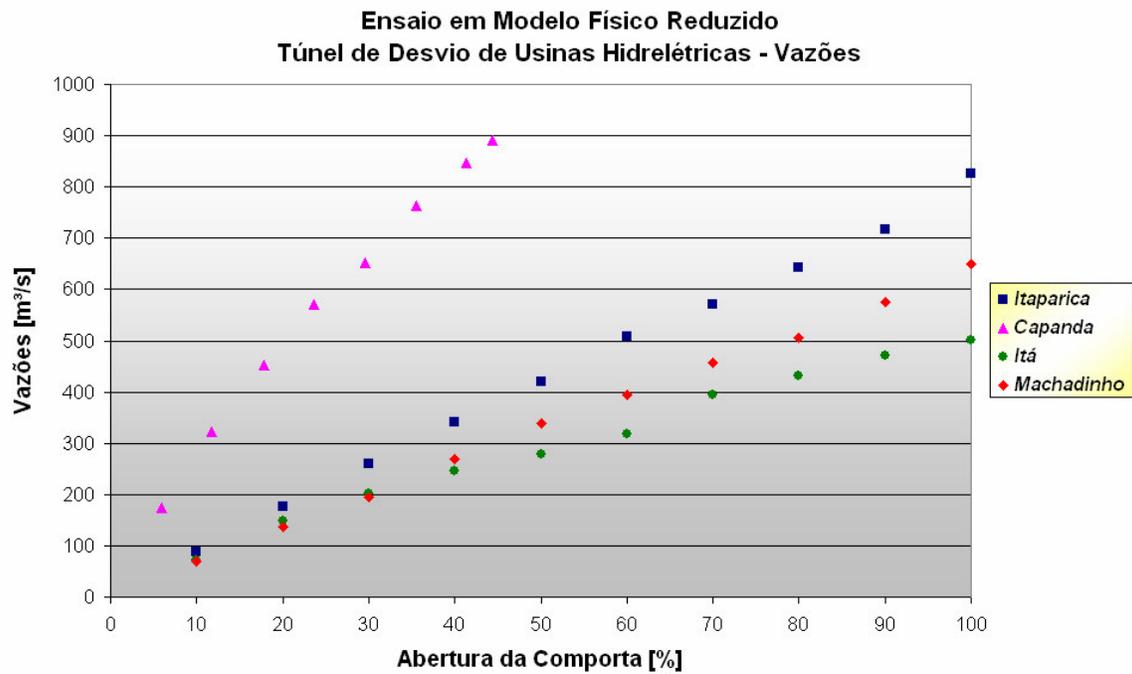


Figura 2.18 – Vazões dos modelos analisados.

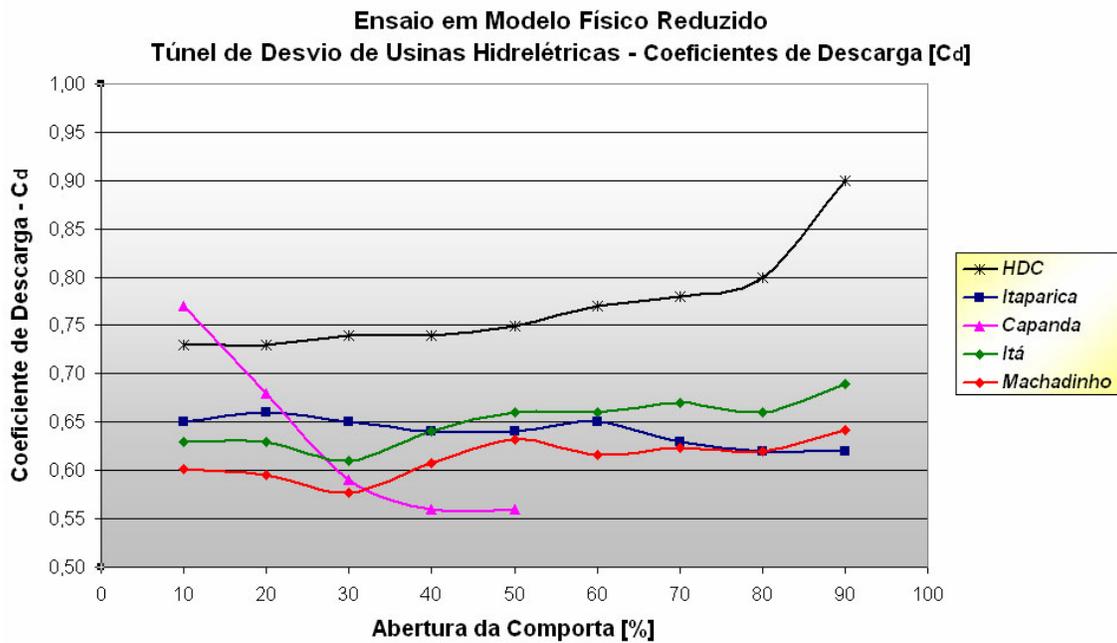


Figura 2.19 – Coeficiente de descarga dos modelos analisados.

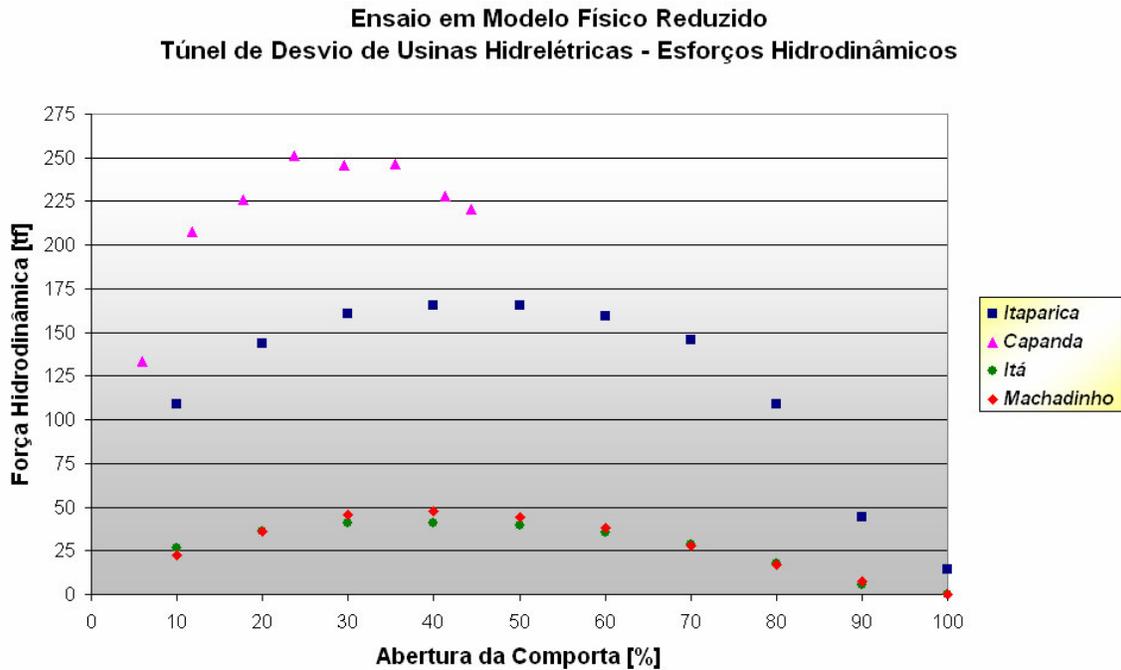


Figura 2.20 – Força hidrodinâmica dos modelos analisados.

2.6 – Características Hidráulicas dos Protótipos

As principais características hidráulicas dos protótipos analisados, tabela 2.2, são descritas neste item com exceção da UHE Machadinho. Por ser objeto principal de estudo e comparação de seus resultados, a mesma está descrita em maiores detalhes no capítulo três.

2.6.1 – UHE Itaparica

Para atender a crescente demanda do desenvolvimento industrial do Nordeste na década de 80, e aproveitando o potencial hidráulico do rio São Francisco, foi construído pela CHESF – Companhia Hidro Elétrica do São Francisco, a UHE Itaparica hoje denominada UHE Luiz Gonzaga.

Localizada no estado de Pernambuco a 25 quilômetros a jusante da cidade de Petrolândia e a 50 quilômetros a montante do Complexo Hidrelétrico de Paulo Afonso, possui além da função de geração de energia elétrica, a de regularização das vazões afluentes diárias e semanais daquelas usinas.

A UHE Luiz Gonzaga possui seis unidades geradoras de 250 MW, compostas por turbinas tipo Francis, totalizando 1500 MW para geração; seu projeto contempla a adição de quatro unidades iguais às que estão em operação atualmente.

O reservatório formado pelo represamento do rio São Francisco em Itaparica inundou uma área de 834 quilômetros quadrados, entre os estados de Pernambuco e Bahia com acumulação de 10,78 bilhões de metros cúbicos de água.



Figura 2.21 – Vista geral da UHE Luiz Gonzaga.

As características gerais do protótipo, segundo o relatório de ensaio do CTH são mostradas na tabela 2.4.

Tabela 2.4 – UHE Luiz Gonzaga, características gerais do protótipo.

itens	dados
Largura da galeria	5,25 [m]
Altura da galeria	9 [m]
Cota nível máximo	290 [m]
Cota soleira	249 [m]
Tipo de comporta	vagão
Localização da vedação	jusante
Velocidade de fechamento	4 [m/min]
Altura da comporta	10,26 [m]
Largura da comporta	6,51 [m]

2.6.2 – UHE Capanda

Localizada em Angola, na província de Malange, a 360 quilômetros de Luanda, a Usina Hidrelétrica de Capanda está instalada no Rio Kwanza. É o maior rio que nasce e deságua em território angolano, e possui o maior potencial de geração hídrica do país.

As obras foram iniciadas em 1987 através da criação de um consórcio entre as empresas Technopromexport da Rússia e Odebrecht do Brasil. Em 1992 em razão de conflitos militares na região a obra foi paralisada e toda infra-estrutura e equipamentos foram destruídos. A retomada se deu no ano de 1997, sofrendo nova paralisação durante o ano de 1999. Somente em janeiro de 2004 a barragem começou a fornecer energia elétrica a Luanda.

Possui quatro unidades geradores com capacidade individual de 130 MW, totalizando 520 MW. Sua barragem possui 110 m de altura e 1.470 m de comprimento e seu reservatório formou um lago de aproximadamente 164 quilômetros quadrados.



Figura 2.22 – Vista geral da UHE Capanda.

As características gerais do protótipo, segundo o relatório de ensaio do CTH são mostradas na tabela 2.5.

Tabela 2.5 – UHE Capanda, características gerais do protótipo.

itens	dados
Largura da galeria	12,0 [m]
Altura da galeria	14,9 [m]
Cota nível máximo	864 [m]
Cota soleira	847 [m]
Tipo de comporta	vagão
Localização da vedação	jusante
Velocidade de fechamento	0,2 [m/min]
Altura da comporta	18,3 [m]
Largura da comporta	13,3 [m]

2.6.3 – UHE Itá

Localizada na divisa dos estados de Santa Catarina e Rio Grande do Sul, a UHE Itá iniciou suas primeiras movimentações em março de 1996, através da criação do consórcio Itá, composto pela união de três grandes empresas dos setores de geração de energia: Tractebel Energia, Siderurgia CSN e Cimento Itambé, sendo a primeira grande usina hidrelétrica nacional concluída pelo setor privado.

O enchimento do reservatório com capacidade de 141 quilômetros quadrados foi realizado em 2000, com o fechamento em definitivo do desvio do rio Uruguai. No ano de 2001 iniciou seu pleno funcionamento de geração de energia, que é realizado através de cinco turbinas tipo Francis, com capacidade individual de 290 MW, totalizando 1450 MW. Sua barragem constituída por enrocamento com face de concreto, possui altura de 125 m com comprimento de 880 m.

O empreendimento é reconhecido pela consciência social e conservação ambiental, durante a construção da usina foram desenvolvidos 23 programas ambientais, dentre eles: a restauração da faixa de vegetação ciliar, a implantação de um horto botânico, apoio às comunidades, resgate e preservação do patrimônio arqueológico.



Figura 2.23 – Vista geral da UHE Itá.

As características gerais do protótipo, segundo o relatório de ensaio da empresa Bardella S.A. – Indústrias Mecânicas são mostradas na tabela 2.6.

Tabela 2.6 – UHE Itá, características gerais do protótipo.

itens	dados
Largura da galeria	14 [m]
Altura da galeria	14 [m]
Cota nível máximo	281,5 [m]
Cota soleira	262,5 [m]
Tipo de comporta	vagão
Localização da vedação	jusante
Velocidade de fechamento	2,5 [m/min]
Altura da comporta	14,3 [m]
Largura da comporta	4,65 [m]

CAPÍTULO 3: MODELO FÍSICO REDUZIDO

Este capítulo tem como objetivo apresentar os resultados parciais do estudo do modelo físico reduzido bidimensional, construído na escala geométrica de 1:30, do Túnel de Desvio da UHE Machadinho. Este ensaio foi realizado pelo laboratório de hidráulica da empresa Bardella S.A. – Indústrias Mecânicas, e seus resultados principais foram objetos de comparação através de um modelo numérico, apresentados no capítulo quatro.

O relatório com os resultados obtidos do ensaio apresentado faz parte do acervo da empresa, registrado sob nº. 80.8707.41_REV.1, datado de 20/04/1999.

3.1 – O Empreendimento da UHE Machadinho

A Usina Hidrelétrica Machadinho, teve suas obras iniciadas em março de 1998 e término em julho de 2002. A implantação da usina é atribuída a Machadinho Energética S.A. (MAESA), que substituiu o Grupo de Empresas Associadas Machadinho (GEAM); posteriormente, a empresa Tractebel Energia S.A. teve devida atribuição para o gerenciamento técnico da implantação, operação e manutenção da usina.

Está localizada no Rio Pelotas a aproximadamente 1200 m à jusante da foz do rio Inhandava (ou Forquilha), na divisa entre os municípios de Piratuba, no Estado de Santa Catarina e Maximiliano de Almeida, no Estado do Rio Grande do Sul.

Apontada como um marco na história das hidrelétricas brasileiras, sua implantação consolidou um novo modo de fazer usinas no Brasil, através do estabelecimento de parcerias estratégicas possibilitou a construção em tempo recorde, com uma antecipação de 17 meses em relação ao cronograma original.

Essa antecipação é explicada pelo o esforço despendido por aproximadamente sete mil trabalhadores ao longo de todo o período construtivo; sobretudo, por cerca de 2.600 trabalhadores locados diretamente na obra entre agosto e outubro de 2000 (período de pico das obras na usina).



Figura 3.1 – Vista geral da UHE Machadinho.

3.1.1 – Principais Características Hidráulicas

A barragem da UHE Machadinho é do tipo enrocamento com face de concreto, possui comprimento de 700 m e 126 m de altura. O reservatório formado possui volume de $3,3 \text{ km}^3$, com profundidade média de 30 m.

O nível máximo do reservatório está fixado na cota 485 m, porém o nível máximo operacional da usina está limitado à cota 465 m; já o nível de jusante apresenta cota mínima de projeto em 373 m.

A estrutura hidráulica responsável pela eliminação do excesso de água do reservatório, conhecida como vertedouro, é composta por oito comportas de superfície, possuindo 18 m de largura e 21,8 m de altura.

A casa de força, cuja função é receber a massa de água do reservatório através da tomada d'água, transformando a energia potencial hidráulica em energia mecânica e consequentemente, através de geradores, em energia elétrica, possui potência instalada de 1140 MW, através de três unidades geradoras de turbinas tipo Francis, com capacidade individual de 380 MW.

3.1.2 – Obra de Desvio

Estudos realizados das condições geográficas e topológicas no local de implantação da Usina Hidrelétrica de Machadinho, apontaram como melhor solução o desvio do rio através de túnel escavado em rocha.

Os trabalhos foram iniciados construindo-se a montante e a jusante barragens provisórias de material compactado, também conhecidas como ensecadeiras. Esse procedimento isola o local de implantação da usina e permite a iniciação dos trabalhos de abertura dos túneis.

A engenharia hidráulica da construtora, mediante estudo hidrológico, definiu a construção de quatro túneis para a realização do desvio. Dessa forma, foram construídos dois túneis superiores de 319 m de comprimento, e dois túneis inferiores de aproximadamente 600 m de comprimento, totalizando 443 mil m³ de escavações em rochas subterrâneas.

Os dois túneis superiores e um inferior foram fechados através de concretagem, mediante construção de obras ensecadeiras nas suas respectivas entradas. Somente em um túnel inferior, foram construídas ranhuras para receber as comportas que foram responsáveis pelo fechamento em definitivo do desvio.

3.1.3 – Mecanismo de Fechamento

O fechamento acontece através de duas comportas tipo vagão, e para essa referida obra, com auxílio de um guindaste móvel. A primeira comporta é a principal, denominada de vagão ensecadeira, e foi dimensionada para o fechamento em definitivo do desvio de forma a suportar toda carga hidráulica quando o reservatório atingir seu nível máximo. A segunda comporta, denominada de vagão corta fluxo é acionada apenas no caso da primeira comporta apresentar algum problema em sua manobra de fechamento.

A comporta vagão é certamente o tipo mais utilizado de comporta (ERBISTI, 2002), em sua forma habitual, constitui-se basicamente de tabuleiro, eixos, rodas e vedações. O tabuleiro é formado por uma chapa de paramento, geralmente plana e reforçada por meio de vigas horizontais e nervuras. Em cada lado do tabuleiro as extremidades das vigas horizontais são soldadas a uma viga vertical denominada cabeceira. As rodas são montadas em eixos fixados lateralmente no tabuleiro sobre as vigas cabeceiras, possuindo dupla função: diminuição dos esforços de atrito e transmissão de cargas às peças fixas e ao concreto.

Os critérios adotados para a fabricação de comportas hidráulicas são descritos pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT NBR 8833:2008).

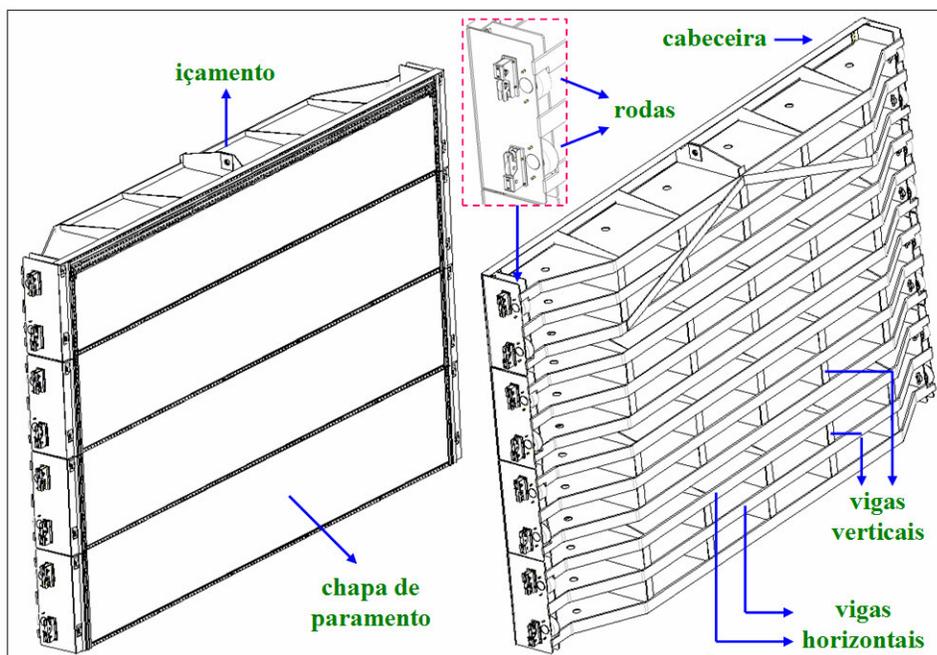


Figura 3.2 – Desenho ilustrativo do tabuleiro da comporta vagão com identificação de seus principais elementos.

As comportas tipo vagão são posicionadas nas ranhuras através de guindaste, que as movimenta ao longo do eixo vertical; são projetadas em módulo único e a principal diferença está no fato de que a comporta vagão ensecadeira possui rodas para o seu deslizamento e apresenta estrutura mais robusta.

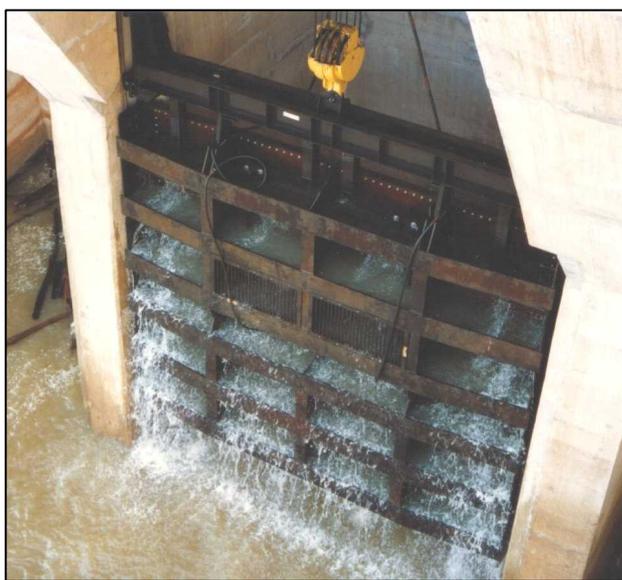


Figura 3.3 – Comporta vagão acionada através de guincho.

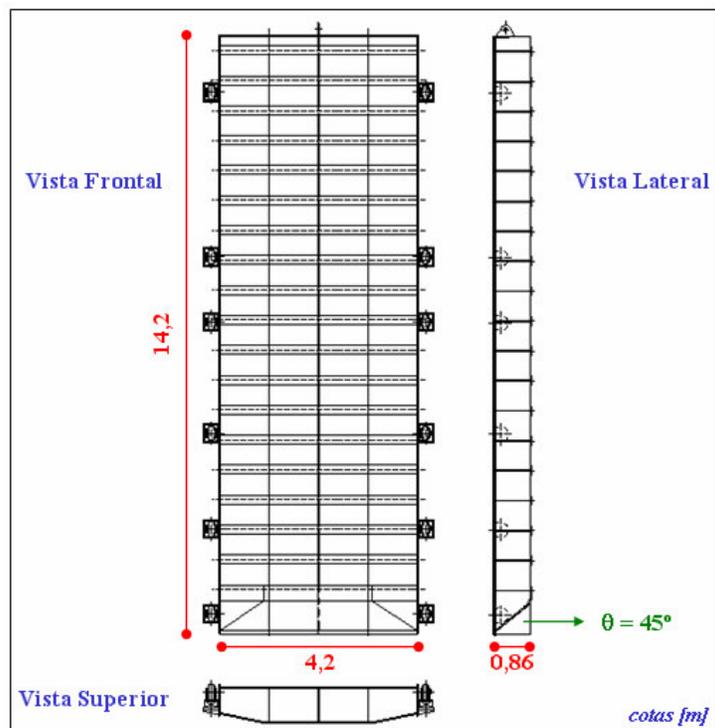


Figura 3.4 – Vista da comporta vagão ensecadeira do túnel de desvio da UHE Machadinho.

De acordo com o relatório emitido pela empresa Bardella S.A. – Indústrias Mecânicas, as principais dimensões da comporta vagão ensecadeira da UHE Machadinho, objeto de estudo, estão indicadas na tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Principais dimensões da comporta ensecadeira da UHE Machadinho.

altura total da comporta	14,2 [m]
largura do vão livre	4,2 [m]
altura do vão livre	14 [m]
posição da chapa de face / vedação	Jusante
número de vigas horizontais	19
cota da soleira	370 [m]
nível máximo d'água normal para o fechamento	391 [m]
carga hidráulica	21 [m]
massa da comporta	60.000 [kg]
tipo de acionamento	guindaste

3.2 – Técnicas de Ensaio em Modelo Físico Reduzido

As técnicas aplicadas para ensaios em modelos físicos reduzidos, seguem determinados padrões usuais, ou seja, procedimentos semelhantes adotados em laboratórios capacitados para as análises. Uma das primeiras observações é a respeito da escala geométrica que será utilizada, pois existe a necessidade de adequação do tamanho do modelo, vazão e carga hidráulica disponível.

Modelos reduzidos podem ser classificados como tridimensionais ou bidimensionais, para usinas hidrelétricas, por exemplo, um modelo tridimensional reproduziria todo aspecto topográfico da usina, onde a principal observação seria no encaminhamento principal da massa de água, não tendo grande refinamento nos equipamentos hidráulicos como tomada d'água e comportas dos vertedouros, por exemplo.

A construção de um modelo tridimensional, mostrado na figura 3.5, passa pelas seguintes fases: na área de construção do modelo são transcritas as curvas de níveis, com a topografia da usina, em seguida utilizando-se tijolos e fitas metálicas é feito o levantamento das curvas e os espaços vazios são preenchidos com areia e argamassa de cimento. O acabamento final é realizado através de pintura, e caso necessário, impermeabilização da área.

Um modelo bidimensional possui a preocupação de estudar em detalhe um determinado equipamento hidráulico, e de forma isolada. Com isso impõem-se ao mesmo as condições hidráulicas mais desfavoráveis, a fim de observar os fenômenos hidrodinâmicos presentes.

As instalações principais geralmente são confeccionadas em alvenaria (bases, canais, reservatórios), porém nos modelos, objetos de estudo, utilizam-se materiais de fácil trabalhabilidade como: chapas de acrílico, aço ou latão, madeira, alumínio e pvc.

Além da disponibilidade das instalações, modelos com escalas muito elevadas podem apresentar pequenas dimensões para o escoamento do fluido. Nesse caso a coleta de dados pode ficar prejudicada, pois as forças viscosas acabam superando as forças inerciais. Para estudos em modelos reduzidos de comportas, em geral, adota-se um intervalo de escala da ordem de 1:30, que permite maior facilidade na instrumentação da comporta.

A instrumentação utilizada depende da quantidade de informação requerida em cada ensaio; de uma forma geral utiliza-se pontas limnométricas para as leituras de níveis e vazões, um sistema de aquisição de dados para leitura e interpretação dos valores das células de pressão e de carga, além de quadro de multipiezômetro para leitura de pressões instantâneas.



Figura 3.5 – Fases da construção de modelo tridimensional.

3.3 – Teoria da Semelhança

A teoria da semelhança (MOTTA, 1972) é o conjunto dos princípios a serem obedecidos a fim de projetar, construir, operar e interpretar os sistemas (modelos) a partir dos quais se deseja prever o comportamento de outros sistemas (protótipos). Portanto, a teoria da semelhança estabelece:

- as relações de transferência entre modelos e protótipos, e
- o tipo de relação entre as diversas grandezas intervenientes em qualquer fenômeno físico, a fim de poder pesquisar sistematicamente os dados mais significativos.

Entende-se por modelo, o sistema que possua comportamento semelhante ao sistema que se deseja prever, mas que apresente menores dimensões, no qual seja mais fácil introduzir modificações ou variar sob controle os valores das grandezas consideradas. Ao sistema que se deseja prever o comportamento dá-se o nome de protótipo.

O termo comportamento semelhante significa que o mesmo fenômeno, comparando-se as grandezas regidas pelas leis da física, se passa nos dois sistemas considerados (modelo e protótipo).

3.3.1 – Escalas de Correlação

Em modelos hidráulicos, algumas considerações são realizadas para obtenção apenas das forças predominantes mais significativas. Na grande maioria dos escoamentos de líquidos, por exemplo, é de praxe considerá-los como regime permanente, desconsiderando possíveis forças de compressibilidade, dessa maneira despreza-se as relações de igualdade dos números de Mach.

A influência das forças de tensão superficial também pode ser desprezada, portanto é possível abrir mão da igualdade de Weber, desde que o tamanho físico do modelo seja suficientemente grande. Associa-se a essa consideração o fato do escoamento ser plenamente turbulento no modelo e no protótipo, pois assim despreza-se também a influência das forças de viscosidade.

Ao desprezar a influência das forças de viscosidade, não existe a necessidade da igualdade do número de Reynolds, sendo suficiente que o mesmo para o modelo e o protótipo estejam acima dos limites de transição de escoamento laminar.

Dessa maneira, projetam-se modelos hidráulicos reduzidos para estudo de problemas da engenharia satisfazendo a semelhança da razão entre as forças de inércia e as forças de gravidade, que significa a igualdade dos números de Froude no modelo e no protótipo.

Aplicando-se as leis de semelhança de Froude entre o modelo e o protótipo, temos:

$$F_m = F_p \quad \therefore \quad \frac{v_m}{\sqrt{g_m \cdot L_m}} = \frac{v_p}{\sqrt{g_p \cdot L_p}} \quad (3.1)$$

onde: v = velocidade [m/s], g = aceleração da gravidade [m/s^2], e L = dimensão primária do comprimento [m].

Para determinação da escala de velocidade, e considerando-se $g_m = g_p$, temos:

$$\frac{v_m}{v_p} = \left(\frac{g_m}{g_p} \right)^{1/2} \cdot \left(\frac{L_m}{L_p} \right)^{1/2} \rightarrow \left(\frac{g_m}{g_p} \right)^{1/2} \cdot \lambda^{1/2} \rightarrow v_m = v_p \cdot \lambda^{1/2} \quad (3.2)$$

A relação de massas entre modelo e protótipo, envolvidas nos ensaios, independem da aceleração da gravidade, e considerando-se: $\rho_m = \rho_p = \rho_{\text{água}}$, temos:

$$\frac{m_m}{m_p} = \frac{\rho_m \cdot V_m}{\rho_p \cdot V_p} \rightarrow m_m = m_p \cdot \lambda^3 \quad (3.3)$$

Para a escala de vazão, temos:

$$\frac{Q_m}{Q_p} = \frac{v_m \cdot L_m \cdot L_m}{v_p \cdot L_p \cdot L_p} \rightarrow \lambda^{1/2} \cdot \lambda \cdot \lambda \rightarrow Q_m = Q_p \cdot \lambda^{5/2} \quad (3.4)$$

3.4 – O Laboratório de Hidráulica da empresa Bardella S.A. – Indústrias Mecânicas

Fundada em 1911 a Bardella é uma empresa 100% nacional, que projeta e fabrica equipamentos de grande porte. Apontada com uma das líderes de mercado, construiu ao longo de sua existência uma sólida carteira de clientes; devido a qualidade e confiabilidade de seus equipamentos fornecidos para as diversas áreas de atuação como: Portos & Mineração, Metalurgia & Service, Óleo & Gás, Levantamentos de Cargas e Geração de Energia.

A empresa possui duas unidades fabris, uma planta em Sorocaba e outra na cidade de Guarulhos que juntas, totalizam aproximadamente cem mil metros quadrados de área construída. Apresenta como diferencial o fato de ser a única empresa privada no Brasil a possuir um Laboratório de Hidráulica, para testes e modelagem física reduzida de seus equipamentos hidromecânicos, voltados para geração de energia.



Figura 3.6 – Vista geral das unidades fabris da empresa Bardella S.A. Indústrias Mecânicas, unidade de Sorocaba e Guarulhos, respectivamente.

O Laboratório de Hidráulica da empresa, instalado na unidade de Sorocaba, S.P.; teve sua concepção baseada na experiência da Sorefame (Portugal) e foi projetado no sentido de permitir a execução de ensaios em modelos físicos reduzidos de equipamentos hidromecânicos.

Desde sua criação em 1978 tem sido largamente utilizado como ferramenta da engenharia nacional, participando ativamente das principais obras hidrelétricas na América do Sul.



Figura 3.7 – Vista geral do Laboratório de Hidráulica da empresa Bardella S.A. – Indústrias Mecânicas localizado na cidade de Sorocaba, S.P.

O banco de ensaios consiste em um sistema fechado de água, incluindo um reservatório inferior com capacidade de um milhão de litros. A água circula em circuito fechado, bombeada do reservatório inferior para uma câmara de carga de nível constante, a partir da qual se alimentam os modelos em estudos e retorna ao reservatório.

A aspiração de água para a câmara superior é feita por duas bombas, com capacidade máxima de 450 litros por segundo ($0,450 \text{ m}^3/\text{s}$). A câmara de carga de nível constante, é assegurada por canaletas transbordáveis, e possui uma capacidade de 183 m^3 , delas efluindo um conduto de diâmetro igual a 800 mm para alimentação do parque de modelos.

O laboratório de hidráulica é parte integrante do setor de Pesquisa & Desenvolvimento da empresa, que além da execução dos ensaios em laboratório e campo tem como objetivo:

- aprimoramento da engenharia
- intercâmbio acadêmico
- formação técnica
- desenvolvimento de produtos
- pesquisa básica

A instrumentação utilizada é a comum, para laboratórios hidráulicos, que consiste em: sistema de aquisição de dados, células de carga, transdutores de pressão e deslocamento, sensores de fins de curso acionados por unidade hidráulica, medidores ultrassom, quadro de multipiezômetros, vertedores triangulares e retangulares para a medição de vazões, pontas limnimétricas e servo motores para acionamentos diversos.

Com isso, obtém-se dos modelos físicos reduzidos basicamente as seguintes informações: curva de vazões, pressões atuantes, efeitos de aeração, forças hidrodinâmicas, leis de manobra de comportas, leis de enchimento e esvaziamento, tendências de ocorrência de vibrações e cavitação.

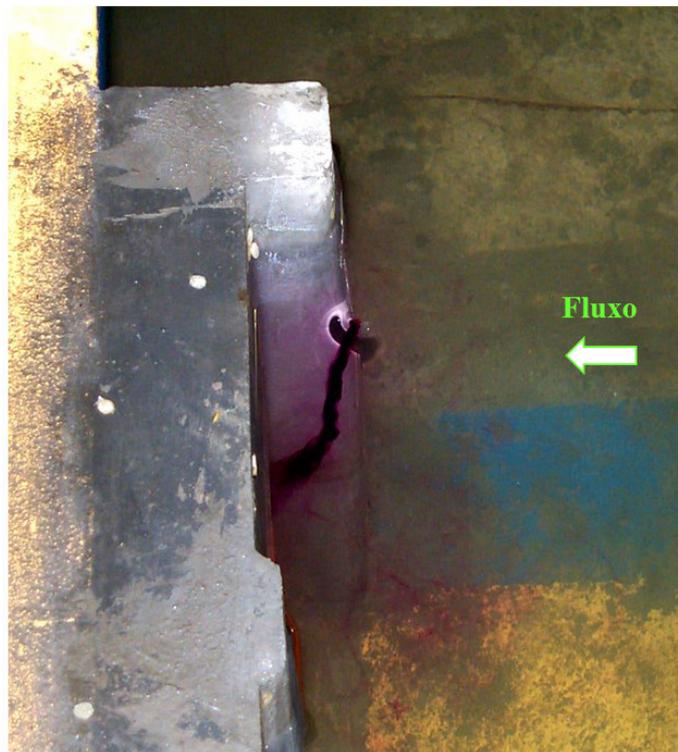


Figura 3.8 – Visualização de formação de vórtice em ensaio de modelo físico reduzido.

3.5 – Ensaio: Túnel de Desvio – UHE Machadinho

3.5.1 – Objetivo e Escopo do Ensaio Realizado

O ensaio realizado (nº. 80.8707.41_REV.1, datado de 20/04/1999) teve como principal objetivo a determinação das forças hidrodinâmicas atuantes na comporta vagão ensecadeira do desvio, para uma faixa de abertura da comporta de 10 a 100%.

A título de investigação e observação, foram realizados ensaios com diferentes níveis de carga hidráulica. Através desses dados é possível fazer uma previsão das diferentes vazões que podem ser encontradas na época do fechamento do desvio.

Com o objetivo de encontrar os menores esforços hidrodinâmicos para o protótipo, fato que afeta diretamente o mecanismo de manobra adotado, foram estudadas cinco configurações geométricas do cutelo.

Para o presente trabalho, serão descritos e utilizados como base de comparação entre o modelo físico reduzido e numérico, o nível de carga hidráulica mais crítico, com uma configuração geométrica do cutelo, apresentado na figura 2.17.

Para a construção do modelo físico reduzido, foi adotada a escala geométrica de 1:30. As demais escalas de correlações entre o modelo e o protótipo, segundo as leis de semelhança de Froude, estão apresentadas na tabela 3.2.

Tabela 3.2 - Escalas de correlação modelo / protótipo.

Pressão e Dimensão (λ)	1 : 30
Velocidade e Tempo ($\lambda^{1/2}$)	1 : 5,48
Vazão ($\lambda^{5/2}$)	1 : 4930
Força, Volume, Massa (λ^3)	1 : 27000

3.5.2 – Descrição Geral do Modelo Físico Reduzido

O modelo físico reduzido foi construído com uma configuração geométrica de um túnel central e dois meio-vãos laterais do equipamento denominado desvio; uma peça de transição e um trecho do túnel de saída com escala geométrica de 1:30, segundo as leis de semelhança de Froude com todos os aspectos geométricos capazes de, sob o ponto de vista hidráulico, reproduzirem condições semelhantes às previstas para o protótipo; tanto no que respeita as formas do concreto como ao equipamento hidromecânico propriamente dito.

O reservatório de montante foi construído em alvenaria com paredes internas impermeabilizadas, o trecho de paramento de montante, que faz a representação da barragem no local de instalação do equipamento, foi construído com chapa metálica. As paredes curvas de entrada, o teto da transição, o túnel de saída, os poços das comportas e as demais laterais do modelo, foram construídas com chapas de acrílico transparente.

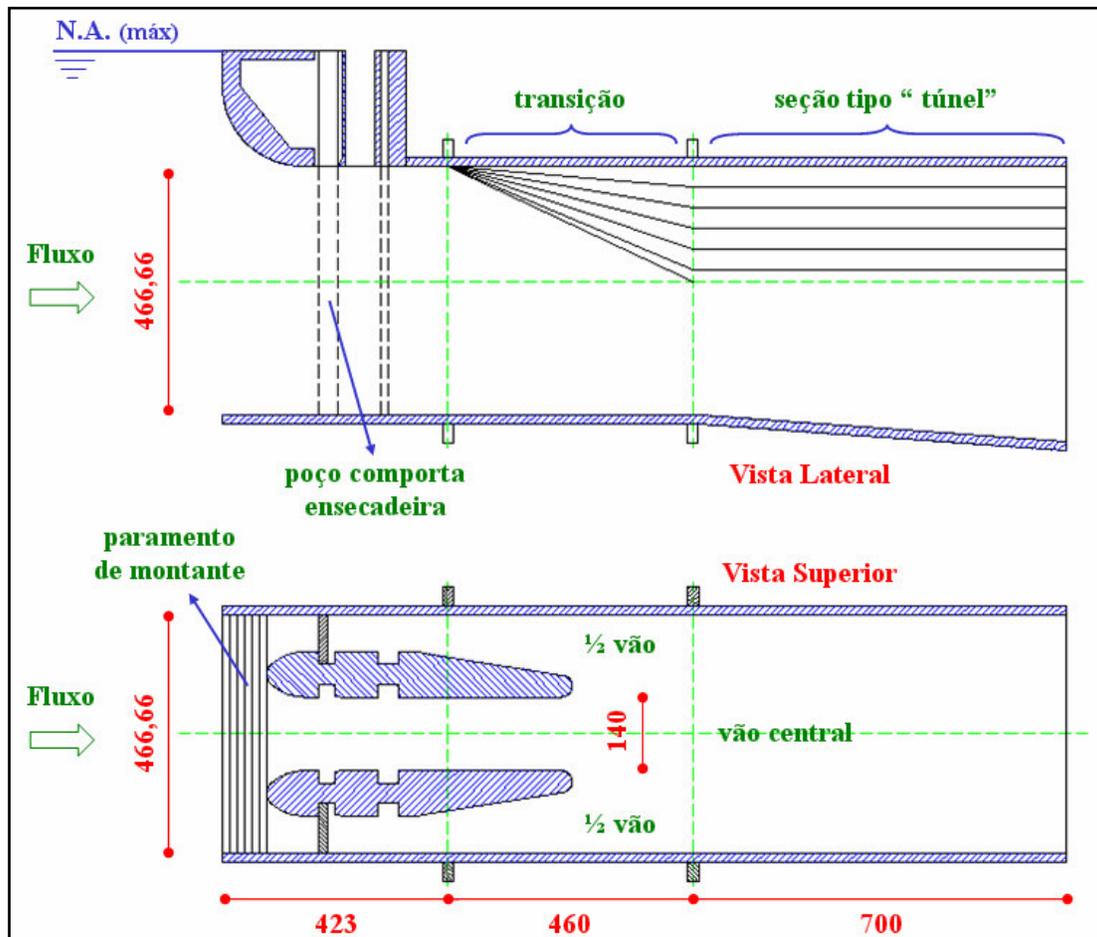


Figura 3.9 – Vista lateral e superior do modelo físico reduzido do túnel de desvio da UHE Machadinho, escala de 1:30 – cotas em milímetros.



Figura 3.10 – Vista lateral do modelo reduzido do túnel de desvio.

A comporta vagão ensecadeira foi executada em latão, obedecendo as relações geométricas e de massa que devem existir entre o modelo e o protótipo, dentro dos limites das possibilidades construtivas dos minúsculos elementos do modelo que por ventura poderiam influenciar os resultados dos testes.

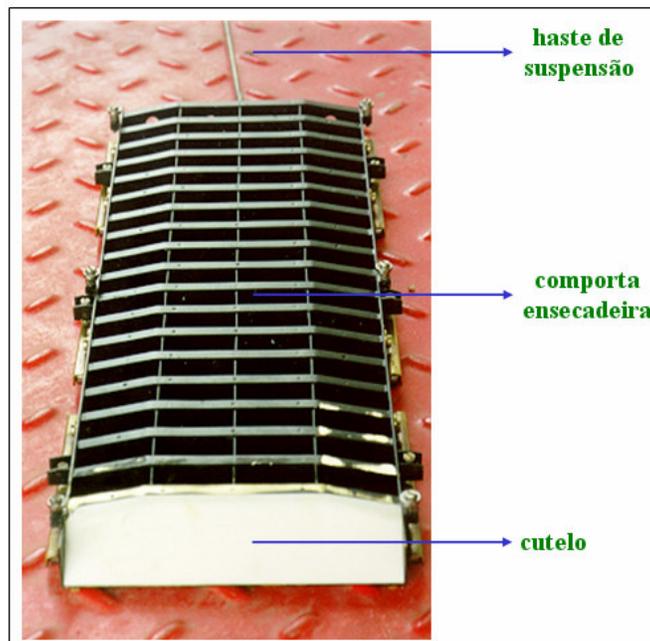


Figura 3.11 – Vista da comporta ensecadeira construída em latão, escala de 1:30.

Devido à impossibilidade de se reproduzir, no modelo da referida escala, os esforços de atrito entre os caminhos de rolamento e os dispositivos de estanqueidade desenvolvidos nas diferentes situações de operação do equipamento, adotou-se o critério de minorar o contato entre as estanqueidades do modelo e o caminho de rolamento, mantendo-se a vedação com um afastamento mínimo.

Em razão dessa consideração, os aparelhos detectam automaticamente todas as forças intervenientes com exceção às forças do atrito das vedações. As mesmas possuem formulação bem definidas (NBR 8883:2008) e seus valores são incorporados ao projeto do protótipo de forma analítica.

O sistema de manobra da comporta é composto por uma unidade hidráulica acoplado a um cilindro hidráulico de duplo efeito (subida e descida), com possibilidade de parar em qualquer posição do curso.

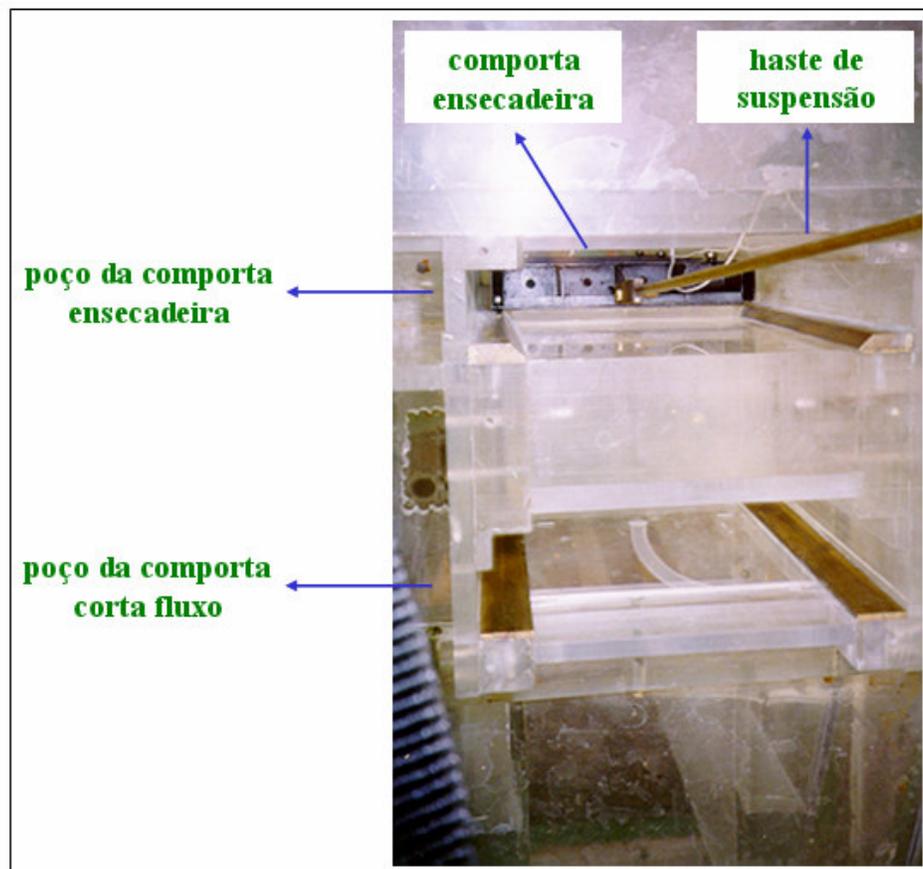


Figura 3.12 – Vista superior dos poços da comporta ensecadeira e corta fluxo.

Entre a comporta e o cilindro hidráulico, é instalado um transdutor de esforços e duas hastes de suspensão, sendo uma delas para regulagem. Dessa forma, o sistema de acionamentos se torna suficientemente flexível de forma a permitir uma fácil visualização das oscilações introduzidas pelo fluxo.

O conjunto da instalação, que também pode ser denominado por banco de ensaios, é constituído por uma câmara de carga constante (reservatório de montante) com alimentação frontal tranqüilizada, paramento de montante, ranhuras das comporta vagão ensecadeira e corta fluxo, trecho de transição, túnel de descarga e vertedor retangular.

3.5.3 – Aparelhagem Utilizada e Técnica de Condução dos Ensaios

Medidas e controle de vazão: a vazão efluente foi medida a jusante através de vertedor retangular de soleira delgada, as cargas do vertedor foram medidas por um sistema de tomada de pressão, vaso e régua limnimétrica.



Figura 3.13 – Vertedor retangular de soleira delgada.

Medidas de nível do reservatório de montante: os níveis do reservatório foram medidos por um sistema de tomada de pressão, vaso e hidrômetro elétrico com pontas de máximo e mínimo.

Medidas de esforços de manobra: para a medida e registro dos esforços de manobra do modelo da comporta, em função da posição desta, utilizou-se um transdutor de esforços (célula de carga) e um transdutor de deslocamento fixado na haste de acionamento da comporta, os quais emitem sinais de corrente elétrica, que após serem amplificados e condicionados são registrados graficamente.

Medidas de pressão: as medidas de pressões foram realizadas em regime permanente, através de quadro de multipiezômetro, com tomadas espalhadas pelo modelo nos pontos de interesse.

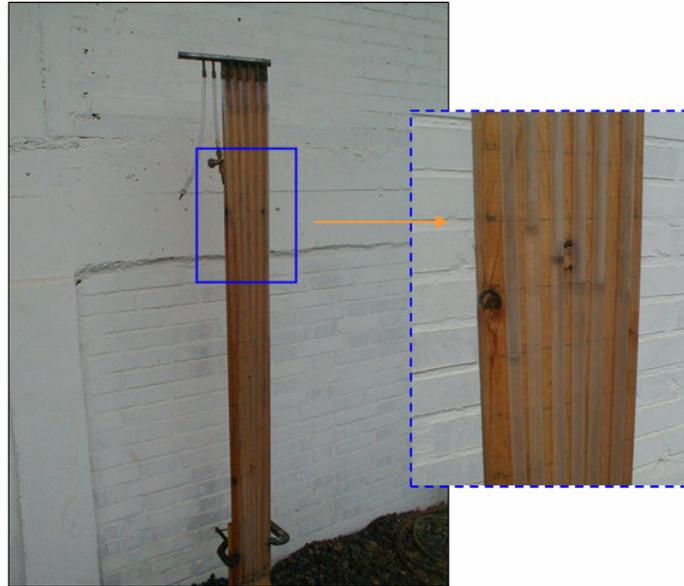


Figura 3.14 – Quadro de multipiezômetro.

A condução dos ensaios no modelo físico reduzido foi realizada através dos seguintes procedimentos:

- regulagem do nível de montante: a carga hidráulica utilizada no ensaio é diretamente proporcional ao nível d'água do reservatório de montante, seu abastecimento é realizado através da tubulação de entrada e o controle do nível d'água através de calha de nível constante, instalada dentro do reservatório,
- posicionamento da comporta: a comporta vagão ensecadeira é posicionada em aberturas pré-determinadas de 10 a 100%, mantendo-se o nível de montante como constante.

Para cada abertura da comporta vagão ensecadeira, foram realizados registros da força hidrodinâmica atuante, pressões instantâneas nas tomadas espalhadas pelo modelo e vazão correspondente através de vertedor retangular.

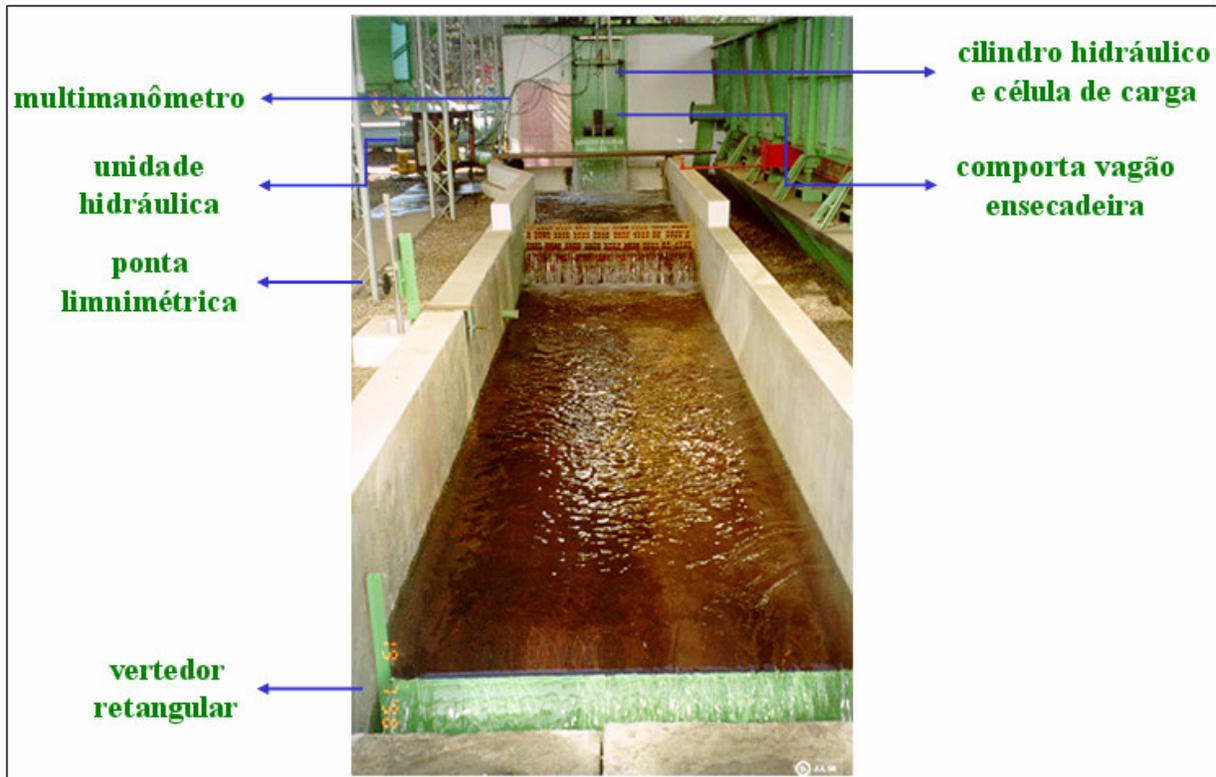


Figura 3.15 – Vista geral da bancada de ensaios da UHE Machadinho – escala de 1:30.

3.5.4 – Ensaios Realizados

As condições hidráulicas apresentadas nesse trabalho levam em consideração a carga hidráulica mais crítica que a comporta vagão ensecadeira estará submetida, em seu fechamento, sendo assim; conforme descrito na tabela 3.1, a soleira está na cota 370 m e o nível d'água na cota 391 m; com isso obtém-se a carga hidráulica de 21 m; sendo o modelo construído na escala geométrica de 1:30, tem-se um carga hidráulica de 0,7 m.

Os esforços foram determinados através do método direto estático, que consiste em determinar diretamente os valores dos esforços hidrodinâmicos verticais, por meio de um transdutor de forças, para uma posição fixa de abertura da comporta e um nível de montante pré-estabelecido.

O ensaio teve início com a comporta vagão ensecadeira totalmente aberta, que depois foi fechada com paradas em aberturas intermediárias a cada 10%; para todas as posições mantém-se o nível de montante como constante e o escoamento em regime permanente.

A técnica para a medição dos esforços hidrodinâmicos no método estático, é realizada da seguinte maneira: para cada abertura da comporta e agindo-se no sistema hidráulico de acionamento, foi dado um pequeno deslocamento da comporta para baixo, com seu registro simultâneo dos esforços, indicados pelo transdutor de força. Em seguida, um pequeno deslocamento da comporta para cima, registrando da mesma forma os esforços no transdutor de forças.

Com esse procedimento elimina-se o atrito estático que as rodas do modelo da comporta possuem, pelo contato com a ranhura do modelo, e conseqüentemente a leitura dos esforços reproduz apenas a força hidrodinâmica atuante para cada abertura.

Os resultados dos esforços hidrodinâmicos registrados pelo transdutor de força são dados pelas seguintes expressões:

$$F_1 = L_1 \cdot K = \underbrace{P_c - F_a - E + F_h}_{\text{deslocamento para baixo}} \quad (3.5)$$

$$F_2 = L_2 \cdot K = \underbrace{P_c + F_a - E + F_h}_{\text{deslocamento para cima}} \quad (3.6)$$

onde: L_1 e L_2 são as leituras no transdutor de força no fechamento, K é a aferição do transdutor, F_1 e F_2 são as forças obtidas no transdutor de forças no fechamento e abertura respectivamente, F_a é a força de atrito mecânico, E representa o empuxo de Arquimedes no modelo e F_h é a força hidráulica resultante.

Admitido-se que as condições hidráulicas sejam as mesmas em ambos os caso tem-se:

$$F_h = \frac{L_1 + L_2}{2} \cdot K - P_c + E \quad (3.7)$$

O peso do modelo da comporta (P_c) foi previamente determinado e o empuxo de Arquimedes (E), foi obtido experimentalmente mergulhando-se o modelo da comporta na água em repouso.

O empuxo de Arquimedes foi considerado constante para aberturas da comporta nas quais a mesma permaneceu totalmente imersa durante os ensaios e para aberturas em que o modelo da comporta ficou parcialmente submerso considerou-se o peso imerso parcial.

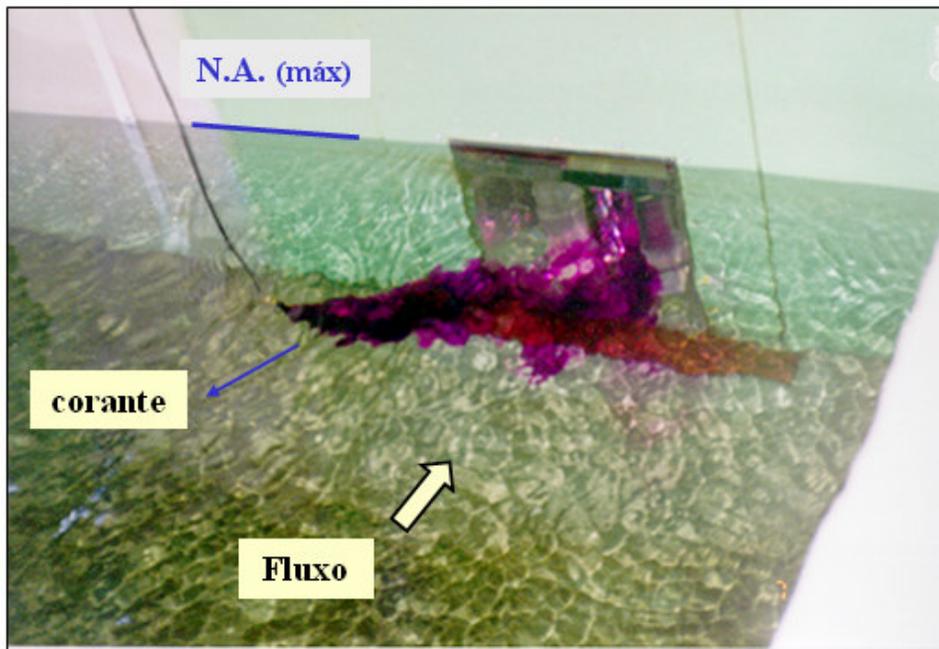


Figura 3.16 – Vista do reservatório de montante com nível d'água na cota 391 m.

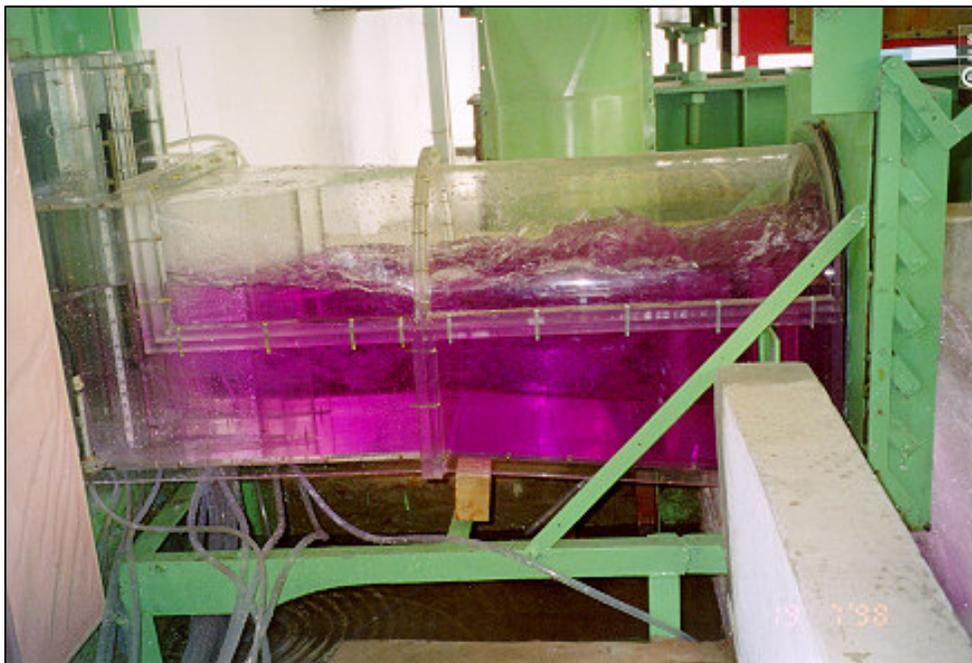


Figura 3.17 – Vista lateral do modelo reduzido com abertura de 30 % da comporta vagão ensecadeira.

3.5.5 – Resultados Obtidos

A vazão é medida através de vertedor retangular, de soleira delgada. A formulação prática para o cálculo das vazões médias (FRANCIS, 1905) é calculada como:

$$Q = 1,838 \cdot L_v \cdot \Delta H^{(3/2)} \quad (3.8)$$

onde: Q = vazão média vertida no modelo [m^3/s], L_v = largura do vertedor [m], e ΔH = diferença da leitura do nível d'água sobre o vertedor e seu ponto inicial [m].

A figura 3.18, mostra de forma esquemática o vertedor retangular e a indicação das incógnitas utilizadas na equação 3.8, para o cálculo da vazão média.

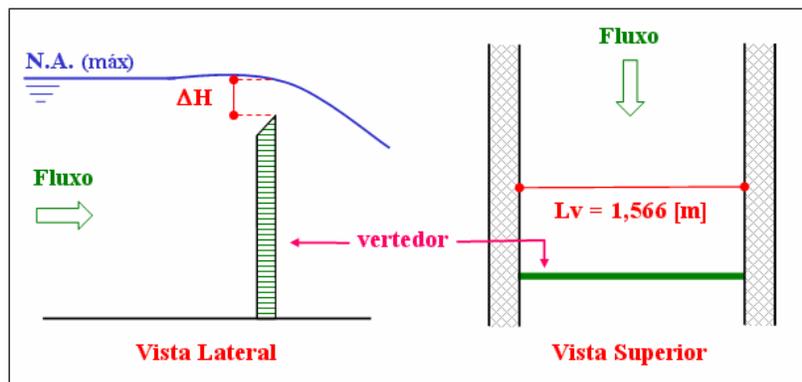


Figura 3.18 – Vertedor retangular.

O valor da diferença do nível d'água sobre o vertedor e seu ponto inicial, é obtido através da medição direta no modelo físico, para cada abertura da comporta vagão ensecadeira.

Substituindo o valor de L_v , conforme indicado na figura 3.18 na equação 3.8, temos:

$$Q = 1,838 \cdot 1,556 \cdot \Delta H^{(3/2)} \quad (3.9)$$

Os valores das vazões médias obtidas no modelo para cada abertura da comporta vagão ensecadeira, são mostradas na tabela 3.3.

Tabela 3.3 – Resultados das vazões obtidas no modelo físico reduzido da UHE de Machadinho.

abertura comporta [%]	ponta limnimétrica		diferença ΔH [m]	vazões	
	“zero” [m]	leitura [m]		modelo [m ³ /s]	protótipo [m ³ /s]
100	0,1243	0,2526	0,1283	0,1314	647,89
90	0,1243	0,2428	0,1185	0,1167	575,09
80	0,1243	0,233	0,1087	0,1025	505,25
70	0,1243	0,2257	0,1014	0,0923	455,21
60	0,1243	0,2163	0,092	0,0798	393,41
50	0,1243	0,2075	0,0832	0,0686	338,33
40	0,1243	0,1958	0,0715	0,0547	269,54
30	0,1243	0,182	0,0577	0,0396	195,40
20	0,1243	0,1698	0,0455	0,0278	136,83
10	0,1243	0,1535	0,0292	0,0143	70,34
0	0,1243	0,1243	0	0	0

Exemplo numérico:

Para abertura de 50%:

$$Q = 1,838 \cdot 1,556 \cdot \Delta H^{(3/2)}$$

$$Q = 1,838 \cdot 1,556 \cdot (0,2075 - 0,1243)^{(3/2)}$$

$$Q = 1,838 \cdot 1,556 \cdot (0,0832)^{(3/2)}$$

$$Q_m = 0,0686 \text{ [m}^3\text{/s]}$$

A escala de relação da vazão entre modelo e protótipo é descrita na tabela 3.2, como:

$$Q_{\text{modelo}} \cdot \lambda^{(5/2)} = Q_{\text{protótipo}} \rightarrow 0,0686 \cdot 30^{(5/2)} = Q_{\text{protótipo}}$$

$$Q_{\text{protótipo}} = 338,33 \text{ [m}^3\text{/s]}$$

O gráfico da vazão calculada para o protótipo, para cada abertura da comporta vagão ensecadeira é apresentada na figura 3.19.

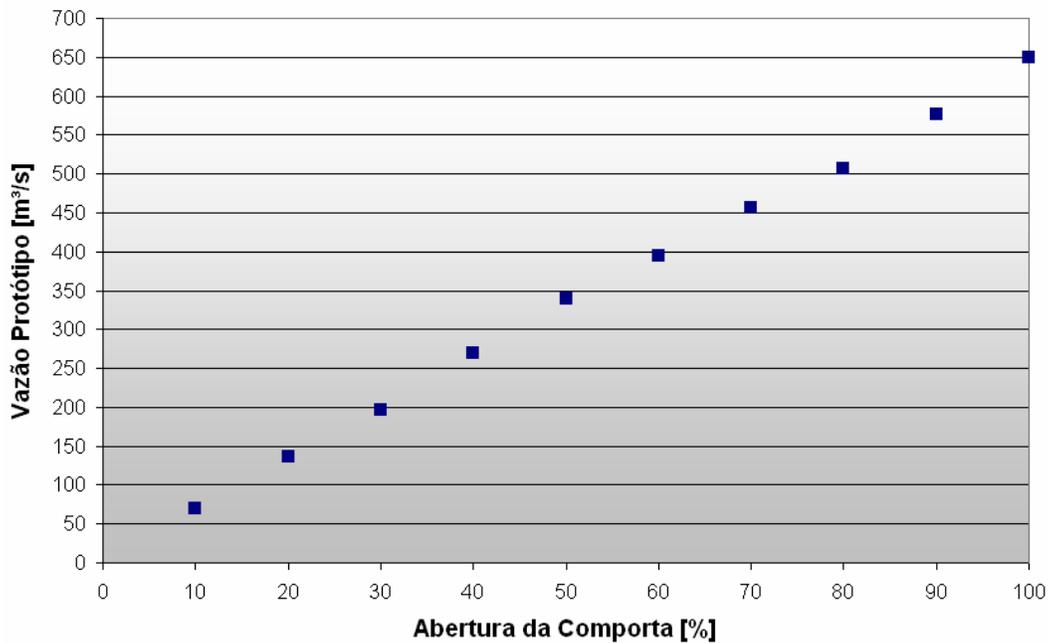


Figura 3.19 – Vazão em função da abertura da comporta vagão ensecadeira para o protótipo.

O cálculo do coeficiente de vazão do protótipo está demonstrado na tabela 3.4 e foi realizado através da equação (2.1).

As figuras 3.20 e 3.21 apresentam o gráfico do coeficiente de vazão determinado para cada abertura e as variáveis utilizadas na tabela 3.4.

Tabela 3.4 – Resultados dos coeficientes de vazão do modelo físico reduzido da UHE Machadinho.

abertura da comporta		Q (protótipo)	largura livre	H''	Cd
[%]	[m]	[m ³ /s]	[m]	[m]	
100	14,0	647,89	4,2	14,0	0,665
90	12,6	575,09	4,2	14,7	0,640
80	11,2	505,25	4,2	15,4	0,618
70	9,8	455,21	4,2	16,1	0,622
60	8,4	393,41	4,2	16,8	0,614
50	7,0	338,33	4,2	17,5	0,621
40	5,6	269,54	4,2	18,2	0,607
30	4,2	195,40	4,2	18,9	0,575
20	2,8	136,83	4,2	19,6	0,593
10	1,4	70,34	4,2	20,3	0,600

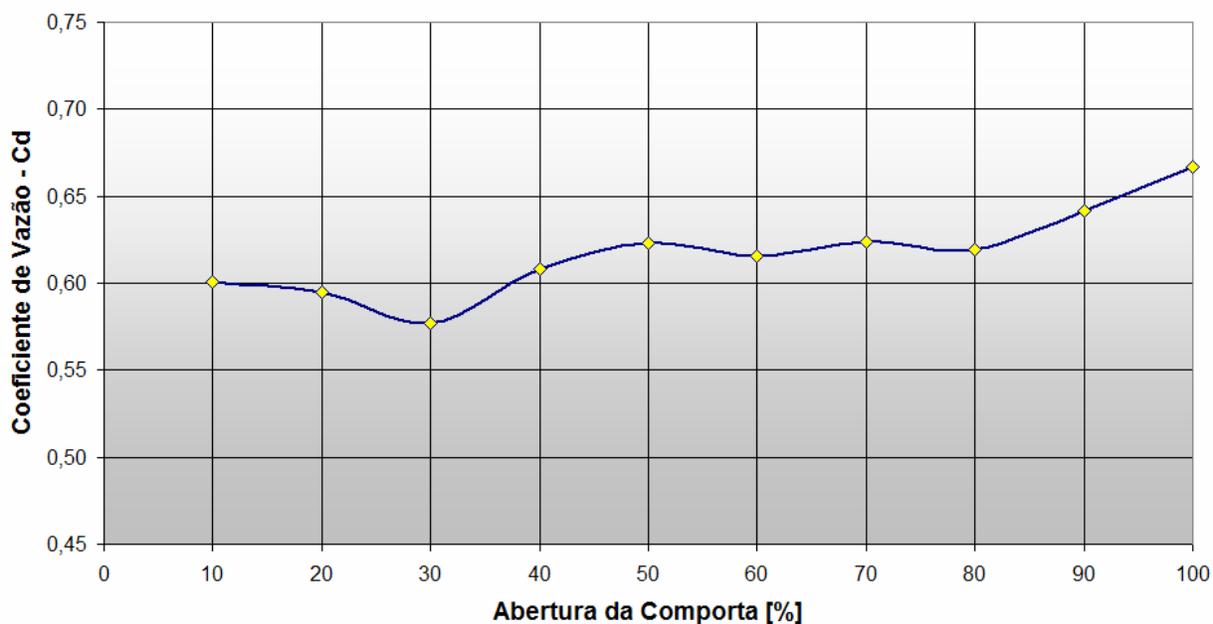


Figura 3.20 – Coeficiente de vazão do modelo físico reduzido da UHE Machadinho.

Para comparação foram transcritos na tabela 3.6 os resultados das quatro tomadas de pressão instaladas na parte central inferior do modelo. O gráfico das pressões para as três aberturas da comporta vagão ensecadeira está apresentado na figura 3.23.

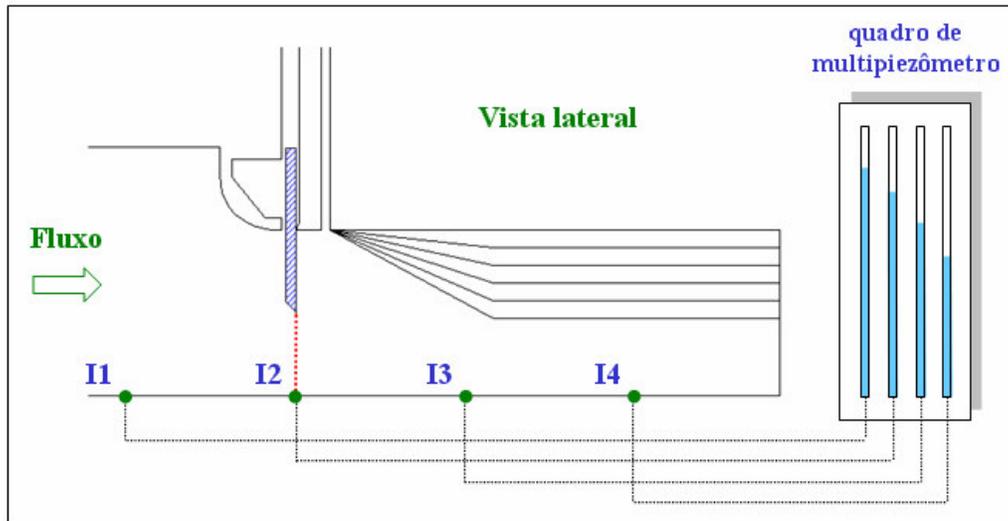


Figura 3.22 – Localização das tomadas de pressão centrais inferiores do modelo.

Tabela 3.6 – Resultados das tomadas de pressão central inferiores para três aberturas da comporta vagão ensecadeira.

tomadas de pressão inferiores	abertura da comporta vagão ensecadeira					
	20 [%]		40 [%]		70 [%]	
	modelo [m.c.a.]	protótipo [m.c.a.]	modelo [m.c.a.]	protótipo [m.c.a.]	modelo [m.c.a.]	protótipo [m.c.a.]
I 1	0,681	20,43	0,655	19,65	0,640	19,20
I 2	0,660	19,80	0,632	18,96	0,620	18,60
I 3	0,621	18,63	0,600	18,00	0,605	18,15
I 4	0,536	16,08	0,553	16,59	0,588	17,64

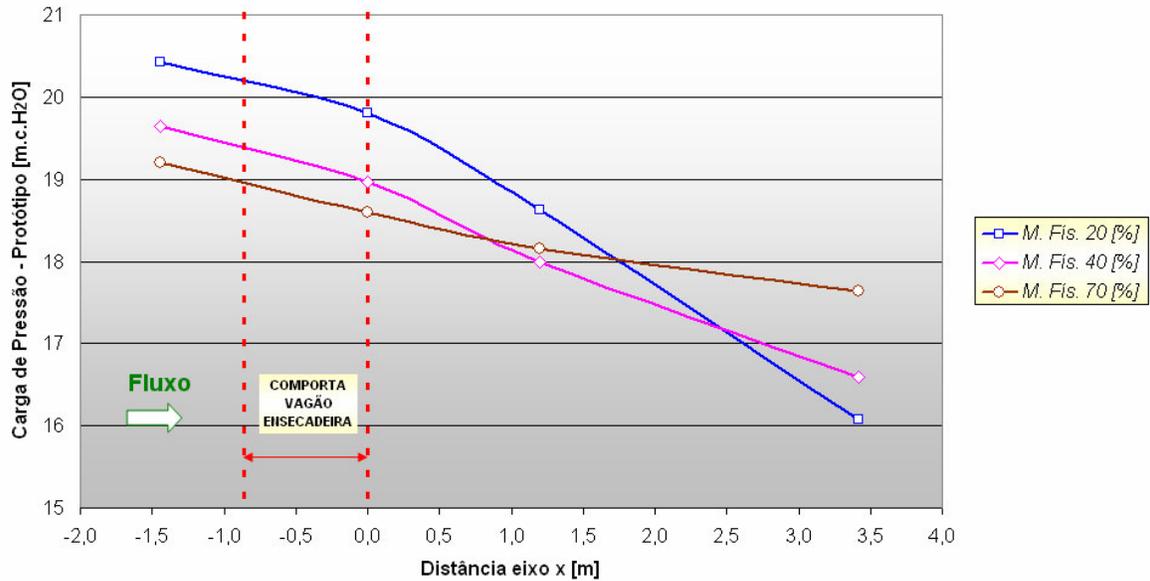


Figura 3.23 – Pressões nas tomadas inferiores do modelo.

O valor dos esforços hidrodinâmicos atuantes na comporta vagão ensecadeira, foram obtidos a partir da média de três ensaios realizados no modelo físico reduzido, para a faixa de abertura de 10 a 100%. Os resultados das médias dos esforços para o modelo e o protótipo, estão apresentados na tabela 3.8 e no gráfico da figura 3.23.

Tabela 3.7 – Força hidrodinâmica no modelo físico reduzido da UHE Machadinho.

abertura da comporta [%]	força hidrodinâmica	
	modelo [kgf]	protótipo [tf]
100	0	0
90	0,277	7,47
80	0,620	16,74
70	1,040	28,08
60	1,407	37,98
50	1,637	44,19
40	1,763	47,61
30	1,677	45,27
20	1,330	35,91
10	0,830	22,41

Exemplo Numérico:

Para abertura de 70%

A escala de relação da vazão entre modelo e protótipo é descrita na tabela 3.2, como:

$$F_{\text{modelo}} \cdot \lambda^3 = F_{\text{protótipo}} \rightarrow 1,040 \cdot 30^3 = F_{\text{protótipo}}$$

$$F_{\text{protótipo}} = 28080 \text{ [kgf]} \text{ ou } 28,08 \text{ [tf]}$$

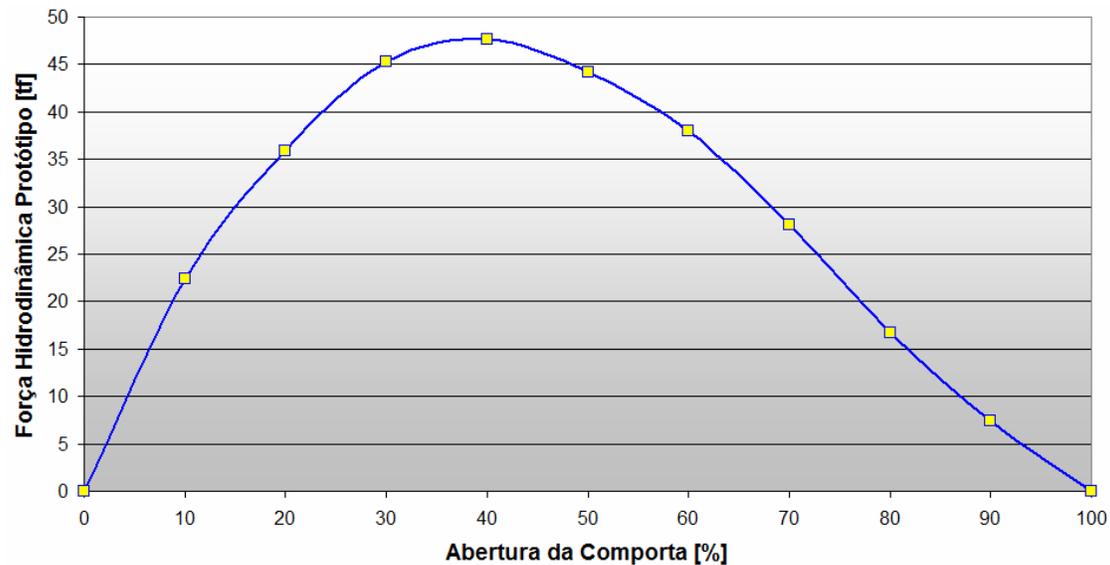


Figura 3.24 – Esforços hidrodinâmicos do protótipo em função da abertura da comporta vagão ensecadeira.

A força hidráulica máxima, apresentada na tabela 3.7 corresponde a abertura da comporta vagão ensecadeira na faixa de 40%. Esse pico é devido a variação da velocidade na parte inferior da comporta (cutelo), onde existe a transição do regime fluvial para o regime torrencial, fenômeno esse, semelhante ao encontrado em estudo de canais. Pode-se afirmar que a partir dessa abertura a vazão é controlada exclusivamente pela comporta vagão ensecadeira.

CAPÍTULO 4

SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

Na engenharia hidráulica vários são os esforços aplicados para que a disciplina de dinâmica dos fluidos forneça, cada vez mais soluções complexas com alta confiabilidade. Nesse sentido, os problemas abordados consideram um elevado número de dados e variáveis, o que resulta em densos sistemas de equações.

A utilização de recursos computacionais para esse fim busca através de modelos matemáticos, um conjunto de métodos e técnicas para melhor interpretação e entendimento da física implícita nos mais diversos problemas.

Em aplicações onde as características geométricas dos problemas são complexas, a simulação computacional demonstra ser uma poderosa ferramenta para o engenheiro.

4.1 – Modelagem numérica via CFD (Computational Fluids Dynamics)

A sigla CFD, que em português significa Dinâmica dos Fluidos Computacional, é o termo dado ao grupo de técnicas matemáticas, numéricas e computacionais usadas para obter, visualizar e interpretar soluções para as equações de conservação de grandezas físicas de interesse, em um dado escoamento.

A idéia é a construção de um modelo computacional virtual do sistema que se deseja estudar. Com a utilização de CFD aplica-se ao sistema as equações advindas da teoria de fenômenos de transporte. O software, também denominado de pacote computacional, faz a uma previsão da dinâmica dos fluidos, relacionando com os fenômenos físicos envolvidos.

Através da técnica é possível simular fluxos de gases e líquidos, transferência de calor e massa, malha móvel, sistemas com fases múltiplas, reação química, interação fluido-estrutura, e acústica, dentre outros.

4.2 – Software de CFD utilizado

O software de CFD utilizado para a análise do problema proposto neste trabalho é o FLUENT[®], reconhecido mundialmente quanto à credibilidade dos métodos e pacotes computacionais oferecidos, sendo largamente utilizado pelas indústrias, universidades e instituições de pesquisa.

A empresa idealizadora do pacote computacional foi fundada em meados de 1980, época em que a dinâmica dos fluidos computacional era de grande interesse no meio acadêmico. A intenção inicial era o desenvolvimento de um código de CFD fácil de trabalhar e interativo para os engenheiros.

Em outubro de 1983, através de parceria entre a Sheffield University e a empresa Create Inc., foi lançada a primeira versão do software CFD, chamado Fluent. O nome foi inspirado em uma frase de um tratado técnico, apresentado pelo físico inglês Sir Isaac Newton (1643 – 1727), que na oportunidade usou a expressão "flowing fluids" (fluidos fluentes).

O software Fluent ao longo de sua existência passou por várias fases de adaptação e atualização de seus pacotes computacionais; em maio de 2006 a empresa foi adquirida pela ANSYS[®], reconhecida mundialmente por soluções numéricas na área estrutural.

4.3 – Modelo Numérico Proposto

4.3.1 – Considerações Gerais

Conforme já citado anteriormente, as análises através de modelos físicos reduzidos possuem os resultados mais confiáveis, para a determinação das forças hidrodinâmicas presentes em comportas planas tipo vagão.

A proposta de um pacote comercial que utiliza metodologia numérica para resolução de problemas ligados a engenharia hidráulica, apresentada neste capítulo visa comprovar a capacidade desse método numérico em reproduzir os mesmos efeitos hidrodinâmicos obtidos previamente em laboratório.

A geração do presente modelo numérico visa determinar as forças hidrodinâmicas atuantes em comportas planas tipo vagão em túneis de desvio de usinas hidrelétricas. Para validação do modelo numérico utiliza-se os resultados advindos do modelo físico reduzido. É através da comparação desses resultados que se pode garantir a confiabilidade das metodologias adotadas. Uma vez validado o modelo numérico, pode-se aplicar os mesmos conceitos em obras similares, reduzindo ou até mesmo não utilizando mais modelos físicos reduzidos no futuro, para esse tipo de problema.

4.3.2 – Geometria Proposta

A validação do modelo numérico proposto foi realizada com os mesmos parâmetros geométricos utilizados no modelo físico reduzido da UHE Machadinho, apresentado no capítulo três, ou seja; a geometria foi gerada na escala de 1:30. O modelo numérico com as principais cotas em milímetros está ilustrado nas figuras 4.1 e 4.2.

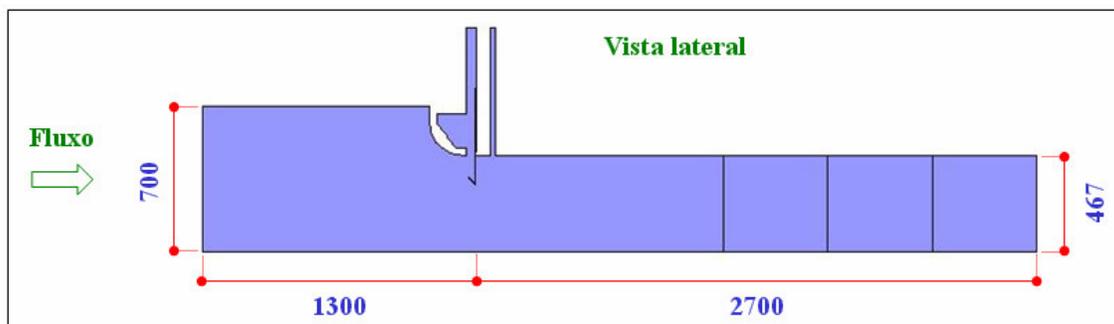


Figura 4.1 – Vista lateral do modelo numérico tridimensional.

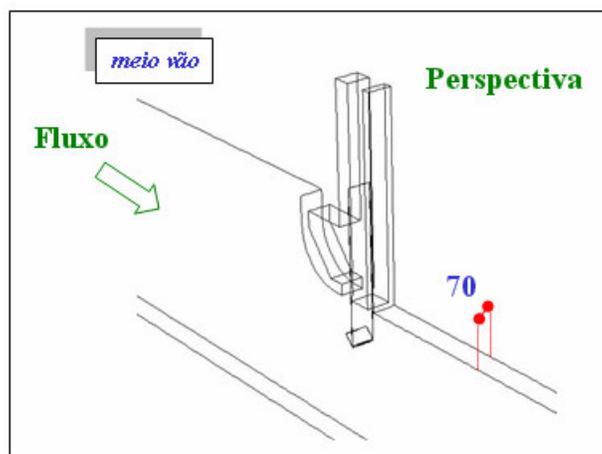


Figura 4.2 – Perspectiva de parte do modelo numérico tridimensional.

Algumas considerações foram realizadas na geração da geometria do modelo numérico, a primeira é a não construção da curva superior da seção tipo túnel. O presente modelo numérico permite a utilização de condição de contorno de simetria na sua seção longitudinal, desse modo a curva superior ficaria bastante reduzida, não possuindo área significativa para alterar qualquer valor do cálculo da vazão.

A segunda consideração é a forma de apresentação da comporta vagão ensecadeira. O modelo numérico apresenta a comporta pela chapa de paramento, cutelo e uma viga horizontal. Essa concepção facilita a discretização do domínio (geração da malha) na região, não comprometendo a leitura das forças hidrodinâmicas atuantes na mesma, pois o carregamento na região a montante é considerado como estático. A comporta do modelo numérico com suas cotas principais em milímetros está ilustrada na figura 4.3.

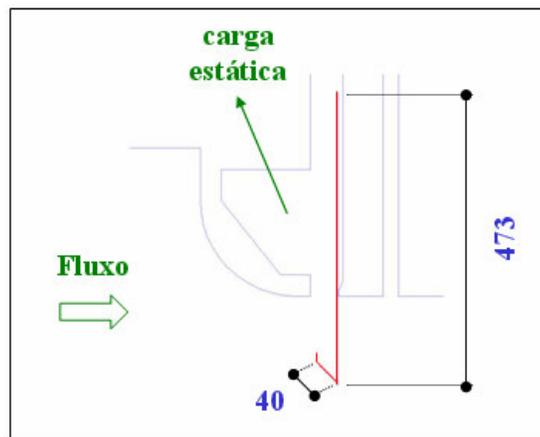


Figura 4.3 – Detalhe da comporta vagão ensecadeira do modelo numérico.

4.3.3 – Condições de Contorno

Com a definição da geometria do problema, que também pode ser denominada de domínio, pois define a região de interesse na qual será realizada a simulação, o procedimento seguinte é a definição das condições de contorno.

As condições de contorno são as características físicas consideradas nas fronteiras do domínio, representando a interação do mesmo com o restante do universo, dessa forma, busca o estabelecimento de relações mais próximas possíveis da realidade física do problema.

Numericamente, a definição das condições de contorno é de vital importância para o problema analisado. Condições de contorno que não representam a realidade podem gerar resultados que, embora da mesma ordem de grandeza, estejam incorretos.

Em modelos físicos reduzidos, a interpretação das condições de contorno devem ser analisadas com cautela, pois erros como perdas de carga (pela utilização de válvulas) ou rugosidade dos materiais aplicados podem introduzir erros na leitura dos valores, bem como tolerâncias geométricas, que se apresentam mais rígidas no modelo do que no protótipo.

Para o modelo numérico da UHE Machadinho, foram definidas cinco condições de contorno, ilustradas na figura 4.4.

Entrada (inlet): face do domínio onde é inserida a condição de entrada do escoamento. O fluido escoar somente para dentro do domínio. Na modelagem proposta é utilizada em duas situações: posição vertical na face esquerda, onde estabelece um gradiente de pressão com distribuição hidrostática (em relação ao eixo y) e na posição horizontal na face superior a montante do reservatório, tendo seu valor de pressão igual a zero, caracterizando a superfície do reservatório com submetido à pressão atmosférica.

Saída (outlet): face do domínio onde o fluido escoar somente para fora. Condição utilizada na posição vertical na saída do domínio, onde o próprio escoamento estabelece o gradiente de pressão com distribuição hidrostática.

Parede (wall 1 / wall 2): face do domínio que representa condição de impermeabilidade para o escoamento. O tipo 1 foi considerado como sem resistência, também conhecida por *free slip*. Essa condição foi utilizada nas duas faces horizontais superiores das ranhuras da comporta vagão ensecadeira e comporta vagão corta fluxo, respectivamente. Para o tipo 2, caracterizado como parede rugosa, também conhecida por *rough wall*, foi utilizado para as demais faces do domínio que não receberam condições de contorno próprias.

Plano de simetria (symmetry): face do domínio onde o escoamento é simétrico de tal forma que o gradiente das variáveis normal à face é nulo. Sendo assim, o escoamento de um lado do plano é uma imagem espelhada do outro lado. Essa condição de contorno foi aplicada ao longo de todo modelo (plano xy na direção z), possibilitando simular meio vão.

Interior (interiors): única condição aplicada nas faces internas do domínio, não alterando propriedade alguma do escoamento. A utilização dessa condição de contorno se faz necessária para ligação dos volumes geométricos construídos, além de possibilitar a leitura e acompanhamento das propriedades físicas durante o processo de cálculo.

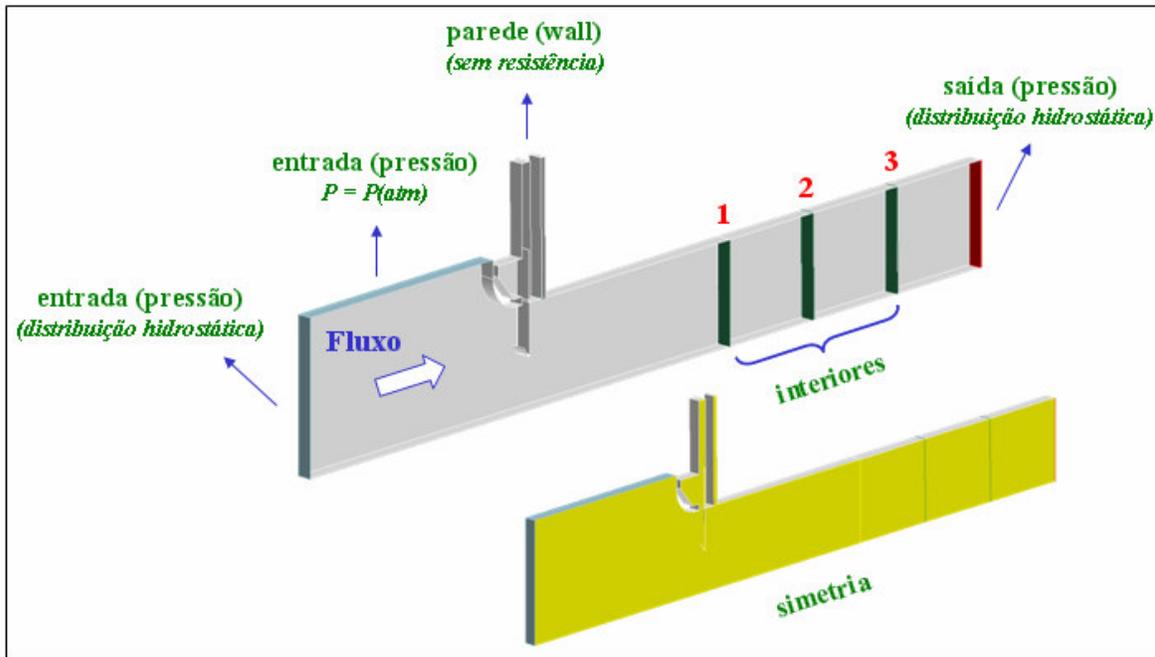


Figura 4.4 – Condições de contorno aplicadas ao modelo numérico tridimensional.

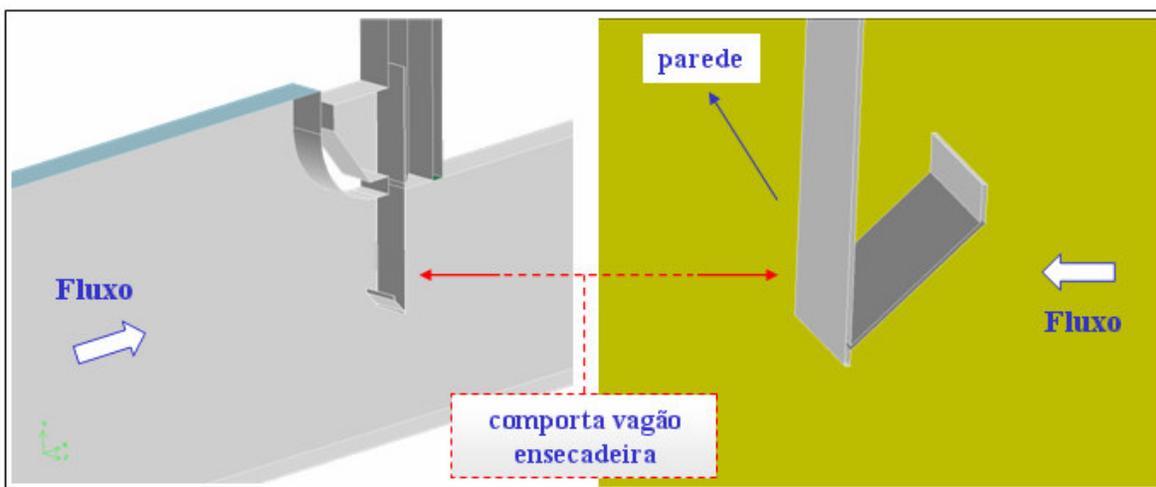


Figura 4.5 – Detalhe da geometria da comporta vagão enscadeira do modelo numérico.

4.3.4 – Geração da Malha Computacional

A malha computacional tridimensional para o presente trabalho foi gerada através do software Gambit[®], onde também são aplicadas as condições de contorno. Dessa forma, o arquivo contendo o domínio, a malha computacional e as condições de contorno consideradas são importadas pelo software Fluent para a simulação numérica.

Basicamente constituída por linhas e pontos, sendo os pontos o local de interceptação entre linhas, cuja função é de orientação para o cálculo das propriedades físicas baseadas num modelo matemático. A malha computacional, portanto, nada mais é do que uma representação ou discretização do domínio utilizado na simulação numérica.

Para a geração da malha computacional no domínio a ser estudado, é necessário o conhecimento dos fenômenos físicos envolvidos, para que os resultados gerados sejam representativos. Além disso, o tamanho da malha determinada deve ser aquele que melhor represente as grandezas do escoamento, de acordo com os recursos computacionais envolvidos. No presente trabalho, a opção foi pela utilização de malha prismática não-estruturada onde cinco configurações, em relação ao refinamento foram analisadas.

O processo de investigação de refinamento da malha computacional foi iniciado partindo-se da construção de uma malha primária no domínio do modelo. A esse arquivo, denominado de M_1 , foram impostas as condições de contorno nas faces e o mesmo foi importado pelo software Fluent, que gerou os resultados numéricos.

A mesma metodologia numérica realizada para o arquivo M_1 foi utilizada para os demais arquivos, porém, a cada arquivo gerado a malha computacional teve acréscimo da quantidade de aproximadamente 15% da quantidade de pontos nas linhas.

Para estabelecer um critério de parada em relação ao refinamento da malha numérica, foram observados e utilizados como objeto de comparação entre os modelos, os valores calculados para a vazão na condição de contorno interior_3 e força hidrodinâmica atuante na comporta vagão ensecadeira.

Os resultados obtidos para cada discretização validada estão apresentados na tabela 4.1. Os valores apresentados são: vazão e força hidrodinâmica.

Tabela 4.1 – Resultado em função da discretização utilizada no modelo numérico da UHE Machadinho.

malha	número de células	número de nós	vazão [m³/s]	força hidrodinâmica [kgf]
M ₁	749.726	162.560	0,0574	1,54
M ₂	882.030	192.331	0,0601	1,62
M ₃	1.050.036	228.169	0,0622	1,70
M ₄	1.220.972	265.709	0,0636	1,76
M ₅	1.450.944	313.885	0,0636	1,76

A observação dos resultados apresentados na tabela 4.1 apontam a malha M₄ como a melhor configuração para o problema analisado. Essa afirmação se dá pelos resultados obtidos da vazão e força hidrodinâmica entre os dois últimos casos estudados (M₄ e M₅), não havendo alteração dos valores numéricos nas faces monitoradas.

Para os demais modelos numéricos que possuem o mesmo domínio e condições de contorno, foram aplicadas as mesmas configurações da malha M₄, a única variação entre os modelos é a abertura da comporta vagão ensecadeira, na faixa de 10 a 100%.

A malha M₄, utilizada para os modelos numéricos é apresentada nas figuras 4.6 a 4.8, sendo que a última mostra a região próxima ao cutelo da comporta vagão ensecadeira.

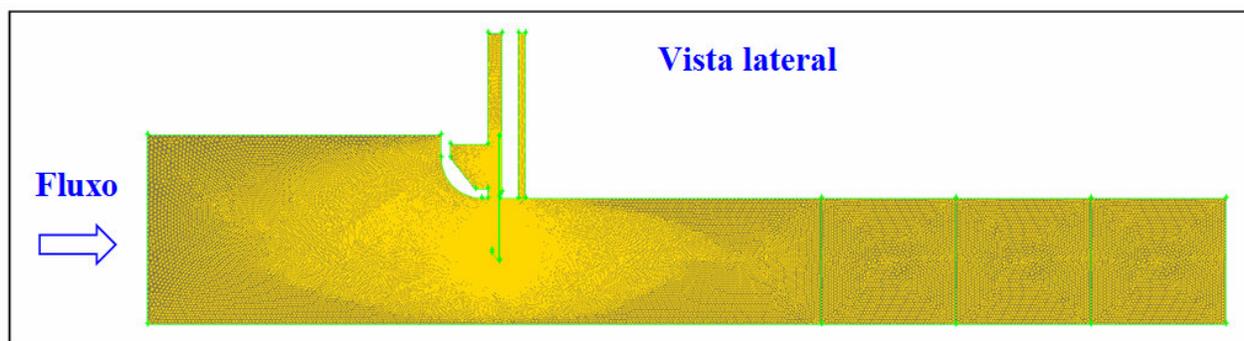


Figura 4.6 – Vista lateral da malha computacional tipo M₄ para 50% de abertura da comporta vagão ensecadeira.

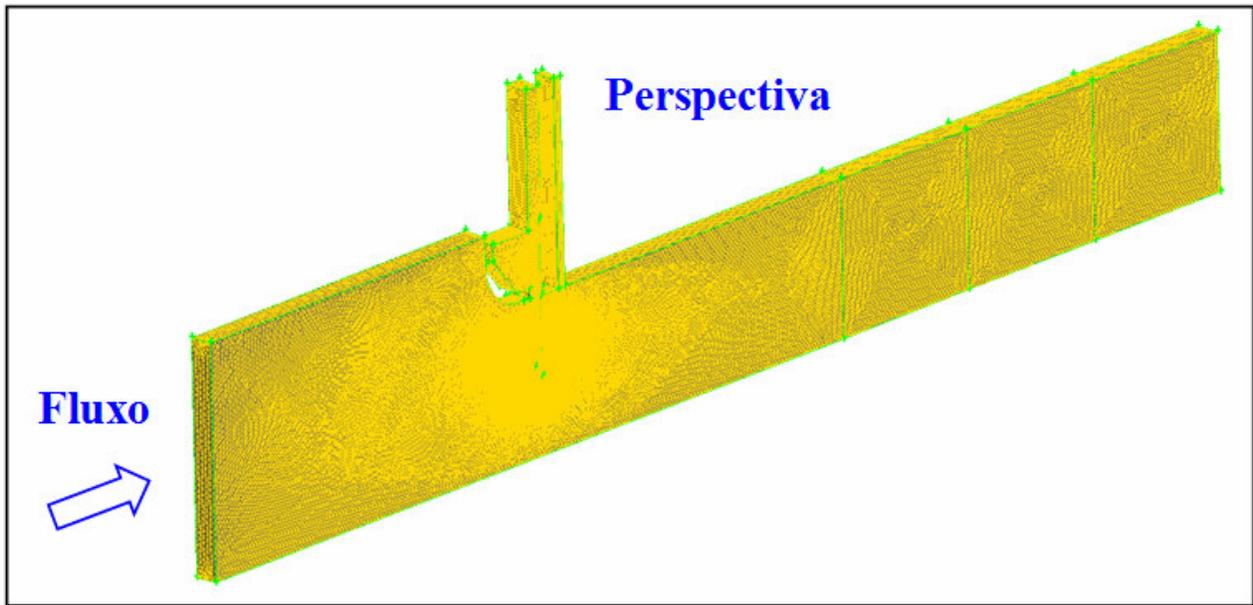


Figura 4.7 – Perspectiva da malha computacional tipo M_4 para 50% de abertura da comporta vagão ensecadeira.

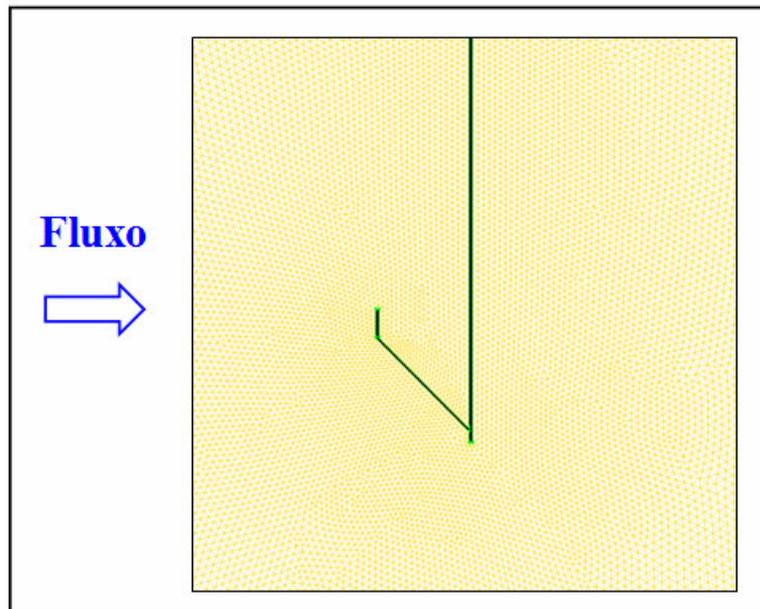


Figura 4.8 – Detalhe da malha computacional tipo M_4 para a região próxima do cutelo da comporta vagão ensecadeira.

4.3.5 – Condições Gerais das Simulações

Para as simulações numéricas tridimensionais, foi utilizado o software Fluent versão 6.1.22, que utiliza o método dos volumes finitos para a resolução de escoamentos. Para a geração da malha e definição das condições de contorno nas faces do domínio, foi utilizado o software Gambit versão 2.4.6.

O computador utilizado para as análises, pertencente ao setor de Pesquisa & Desenvolvimento da empresa Bardella S.A. – Indústrias Mecânicas foi um Intel Xeon[®], composto por um núcleo com quatro processadores de 3.20 GHz, com 16 GB de memória RAM.

As propriedades da fase água foram consideradas aquelas que a mesma se apresenta em estado líquido e CNTP, ou seja: massa específica $\rho = 998,2 \text{ kg/m}^3$, viscosidade dinâmica $\mu = 0,001 \text{ kg/m.s}$, para a aceleração da gravidade considerou-se $g = 9,806 \text{ m/s}^2$.

Para o modelo numérico foi utilizada a formulação implícita, com o simulador do tipo segregado, onde as equações para a resolução de cada componente de velocidade são calculadas de maneira separadas em relação à pressão.

O algoritmo SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equations), (PATANKAR e SPALDING, 1972) foi utilizado para a solução do acoplamento do campo de pressão e velocidades. Para o cálculo da quantidade de movimento, energia cinética e taxa de dissipação turbulenta foi utilizado o esquema de primeira ordem upwind.

Para obtenção da energia cinética turbulenta, e sua respectiva dissipação, foi utilizado o modelo de turbulência k- ϵ (padrão), onde seus coeficientes estão apresentados na tabela 4.2. A função de parede, também tipo padrão, foi utilizada para resolver o escoamento na sub-camada viscosa da camada limite.

A tabela 4.3 apresenta os coeficientes de sub-relaxação utilizados para a resolução dos modelos numéricos propostos.

Tabela 4.2 – Coeficientes do modelo k-ε de turbulência.

C_μ	σ_k	σ_ε	$C_{1\varepsilon}$	$C_{2\varepsilon}$
0,09	1,00	1,30	1,44	1,92

Tabela 4.3 – Coeficientes de sub-relaxação utilizados para os modelos numéricos.

equacionamento	valor
pressão	0,3
densidade	1,0
força de campo	1,0
quantidade de movimento	0,7
energia cinética turbulenta	0,8
taxa dissipação – energia cinética turbulenta	0,8
viscosidade turbulenta	1,0

Foi utilizado o critério de convergência padrão do software Fluent, que para a solução do sistema de equações utiliza o método Gauss-Seidel em conjunto com um método multigrid para aceleração da convergência (Fluent User's Guide, 2003), maiores detalhes podem ser encontrados no anexo II.

4.4 – Resultados Obtidos

4.4.1 – Vazão e coeficiente de vazão

No modelo numérico a vazão foi monitorada através das condições de contorno: interior_1, interior_2, interior_3 e saída. Para as quatro áreas monitoradas, os resultados foram exatamente iguais, pois a equação da continuidade foi satisfeita.

Pelo fato da utilização de condição de contorno de simetria, os resultados, apresentados na tabela 4.4, foram relativos a metade da área, devendo-se multiplicar por dois, para obtenção do valor final. A figura 4.9 apresenta o gráfico da vazão em função da abertura da comporta com os dados apresentados na tabela 4.4.

Tabela 4.4 – Resultados da vazão do modelo numérico.

abertura da comporta vagão ensecadeira [%]	vazão (meio vão) [m ³ /s]	vazão (vão inteiro) [m ³ /s]
100	0,0623	0,1246
90	0,0553	0,1105
80	0,0485	0,0970
70	0,0436	0,0872
60	0,0375	0,0750
50	0,0318	0,0636
40	0,0253	0,0505
30	0,0181	0,0361
20	0,0123	0,0246
10	0,0061	0,0122

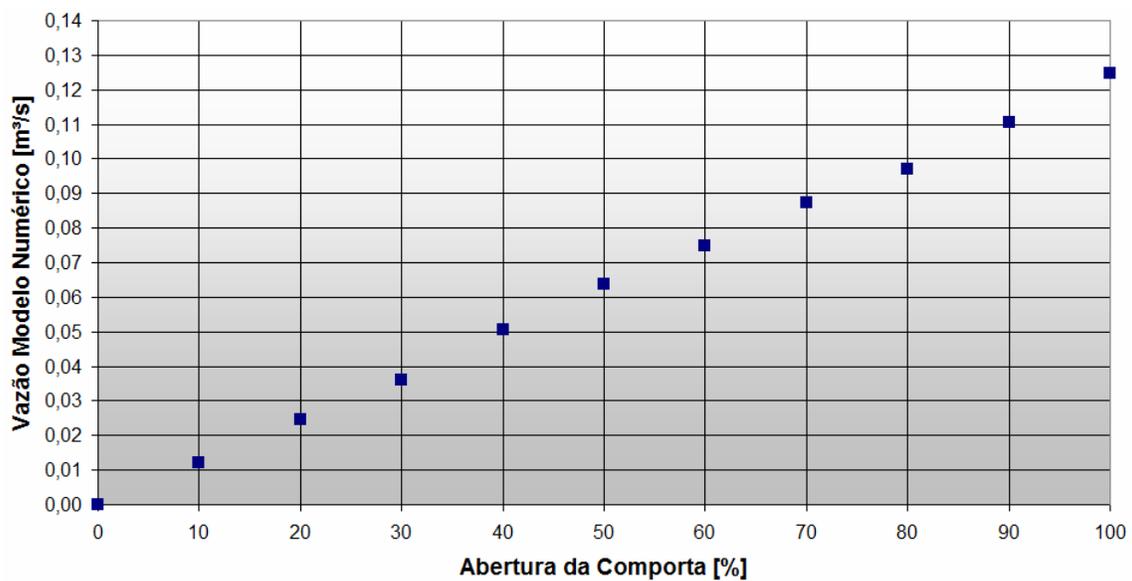


Figura 4.9 – Vazão em função da abertura da comporta vagão ensecadeira para o modelo numérico.

O cálculo do coeficiente de vazão do protótipo está demonstrado na tabela 4.5. Os resultados apresentados foram calculados com os mesmos critérios adotados no cálculo do coeficiente de vazão do modelo físico reduzido, tabela 3.4. A figura 4.10 apresenta o gráfico do coeficiente de vazão pela abertura da comporta com os dados da tabela 4.5.

Tabela 4.5 – Resultados dos coeficientes de vazão do modelo numérico da UHE Machadinho.

abertura da comporta		Q (modelo)	largura livre	H'	Cd
[%]	[m]	[m ³ /s]	[m]	[m]	
100	0,467	0,1246	0,140	0,467	0,630
90	0,420	0,1105	0,140	0,490	0,606
80	0,373	0,0970	0,140	0,513	0,585
70	0,327	0,0872	0,140	0,537	0,588
60	0,280	0,0750	0,140	0,560	0,577
50	0,233	0,0636	0,140	0,583	0,576
40	0,187	0,0505	0,140	0,607	0,560
30	0,140	0,0361	0,140	0,630	0,524
20	0,093	0,0246	0,140	0,653	0,526
10	0,047	0,0122	0,140	0,677	0,513

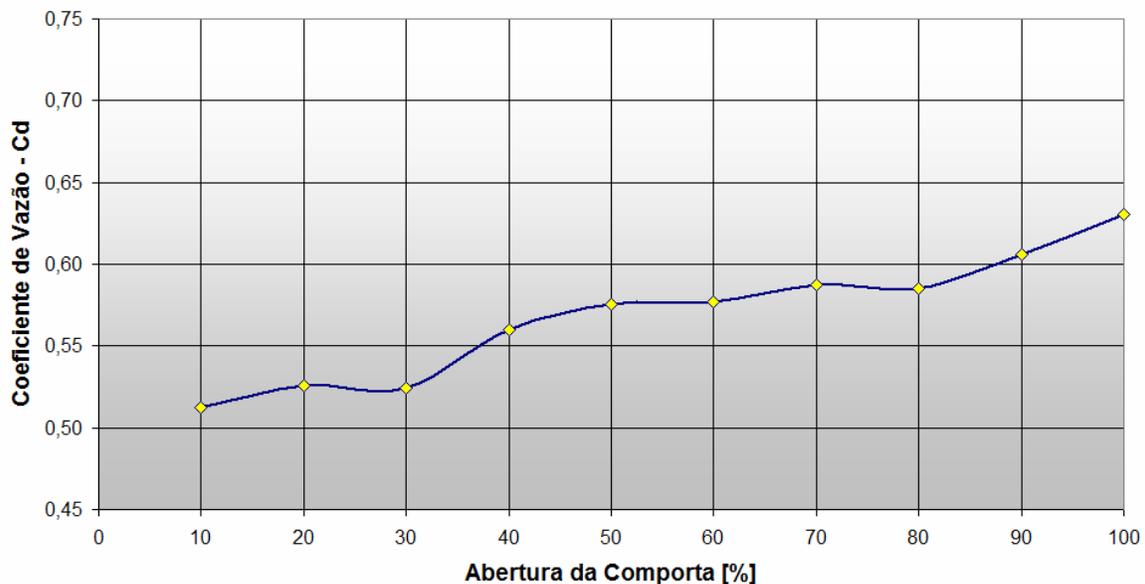


Figura 4.10 – Coeficiente de vazão do modelo numérico da UHE Machadinho.

4.4.2 – Pressões ao longo do modelo

Os resultados das pressões atuantes no fundo do canal do modelo numérico são baseadas nas distâncias das tomadas de pressão, distribuídas no modelo físico em escala reduzida. Os valores das tomadas I1, I2, I3 e I4, em metros de coluna d'água para as aberturas de 20, 40 e 70%, estão apresentados na tabela 4.6 e de forma gráfica na figura 4.11.

Tabela 4.6 – Resultados numéricos da pressão no fundo do canal para três aberturas da comporta vagão ensecadeira.

tomadas de pressão inferiores	abertura da comporta vagão ensecadeira		
	20 [%]	40 [%]	70 [%]
	carga de pressão[m.c.H ₂ O]		
I1	0,660	0,638	0,627
I2	0,637	0,613	0,606
I3	0,599	0,580	0,590
I4	0,518	0,533	0,573

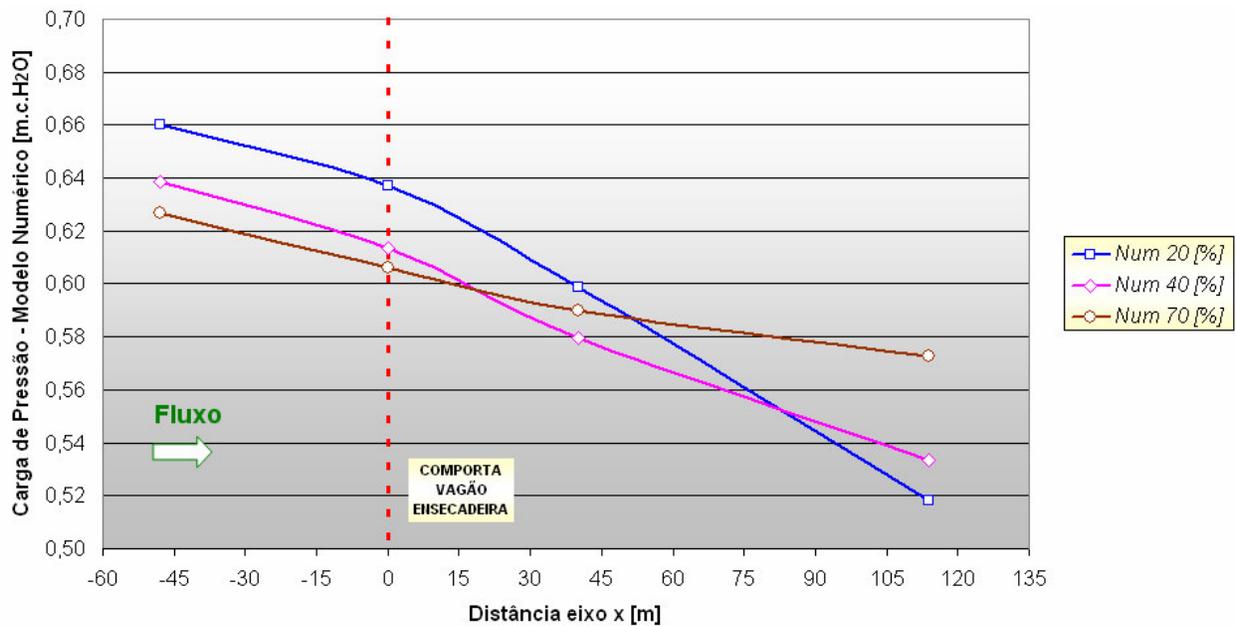


Figura 4.11 – Distribuição da pressão no fundo do canal do modelo numérico.

4.4.3 – Força Hidrodinâmica

A força hidrodinâmica atuante na comporta vagão ensecadeira do modelo numérico é obtida fazendo-se a integral da pressão nas condições de contorno das paredes da comporta modelada e considerando-se a somatória das forças atuantes ao longo do eixo y. Da mesma forma que a vazão, o resultado final é obtido, multiplicando-se os valores encontrados por dois. Os resultados das forças hidrodinâmicas estão apresentados na tabela 4.7 e de maneira gráfica na figura 4.12.

Tabela 4.7 – Resultados da força hidrodinâmica do modelo numérico.

abertura da comporta vagão ensecadeira [%]	ΣFy (meio vão) [kgf]	ΣFy (vão inteiro) [kgf]
100	-0,025	-0,05
90	0,125	0,25
80	0,345	0,69
70	0,570	1,14
60	0,750	1,50
50	0,850	1,70
40	0,895	1,79
30	0,805	1,61
20	0,605	1,21
10	0,370	0,74

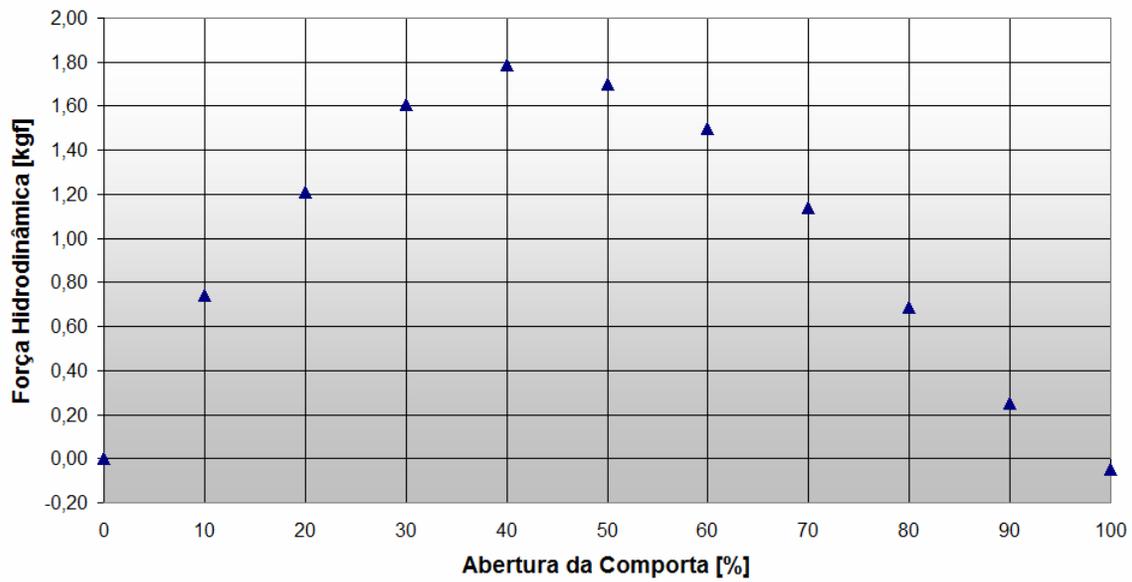


Figura 4.12 – Esforços hidrodinâmicos do modelo numérico.

As figuras 4.13 a 4.21 apresentam os resultados de pressão e velocidade, na condição de contorno simetria, do modelo numérico tridimensional para aberturas de 20, 50 e 90% respectivamente.

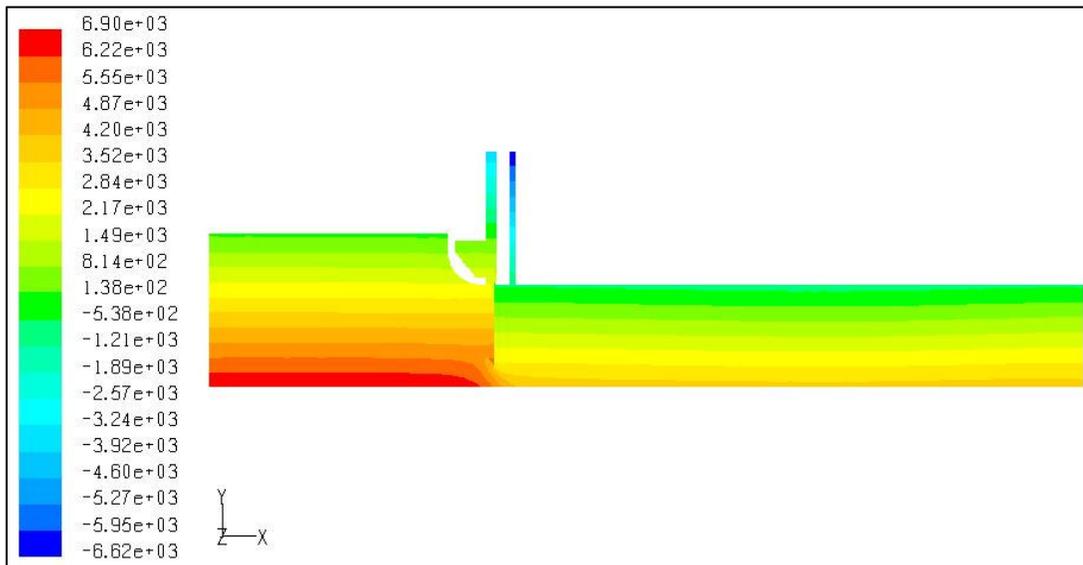


Figura 4.13 – Distribuição das pressões no modelo numérico – vista geral para abertura da comporta em 20%.

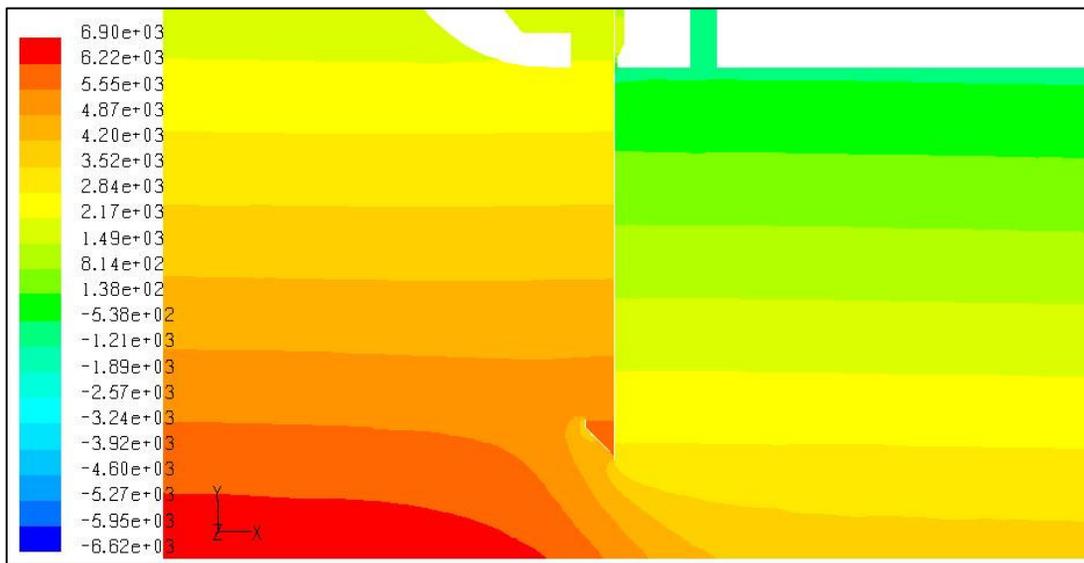


Figura 4.14 – Distribuição das pressões no modelo numérico – detalhe da região próxima a comporta com abertura em 20%.

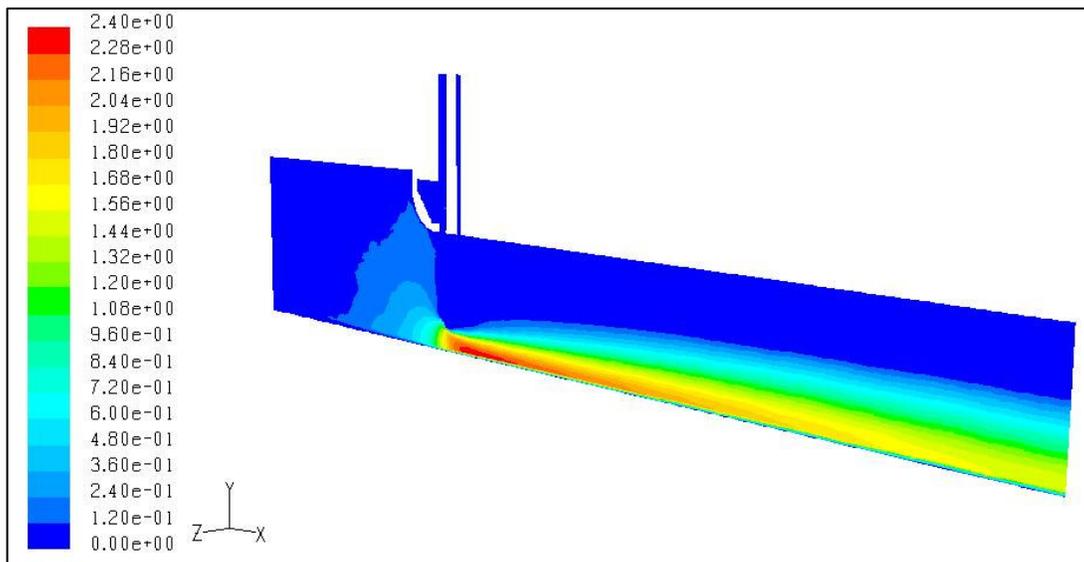


Figura 4.15 – Distribuição das velocidades no modelo numérico – vista geral para abertura da comporta em 20%.

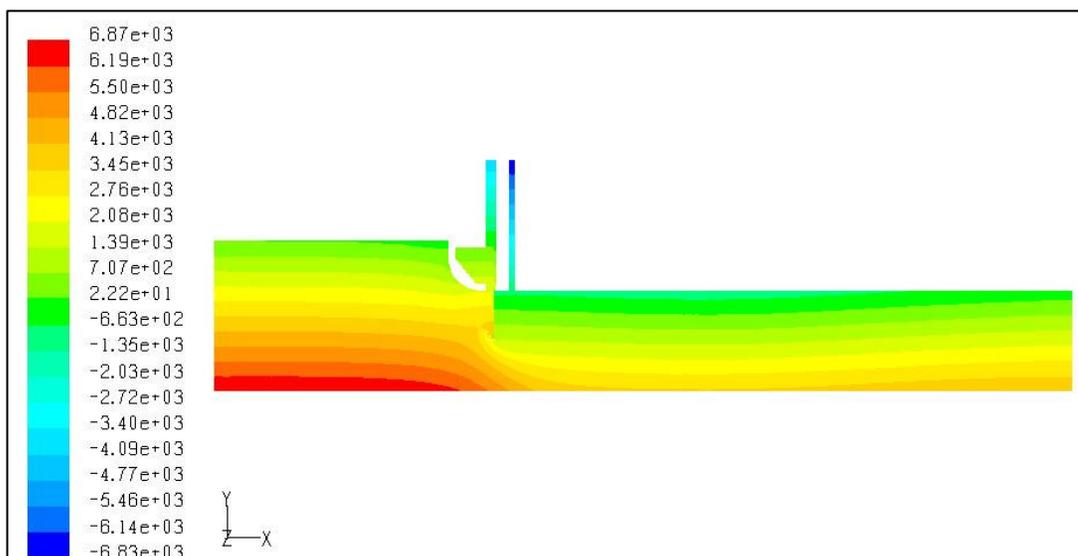


Figura 4.16 – Distribuição das pressões no modelo numérico – vista geral para abertura da comporta em 50%.

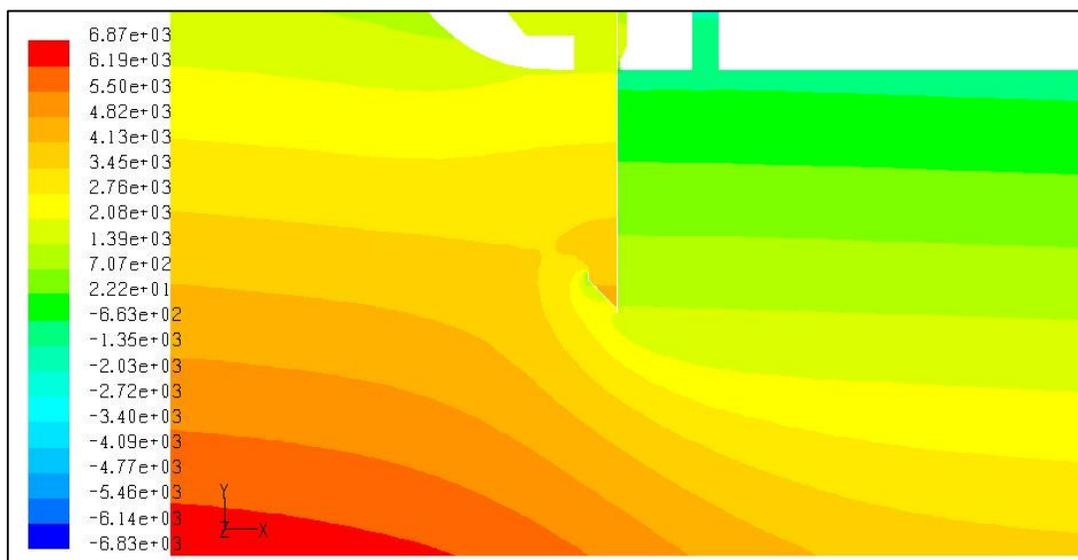


Figura 4.17 – Distribuição das pressões no modelo numérico – detalhe da região próxima a comporta com abertura em 50%.

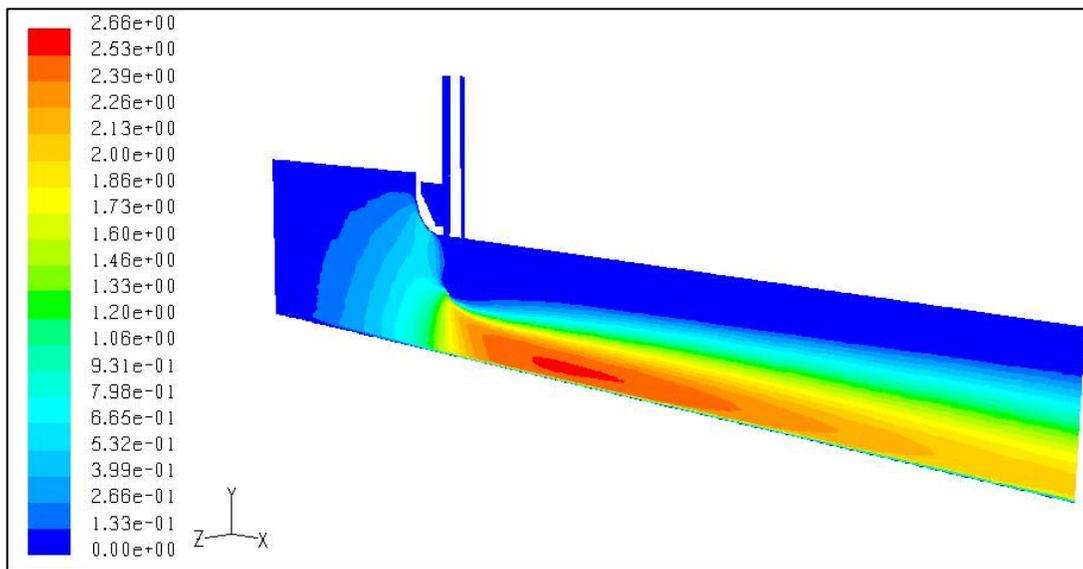


Figura 4.18 – Distribuição das velocidades no modelo numérico – vista geral para abertura da comporta em 50%.

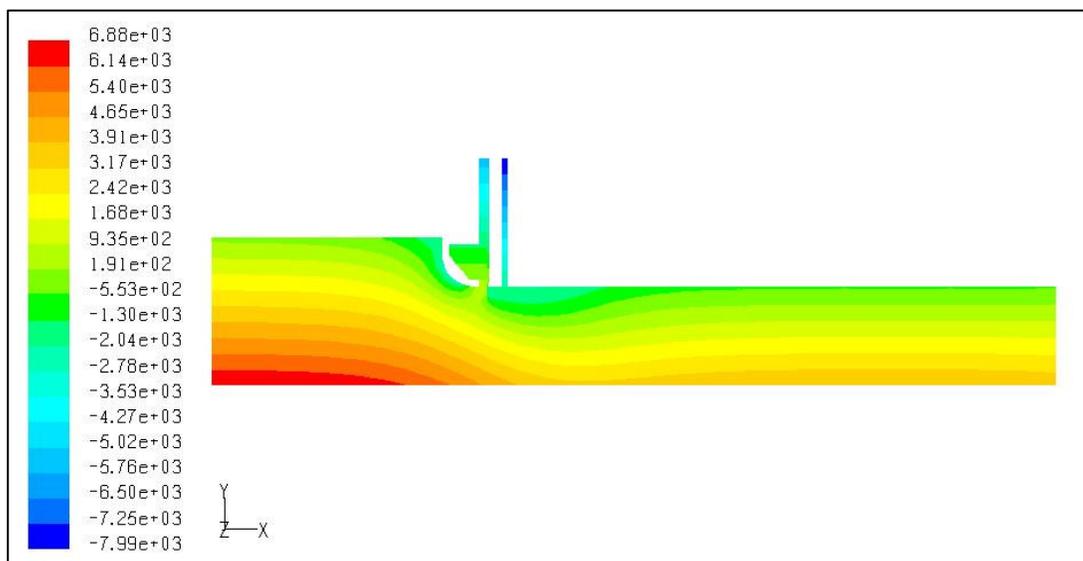


Figura 4.19 – Distribuição das pressões no modelo numérico – vista geral para abertura da comporta em 90%.

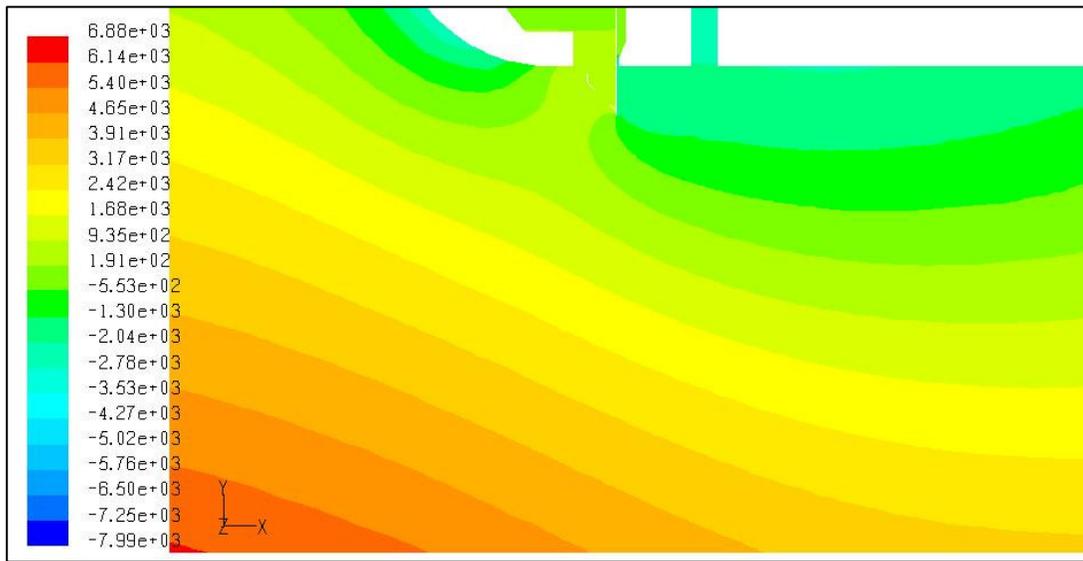


Figura 4.20 – Distribuição das pressões no modelo numérico – detalhe da região próxima a comporta com abertura em 90%.

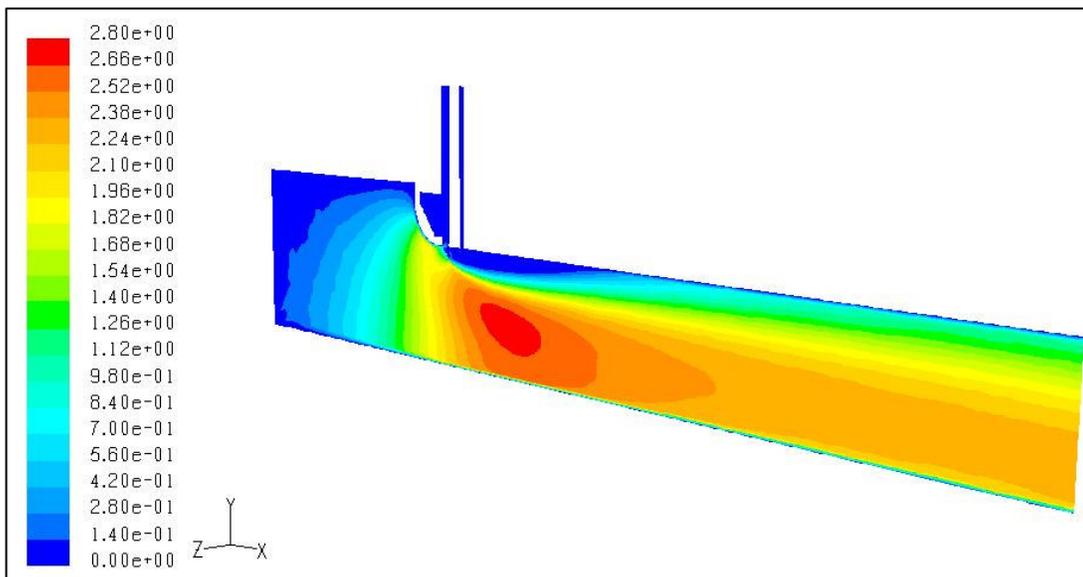


Figura 4.21 – Distribuição das velocidades no modelo numérico – vista geral para abertura da comporta em 90%.

CAPÍTULO 5

COMPARAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo serão comparados os resultados teóricos, os resultados obtidos em modelos físicos reduzidos e os resultados do modelo numérico tridimensional, para o túnel de desvio da UHE Machadinho.

As seguintes grandezas são objetos de comparação:

- vazão
- coeficiente de descarga,
- pressões atuantes no fundo do canal, e
- esforços hidrodinâmicos na comporta vagão ensecadeira.

5.1 – Vazão

A comparação das vazões será realizada entre o modelo analítico, modelo físico reduzido, apresentado na tabela 3.4 e modelo numérico tridimensional, apresentado na tabela 4.4.

A vazão advinda da teoria, calculada utilizando-se dados geométricos e características hidráulicas do protótipo, é realizada de acordo com a equação (2.1), e neste trabalho será denominada de analítica.

Para o cálculo da vazão analítica e montagem da tabela 5.1, as seguintes considerações foram realizadas:

- foram utilizados os valores do coeficiente de descarga para comportas planas tipo vagão, proposto pelo HDC e apresentados na tabela 2.1,
- a velocidade teórica é representada pela expressão: $\sqrt{2gH''}$, onde H'' é calculado como a diferença entre a carga hidráulica e a metade da abertura da comporta (ponto médio da seção do escoamento).

Tabela 5.1 – Cálculo analítico da vazão para a UHE Machadinho.

abertura da comporta vagão ensecadeira		C_d coeficiente de vazão	b largura livre [m]	velocidade teórica [m/s]	Q vazão analítica [m ³ /s]
[%]	y [m]				
100	14,0	0,81	4,2	16,57	789,23
90	12,6	0,80	4,2	16,98	718,86
80	11,2	0,80	4,2	17,38	654,02
70	9,8	0,78	4,2	17,77	570,50
60	8,4	0,77	4,2	18,15	493,12
50	7,0	0,75	4,2	18,53	408,51
40	5,6	0,74	4,2	18,89	238,84
30	4,2	0,74	4,2	19,25	251,33
20	2,8	0,73	4,2	19,61	168,32
10	1,4	0,73	4,2	19,95	85,65

A tabela 5.2 reúne os valores da vazão calculados de forma analítica, apresentados na tabela 5.1, com os resultados da vazão do modelo físico reduzido e modelo numérico.

Tabela 5.2 – Vazões analíticas, modelo físico reduzido e modelo numérico para a UHE Machadinho

abertura comporta [%]	modelo analítico [m ³ /s]	modelo físico reduzido [m ³ /s]	modelo numérico [m ³ /s]
100	789,23	647,89	614,22
90	718,86	575,09	544,71
80	654,02	505,25	478,16
70	570,50	455,21	429,85
60	493,12	393,41	369,71
50	408,51	338,33	313,52
40	238,84	269,54	248,94
30	251,33	195,40	177,96
20	168,32	136,83	121,27
10	85,65	70,34	60,14

A figura 5.1 apresentada de forma gráfica os resultados da vazão pela abertura da comporta, contidos na tabela 5.2.

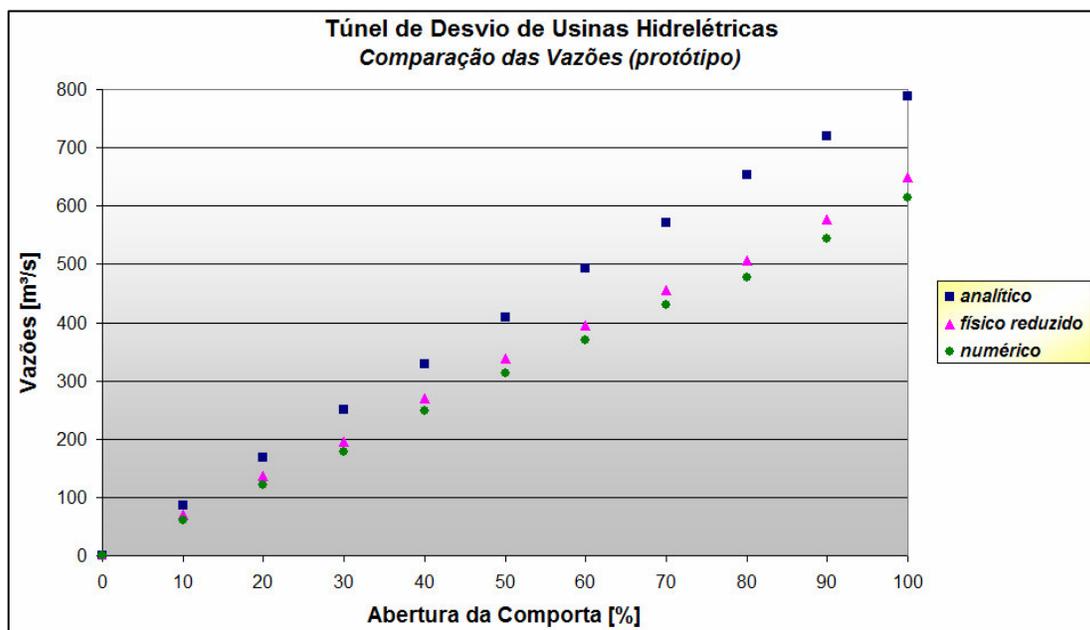


Figura 5.1 – Vazão em função da abertura da comporta do modelo analítico, físico reduzido e numérico da UHE Machadinho.

Os resultados da vazão apresentados na tabela 5.2 e na figura 5.1 mostram a vazão analítica, que apresenta resultados maiores aos obtidos nos ensaios físicos reduzidos e ensaios numéricos.

Esses valores mais altos ocorrem em razão dos coeficientes de descarga, proposto pelo HDC. O mesmo é uma boa alternativa na ausência de valores específicos, mais de maneira geral possui valores mais conservadores, pois não consideram a geometria do cutelo das comportas vagão.

Os valores da vazão em função da abertura da comporta, do modelo físico reduzido e do modelo numérico são comparados na tabela 5.3.

Tabela 5.3 – Comparação entre os valores de vazão do modelo físico reduzido e modelo numérico para a UHE Machadinho

abertura comporta [%]	modelo físico reduzido [m ³ /s]		modelo numérico [m ³ /s]		desvio [%]
	modelo	protótipo	modelo	protótipo	
100	0,1314	647,89	0,1246	614,22	5,2
90	0,1167	575,09	0,1105	544,71	5,3
80	0,1025	505,25	0,097	478,16	5,4
70	0,0923	455,21	0,0872	429,85	5,6
60	0,0798	393,41	0,075	369,71	6,0
50	0,0686	338,33	0,0636	313,52	7,3
40	0,0547	269,54	0,0505	248,94	7,6
30	0,0396	195,40	0,0361	177,96	8,9
20	0,0278	136,83	0,0246	121,27	11,4
10	0,0143	70,34	0,0122	60,14	14,5

A figura 5.2 apresentada de forma gráfica os resultados da vazão apresentados na tabela 5.3

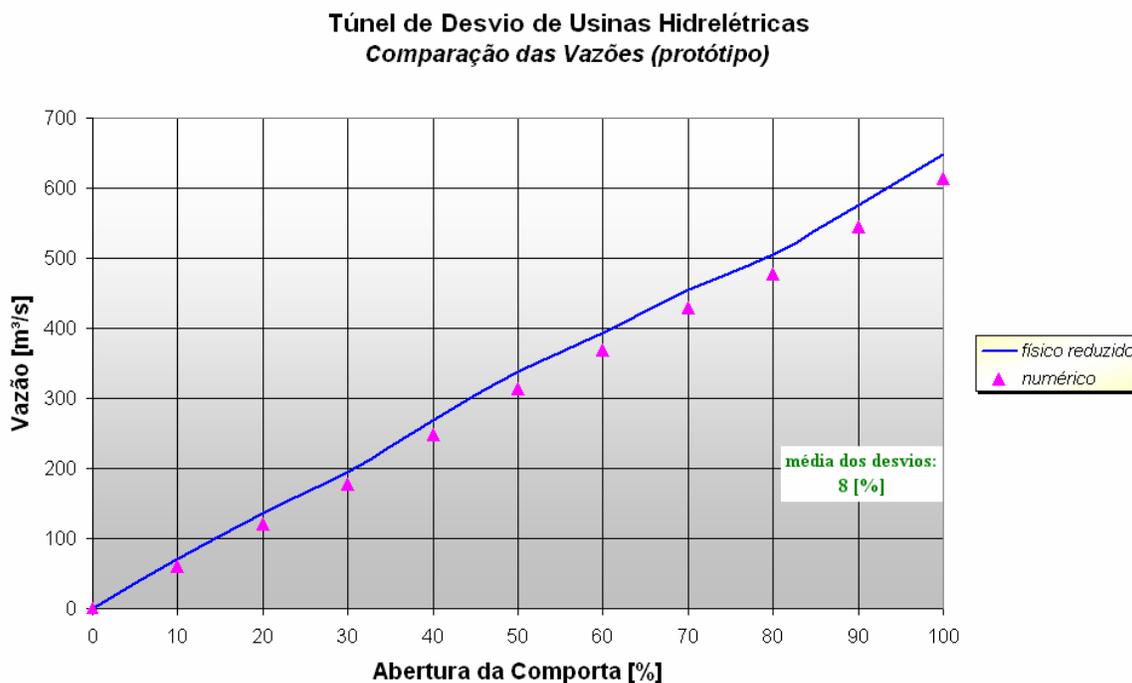


Figura 5.2 – Vazão em função da abertura da comporta do modelo físico reduzido e numérico da UHE Machadinho.

Os resultados apresentados na tabela 5.3 e na figura 5.2 mostram que a vazão obtida através do modelo numérico possui a mesma tendência da vazão obtida através do modelo físico.

Os erros apresentados pela tabela 5.3 possuem valor médio de 8%. As maiores diferenças estão relacionadas as pequenas aberturas da comporta (menores que 30%). Isso acontece, pois aberturas de 0 até aproximadamente 40% possuem vazão controlada exclusivamente pela comporta vagão ensecadeira, sendo uma região que sofre forte influência da geometria adotada.

5.2 – Coeficiente de Descarga

A tabela 5.4 apresenta os coeficientes de descarga para cada abertura da comporta vagão ensecadeira. O modelo teórico proposto pelo HDC, apresentado na tabela 2.1, é uma alternativa quando não se possui valores específicos. Os coeficientes dos ensaios em modelos físicos reduzidos e do ensaio numérico tridimensional são calculados de acordo com a equação (2.1).

Tabela 5.4 – Coeficientes de descarga dos estudos propostos.

abertura comporta [%]	modelo teórico HDC	ensaios em modelos físicos reduzidos				modelo numérico 3D
		UHE Itaparica	UHE Capanda	UHE Itá	UHE Machadinho	
90	0,90	0,62		0,69	0,64	0,61
80	0,80	0,62		0,66	0,62	0,59
70	0,78	0,63		0,67	0,62	0,59
60	0,77	0,65		0,66	0,61	0,58
50	0,75	0,64	0,56	0,66	0,62	0,58
40	0,74	0,64	0,56	0,64	0,61	0,56
30	0,74	0,65	0,59	0,61	0,58	0,52
20	0,73	0,66	0,68	0,63	0,59	0,53
10	0,73	0,65	0,77	0,63	0,60	0,51

A figura 5.3 apresenta o gráfico dos coeficientes de descarga do modelo teórico, físicos reduzidos e numérico, apresentados na tabela 5.4.

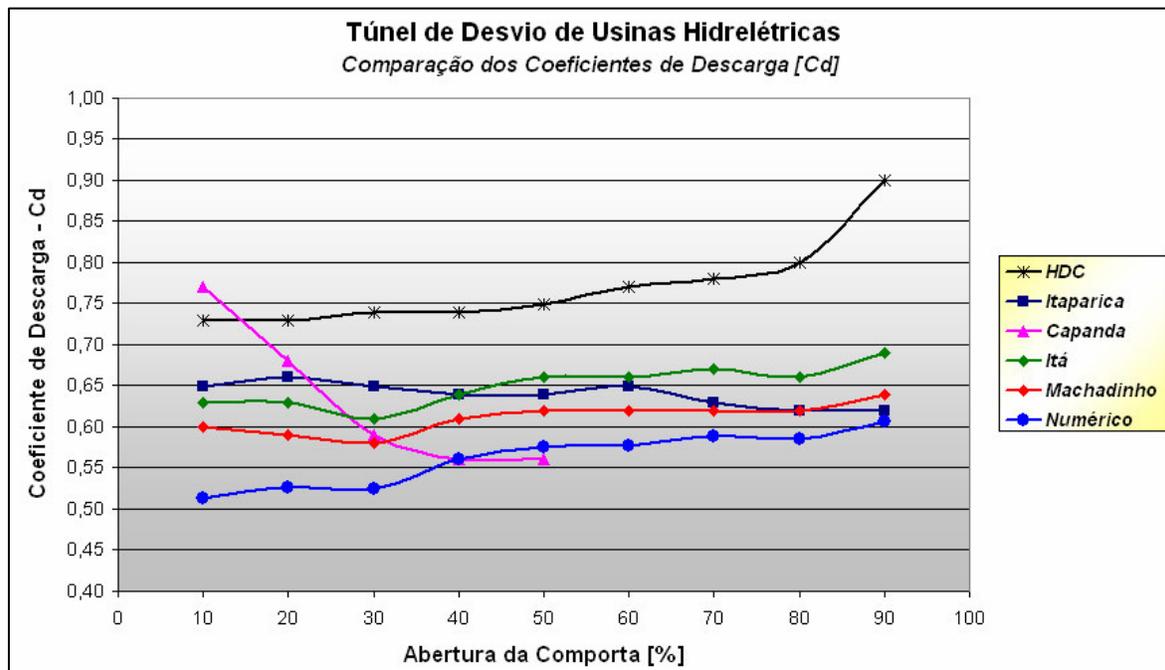


Figura 5.3 – Coeficiente de descarga em função da abertura da comporta para os estudos propostos.

Os coeficientes de descarga obtidos nos ensaios físicos e numéricos apresentaram tendências similares e todos, com exceção da UHE Capanda para uma faixa de abertura até 15%, tiveram valores menores que os propostos pelo HDC. Observa-se então, que para os estudos propostos os valores teóricos possuem resultados mais conservadores.

Essas diferenças apresentadas são devidas as condições de aproximação do fluxo no canal, bem como condições de afogamento, termo cinético e material acrílico utilizado para os ensaios físicos.

A tabela 5.5 apresenta a comparação dos coeficientes de descarga entre o modelo físico reduzido, tabela 3.5 e modelo numérico tridimensional, tabela 4.5 da UHE de Machadinho.

Tabela 5.5 – Comparação dos coeficientes de descarga entre o modelo físico reduzido e numérico da UHE Machadinho.

abertura comporta [%]	UHE Machadinho	modelo numérico	desvio [%]
90	0,64	0,61	5,6
80	0,62	0,59	5,6
70	0,62	0,59	5,8
60	0,61	0,58	6,5
50	0,62	0,58	7,8
40	0,61	0,56	8,3
30	0,58	0,52	9,8
20	0,59	0,53	12,8
10	0,60	0,51	16,9

De maneira similar às comparações feitas à vazão, os erros apresentados pela tabela 5.5 possuem valor médio de 9%, com as maiores diferenças relacionadas as pequenas aberturas da comporta. A figura 5.4 apresenta de maneira gráfica os resultados da tabela 5.5.

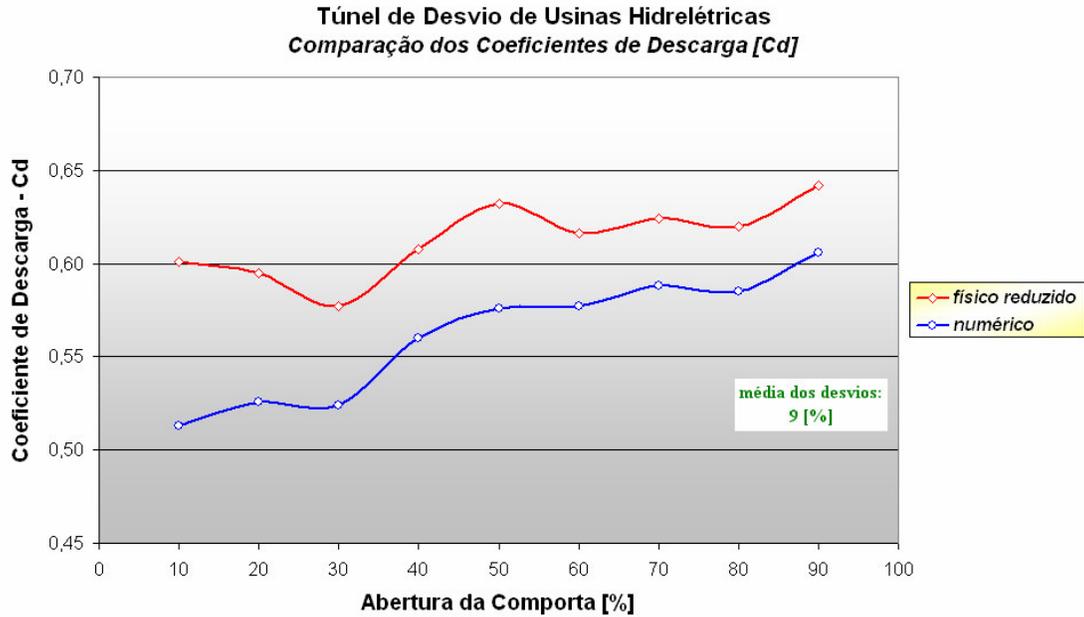


Figura 5.4 – Coeficiente de descarga em função da abertura da comporta do modelo físico reduzido e numérico tridimensional da UHE Machadinho.

5.3 – Pressões Atuantes no Fundo do Canal

A tabela 5.6 apresenta os resultados das pressões atuantes no fundo do canal, para as aberturas de 20, 40 e 70% da comporta vagão ensecadeira. Os resultados das medidas são baseados nas tomadas de pressão I1, I2, I3 e I4 (apresentadas na figura 3.21) do modelo físico reduzido, apresentado na tabela 3.7 e do modelo numérico, apresentado na tabela 4.6.

Tabela 5.6 – Pressões atuantes no fundo do canal para o modelo físico reduzido e numérico da UHE do Machadinho.

tomadas de pressão inferiores	abertura da comporta vagão ensecadeira					
	20 [%]		40 [%]		70 [%]	
	mod. fis.	mod. num.	mod. fis.	mod. num.	mod. fis.	mod. num.
	carga de pressão [m.c.H ₂ O]					
I1	20,43	19,18	19,65	19,15	19,20	18,81
I2	19,18	19,12	18,96	18,40	18,60	18,19
I3	18,63	17,96	18,00	17,39	18,15	17,70
I4	16,08	15,55	16,59	16,00	17,64	17,18

As figuras 5.5 a 5.7 representam de forma gráfica as pressões atuantes no protótipo com dados advindos do modelo físico reduzido e do modelo numérico. A tabela 5.7 contém as diferenças encontradas para cada tomada de pressão e sua respectiva abertura.

Tabela 5.7 – Comparação das diferenças entre os resultados das pressões atuantes no fundo do canal para o modelo físico reduzido e numérico da UHE Machadinho.

tomadas de pressão inferiores	abertura da comporta vagão ensecadeira		
	20 [%]	40 [%]	70 [%]
I1	3,08	2,54	2,03
I2	3,43	2,95	2,20
I3	3,60	3,39	2,48
I4	3,30	3,56	2,61

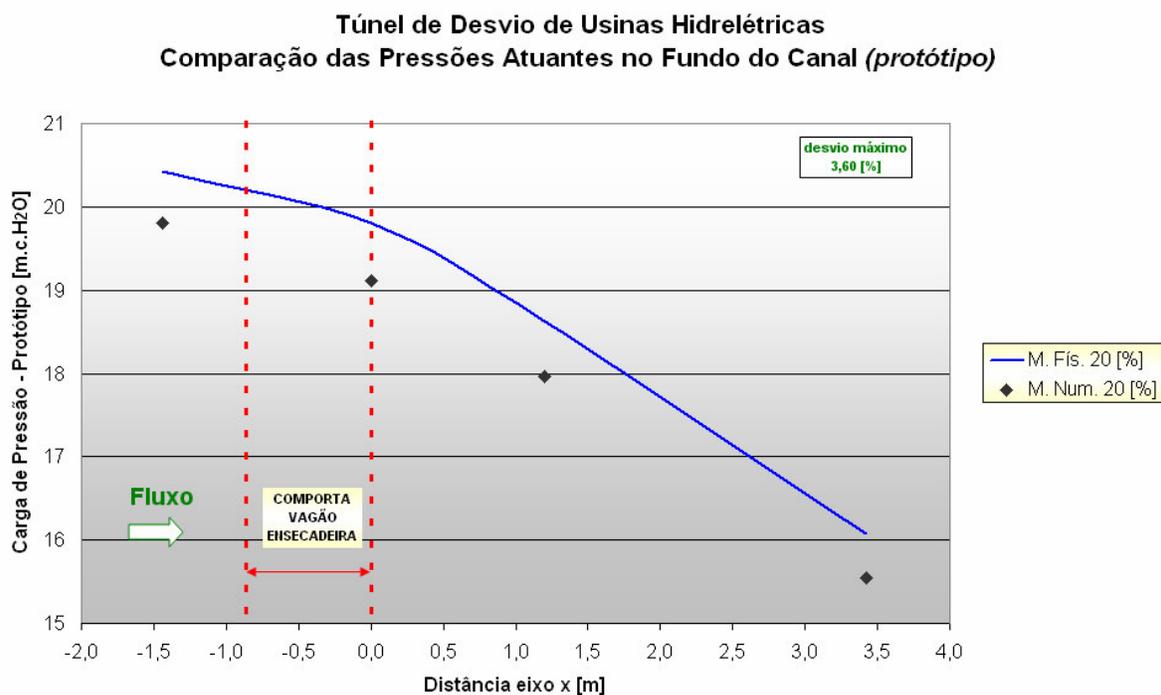


Figura 5.5 – Comparações das pressões atuantes no fundo do canal com abertura da comporta em 20%.

Túnel de Desvio de Usinas Hidrelétricas
Comparação das Pressões Atuantes no Fundo do Canal (protótipo)

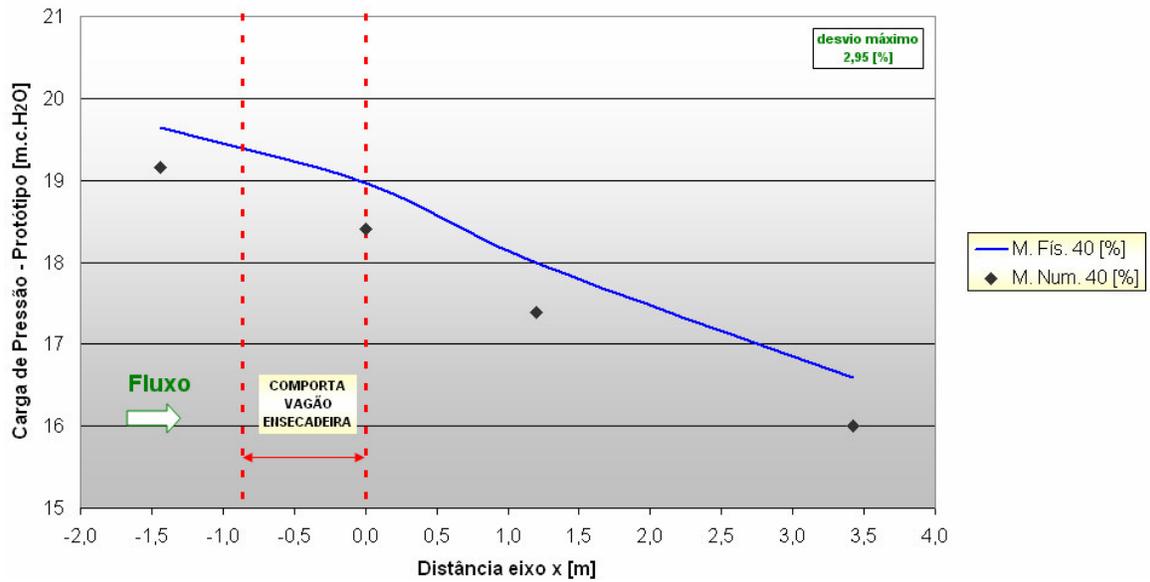


Figura 5.6 – Comparações das pressões atuantes no fundo do canal com abertura da comporta em 40%.

Túnel de Desvio de Usinas Hidrelétricas
Comparação das Pressões Atuantes no Fundo do Canal (protótipo)

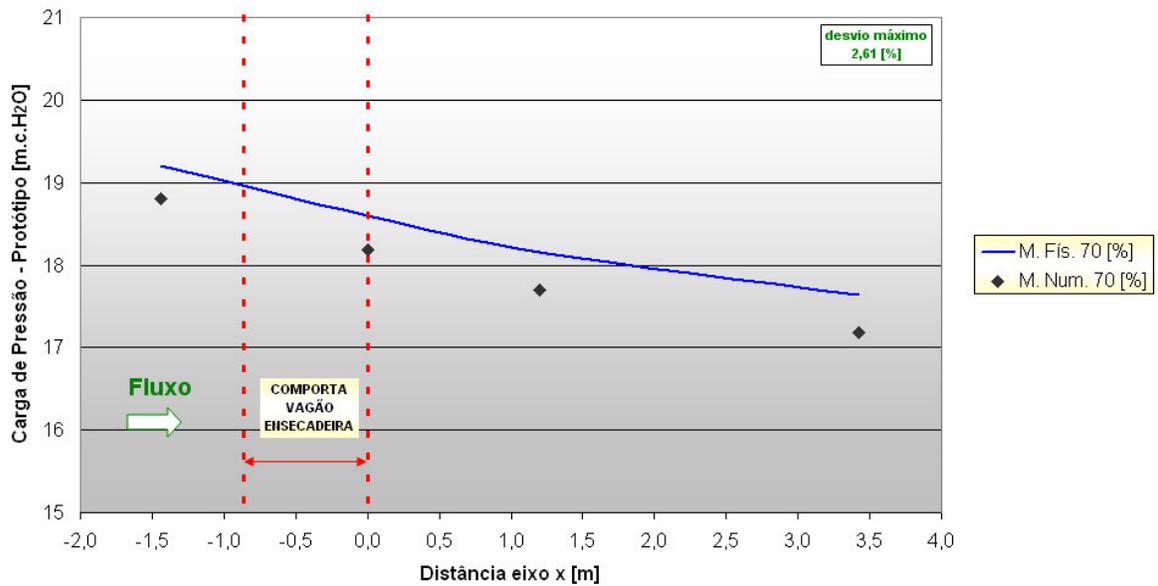


Figura 5.7 – Comparações das pressões atuantes no fundo do canal com abertura da comporta em 70%.

5.4 – Forças Hidrodinâmicas

O cálculo analítico das forças hidrodinâmicas atuantes em comportas tipo vagão é uma tarefa que exige uma série de considerações de ordem geométrica. Essas considerações são explicadas pelas inúmeras configurações adotadas na concepção do projeto, onde cada equipamento é dimensionado de acordo com as características da obra e de sua utilização.

Dessa maneira, nem sempre é possível encontrar diretamente nas tabelas e gráficos os valores correspondentes às incógnitas, como consequência, os resultados analíticos em geral apresentam valores mais conservadores ou ainda, necessitam de ensaios em modelo físico reduzido, para comprovação dos seus resultados.

Como exemplo de cálculo teórico, considerou-se a comporta vagão ensecadeira do túnel de desvio da UHE Machadinho, que está submetida a uma carga hidráulica (H) de 21 m.

A configuração geométrica do cutelo apresentado na figura 5.8 foi objeto de investigação, realizado através de ensaio físico em modelo reduzido pelo laboratório de hidráulica da empresa Bardella S.A. – Indústrias Mecânicas.

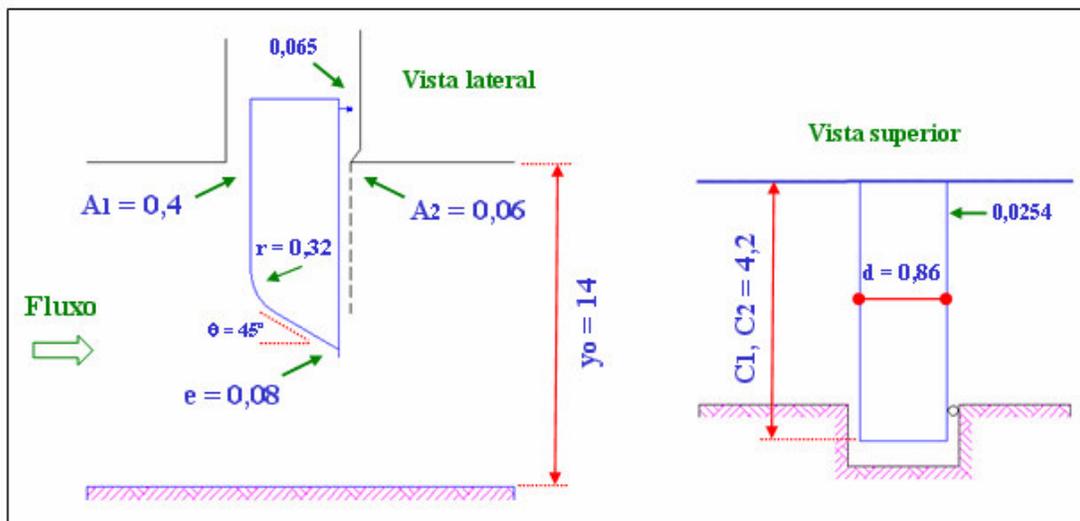


Figura 5.8 – Geometria considerada para o exemplo de aplicação, segundo relatório nº 80.8707.41_REV1 de propriedade da empresa Bardella S.A – Indústrias Mecânicas.

Inicialmente, calcula-se a posição crítica da comporta. Para isso, deve-se atribuir os devidos valores numéricos às equações (2.2) e (2.3), ficando respectivamente:

$$f_1(a) = 4,2^2 \cdot a^2 \cdot \left\{ 1 + \left(\frac{38,88}{4,2 \cdot 14} \right)^2 \cdot \left[0,6 \cdot \left(\frac{14}{a} - 1 \right)^2 \right] \right\}$$

onde:

$$S = \frac{789,23}{\sqrt{2 \cdot 9,81 \cdot 21}} = 38,88 \text{ [m}^2\text{]}$$

A tabela 5.8 apresenta os resultados da posição crítica da comporta, para cada abertura da comporta vagão ensecadeira

Tabela 5.8 – Cálculo da abertura crítica para a comporta vagão ensecadeira da UHE Machadinho.

abertura da comporta vagão ensecadeira		f ₁ (a)
[%]	y [m]	
100	14,0	3457
90	12,6	2810
80	11,2	2249
70	9,8	1776
60	8,4	1390
50	7,0	1091
40	5,6	880
30	4,2	756
20	2,8	719
10	1,4	769

A segunda etapa consiste em localizar a abertura crítica, atribuindo os valores numéricos a equação (2.4), resultando:

$$f_2(a_{\text{crítico}}) = 38,88^2 \cdot \frac{(14/2)}{21-14} = 1512$$

A figura 5.9 apresenta o gráfico com os resultados da tabela 5.8 e a localização da abertura crítica:

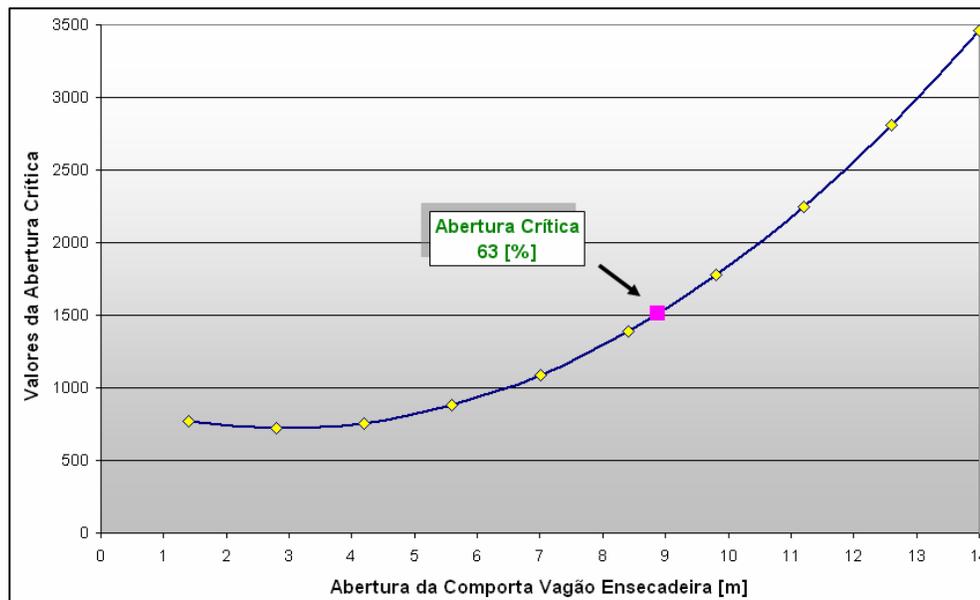


Figura 5.9 – Gráfico dos valores da abertura crítica e sua localização.

Para valores acima da abertura crítica, a equação (2.5) é aplicada para o novo cálculo da vazão e velocidades correspondentes, apresentados na tabela 5.9.

Tabela 5.9 – Cálculo da vazão e velocidade para a abertura crítica.

abertura da comporta vazão ensecadeira		Qc	Vc
[%]	y [m]	[m ³ /s]	[m/s]
100	14,0	789,20	8,05
90	12,6	787,92	8,93
80	11,2	782,81	9,98
70	9,8	770,84	11,24
60	8,4	746,86	12,70

Utilizando-se o método proposto por (NAUDASCHER, KOBUS e RAO, 1964) para o cálculo dos esforços hidrodinâmicos, inicia-se pelo cálculo do coeficiente \bar{K}_T , equação (2.13), com os devidos valores apresentados na figura 5.8. Considerando-se como iguais os coeficientes de descarga C_1 e C_2 , temos:

$$\bar{K}_T = \frac{1}{1 + \left(\frac{4,2 \cdot 0,06}{4,2 \cdot 0,4} \right)^2} = 0,98$$

Para o cálculo do coeficiente \bar{K}_B , apresentado na equação (2.14) e utilização dos gráficos apresentados nas figuras 2.10 a 2.13 são necessários alguns dados geométricos da comporta, como: r (raio) = 0,32 [m]; d (espessura) = 0,86 [m]; e (faca do cutelo) = 0,08 [m]; y_0 (altura livre) = 14 [m].

As relações geométricas necessárias são:

$$\frac{r}{d} = \frac{0,32}{0,86} = 0,37 \quad ; \quad \frac{e}{d} = \frac{0,08}{0,86} = 0,09 \quad ; \quad \frac{y_0}{d} = \frac{14}{0,86} = 16$$

Para continuidade do cálculo e adequação aos gráficos, as relações geométricas calculadas necessitam das seguintes considerações:

$$r / d = 0,4 \quad ; \quad e / d = 0 \quad ; \quad y_0 / d = 6$$

Os valores de \bar{K}_B com as últimas considerações geométricas e sabendo-se que o cutelo da comporta apresenta inclinação de 45°, podem ser obtidos através do gráfico apresentado na figura 2.10. Os valores estão indicados na tabela 5.10.

Tabela 5.10 – Valores de \bar{K}_B para UHE Machadinho.

Y / Y ₀	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
\bar{K}_B	0,79	0,65	0,58	0,55	0,53	0,55	0,56	0,58	0,54

Cálculo da Força D_{P1}, através da equação (2.12) e considerando-se $\gamma = 1$ [tf/m³].

Exemplo para 50 [%] de abertura:

$$D_{P1} = (0,98 - 0,53) \cdot 4,2 \cdot 0,86 \cdot 1 \cdot \frac{18,53^2}{2 \cdot 9,81} \rightarrow 28,32 \text{ [tf]}$$

A força D_{P2}, equação (2.15) trata da atuação da vedação superior. Em razão da existência de um recesso na parede vertical de jusante, sua correspondente força é considerada apenas na primeira abertura da comporta.

Exemplo para 10 [%] de abertura:

$$D_{P2} = 0,98 \cdot (4,2 \cdot 0,065) \cdot 1 \cdot \frac{19,95^2}{2 \cdot 9,81} \rightarrow 5,42 \text{ [tf]}$$

O cálculo da força D_{P3} é realizado de acordo com a equação (2.16).

Exemplo para 50 [%] de abertura:

$$D_{P3} = 0,98 \cdot 0,0254 \cdot 1 \cdot \frac{18,53^2}{2 \cdot 9,81} \rightarrow 1,83 \text{ [tf]}$$

A tabela 5.11 apresenta os valores das forças hidrodinâmicas atuantes na comporta vagão ensecadeira calculadas pelo método de (NAUDASCHER, KOBUS e RAO, 1964), onde os valores das velocidades estão apresentados na tabelas 5.1 e 5.9.

Tabela 5.11 – Valores da força hidrodinâmicas atuantes na UHE Machadinho.

Y / Y_0	K_B	V [m/s]	D_{P1} [tf]	D_{P2} [tf]	D_{P3} [tf]	$F_h = \sum(D_P)$ [tf]
0,1	0,79	19,95	13,77	5,42	2,12	21,31
0,2	0,65	19,61	23,22	0	2,04	25,27
0,3	0,58	19,25	27,15	0	1,97	29,12
0,4	0,55	18,89	28,12	0	1,90	30,01
0,5	0,53	18,53	28,32	0	1,83	30,14
0,6	0,55	12,70	12,71	0	0,86	13,57
0,7	0,56	11,24	9,72	0	0,67	10,39
0,8	0,58	9,98	7,30	0	0,53	7,83
0,9	0,54	8,93	6,43	0	0,42	6,85

Outra alternativa para a obtenção dos valores teóricos das forças hidrodinâmicas na comporta vagão ensecadeira, é a utilização do método proposto por (KNAPP, 1960).

Atribuindo valores numéricos, apresentados na figura 5.8 à equação (2.10) para comportas com soleira horizontal, a espessura equivalente é calculada como:

$$T_e = \frac{(0,86 + 0,0254) \cdot y}{(0,86 + 0,0254) \cdot 1 + y}$$

onde: y é a abertura da comporta em metros

A tabela 5.12 apresenta os resultados da espessura equivalente para a UHE Machadinho.

Tabela 5.12 – Cálculo da espessura equivalente pelo método de Knapp, para a UHE Machadinho.

abertura da comporta vagão ensecadeira		Te [m]
[%]	y [m]	
90	12,6	0,83
80	11,2	0,82
70	9,8	0,81
60	8,4	0,80
50	7,0	0,79
40	5,6	0,76
30	4,2	0,73
20	2,8	0,67
10	1,4	0,54

O esforço hidrodinâmico é calculado através da equação (2.6), considerando-se: $\gamma = 1 \text{ [tf/m}^3\text{]}$.

Exemplo para 50 [%] de abertura, utilizando-se as velocidades apresentadas na tabela 5.11.

$$S_v = 1 \cdot 4,2 \cdot \left(\frac{18,53^2}{2 \cdot 9,81} \right) \cdot 0,79 \rightarrow 57,77 \text{ [tf]}$$

A tabela 5.13 apresenta os resultados dos esforços hidrodinâmicos para a UHE Machadinho.

Tabela 5.13 – Cálculo dos esforços hidrodinâmicos pelo método de KNAPP para a UHE Machadinho.

abertura da comporta y [m]	largura livre [m]	V [m/s]	Te [m]	S _v [tf]
12,6	4,2	19,95	0,83	14,12
11,2	4,2	19,61	0,82	17,49
9,8	4,2	19,25	0,81	21,96
8,4	4,2	18,89	0,80	27,66
7,0	4,2	18,53	0,79	57,77
5,6	4,2	12,70	0,76	58,40
4,2	4,2	11,24	0,73	58,01
2,8	4,2	9,98	0,67	55,38
1,4	4,2	8,93	0,54	46,21

A figura 5.10, mostra de forma gráfica, os esforços da UHE Machadinho, calculadas pelo método teórico de Naudascher e Knapp.

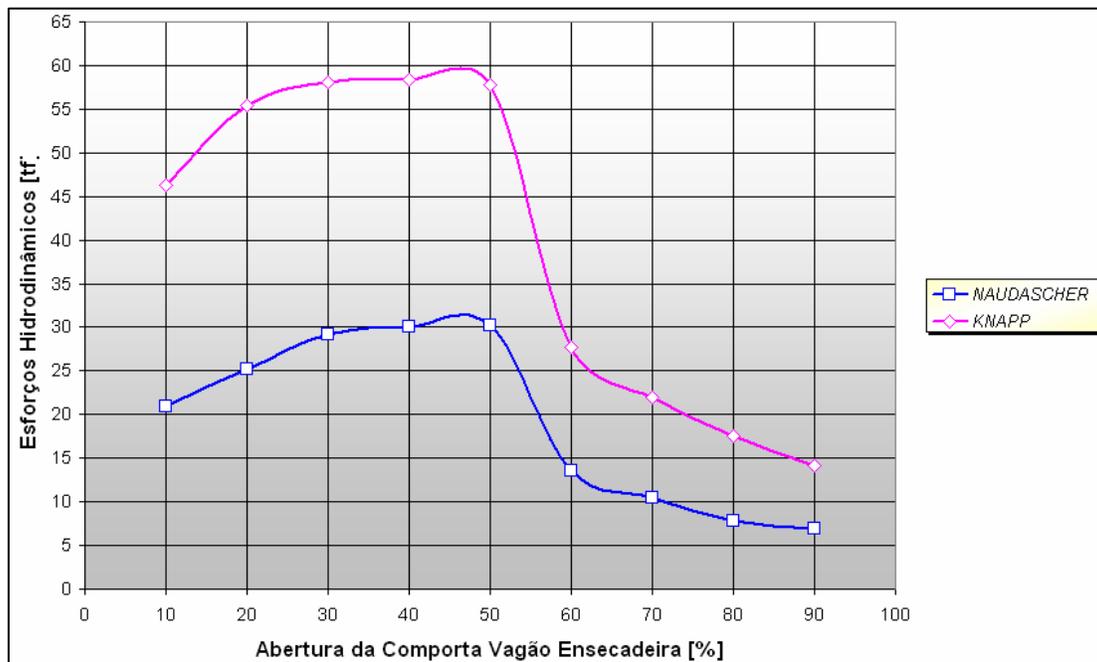


Figura 5.10 – Valores dos esforços hidrodinâmicos calculados segundo formulação de Naudascher e Knapp.

Comparando-se os resultados teóricos apresentados nas tabelas 5.11 e 5.13, verifica-se que o método teórico proposto por Knapp resulta em valores duas vezes maiores do que o método apresentado por Naudascher.

É fato que o método de Knapp apresenta maior simplicidade em seus cálculos, gerando resultados mais conservadores, mesmo assim é uma ferramenta útil considerando-se as limitadas opções disponíveis para a realização dos cálculos teóricos.

Independente do valor da força hidrodinâmica apresentada pelos métodos, constata-se que os maiores esforços atuam nas aberturas de 30 a 50%. Essa faixa de atuação dos esforços, também pode ser observada na figura 2.20, que apresenta os esforços hidrodinâmicos de quatro ensaios realizados através de modelo físico reduzido. A exceção é a UHE Capanda, onde a faixa de atuação dos esforços está entre 25 e 35% de abertura da comporta vagão ensecadeira.

A tabela 5.14 apresenta os resultados teóricos dos esforços hidrodinâmicos, juntamente com os resultados obtidos em modelo físico reduzido, apresentado na tabela 3.8.

Tabela 5.14 – Valor dos esforços hidráulicos pelos métodos teóricos e modelo físico reduzido da UHE Machadinho.

abertura da comporta vagão [%]	modelos teóricos		modelo físico reduzido [tf]
	Naudascher [tf]	Knapp [tf]	
100	-	-	0
90	6,85	14,12	7,47
80	7,83	17,49	16,74
70	10,39	21,96	28,08
60	13,57	27,66	37,98
50	30,14	57,77	44,19
40	30,01	58,40	47,61
30	29,12	58,01	45,27
20	25,27	55,38	35,91
10	21,31	46,21	22,41
0	-	-	0

A figura 5.11, mostra de forma gráfica os resultados apresentados na tabela 5.14.

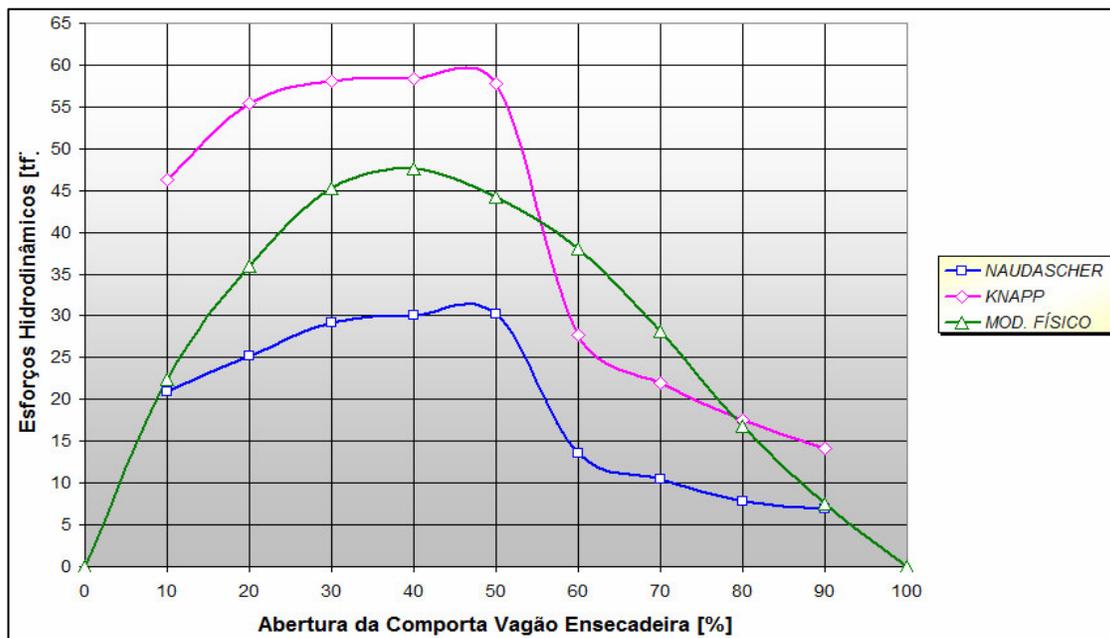


Figura 5.11 – Comparação dos esforços hidrodinâmicos calculados através dos métodos teóricos e modelo físico reduzido da UHE Machadinho.

A observação da figura 5.11 mostra que os resultados dos esforços hidrodinâmicos, advindos do modelo físico reduzido, para aberturas de 20 a 50% da comporta vagão ensecadeira, estão em uma faixa intermediária em relação aos cálculos teóricos. Para as aberturas acima de 50% da comporta os resultados do modelo físico apresentam aspecto mais harmonioso.

A força hidrodinâmica máxima do modelo físico está relacionada a abertura de 40% da comporta vagão ensecadeira. Dessa forma, para os modelos estudados no presente trabalho, indica-se que as maiores forças atuantes nas comportas ensecadeiras dos túneis de desvio estão em uma faixa de 25 a 50%, com tendência de pico em 40%.

A tabela 5.15 apresenta a comparação dos resultados dos esforços hidrodinâmicos do modelo físico reduzido e do modelo numérico, apresentado na tabela 4.7.

Tabela 5.15 – Comparação dos esforços hidráulicos do modelo físico reduzido e modelo numérico da UHE Machadinho.

abertura da comporta vagão [%]	modelo físico reduzido [tf]	modelo numérico 3D [tf]	desvio [%]
100	0	-1,35	-
90	7,47	6,75	9,6
80	16,74	18,63	-11,3
70	28,08	30,78	-9,6
60	37,98	40,5	-6,6
50	44,19	45,9	-3,9
40	47,61	48,33	-1,5
30	45,27	43,47	4,0
20	35,91	32,67	9,0
10	22,41	19,98	10,8
0	0	0	0

A figura 5.12, mostra de forma gráfica os resultados apresentados na tabela 5.15.

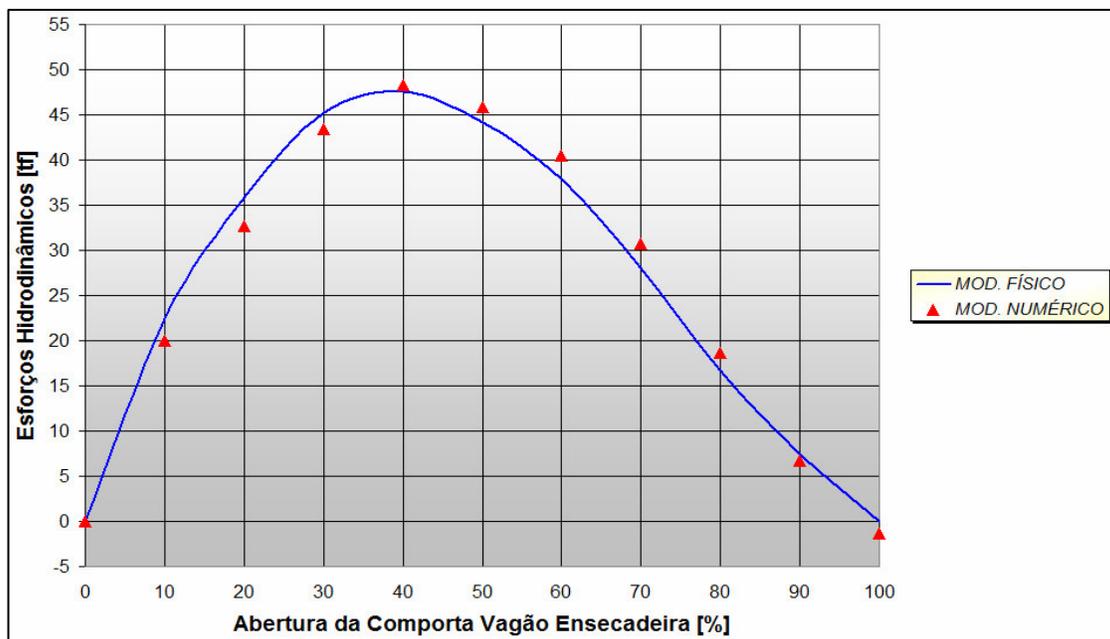


Figura 5.12 – Comparação dos esforços hidrodinâmicos calculados através do modelo físico reduzido e modelo numérico da UHE Machadinho.

A observação dos dados apresentados na tabela 5.15 e figura 5.12 mostram que o modelo numérico reproduziu a curva dos esforços hidrodinâmicos do modelo físico reduzido.

A média das diferenças entre os valores é de aproximadamente 7%, dentro de uma faixa aceitável, levando-se em consideração a dificuldade para a correta interpretação das forças hidrodinâmicas.

CAPÍTULO 6

CONCLUSÕES E SUGESTÕES

O presente trabalho demonstrou a possibilidade de utilização de um pacote comercial de CFD, para reprodução dos esforços hidrodinâmicos atuantes em comportas tipo vagão ensecadeira, de usinas hidrelétricas instaladas no interior de túneis de desvio, escavado em rocha.

Os resultados dos modelos numéricos tridimensionais, gerados para cada abertura da comporta vagão ensecadeira, reproduziram os fenômenos hidráulicos observado em laboratório. Seus resultados quando confrontados, apresentaram diferença de 8% para a vazão e coeficiente de descarga, e 7% para força hidrodinâmica.

As diferenças apresentadas se encontram em uma faixa aceitável, pois ensaios em modelos físicos, reconhecidos pela geração de resultados mais confiáveis, possuem erros implícitos como perda de carga na entrada do reservatório de montante, rugosidade dos materiais aplicados ou mesmo tolerância geométricas.

A confiabilidade da metodologia numérica aplicada permite a extrapolação para outros ensaios de túneis de desvio, tendo logicamente atenção para as características hidráulicas e geométricas do protótipo.

A utilização de modelos numéricos para esse fim é mais uma importante ferramenta para a engenharia, refletindo diretamente nos projetos, reduzindo custos, na determinação do mecanismo de levantamento quanto na redução significativa de ensaios em laboratório, proporcionando também maior rapidez na análise dos resultados.

Algumas recomendações para futuras investigações podem ser atribuídas ao presente trabalho, inicialmente deve-se buscar a exploração do próprio modelo, introduzindo a análise transiente com utilização de duas fases (água e ar), tomando-se as devidas precauções para que o tempo computacional não seja proibitivo. A exploração dos modelos de turbulência oferecidos pelo pacote computacional é outro ponto interessante, a idéia é confrontar os resultados para se estabelecer qual modelo traria respostas mais rápidas e tão eficientes quanto às apresentadas.

Outros pacotes computacionais, que utilizam a técnica de CFD, como por exemplo: CFX[®], openFOAM[®], e Numeca[®], podem ser utilizados para reprodução do presente trabalho, assim como explorar recursos adicionais oferecidos entre os pacotes.

Outro ponto de interesse é utilizar a metodologia numérica adotada para estudo de outros equipamentos hidrodinâmicos presentes em usinas hidrelétricas, como por exemplo: a comporta vagão da tomada d'água ou a comporta segmento do vertedouro.

A tomada d'água é o equipamento responsável pela condução da massa de água do reservatório até a turbina, possuindo características semelhantes ao presente estudo, o vertedouro é o equipamento responsável pelo controle do nível d'água do reservatório de montante, onde a comporta em alguns casos sofre esforços hidrodinâmicos devido a elevados níveis d'água de jusante para montante.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT, **Associação Brasileira de Normas Técnicas**. Norma Brasileira, 8833 – 2008.

BARDELLA S.A. INDÚSTRIAS MECÂNICAS. **Túnel de Desvio da UHE Itá, Relatório de Ensaio em Modelo Físico** nº DT – 01.188.12/80, 1997.

BARDELLA S.A. INDÚSTRIAS MECÂNICAS. **Túnel de Desvio da UHE Machadinho, Relatório de Ensaio em Modelo Físico** nº 80.8707.41_REV.1, 1999.

CEBECCI, T.; Hirsh, R.S.; Keller, H. B.; Willians, P. G., **Studies of Numerical Methods for Plane Navier-Stokes Equations**, Comp. Meth. in App. Mech and Eng., Vol. 27, 1981.

Centro Tecnológico de Hidráulica (CTH), CAPANDA – **Complexo Hidrelétrico Túnel de Desvio – Comporta Vagão – Estudo em Modelo Reduzido** – Escala 1:25, 3 Volumes, Catalogação RT00470, 71 e 72, 1988.

Centro Tecnológico de Hidráulica (CTH), Itaparica – **Complexo Hidrelétrico Túnel de Desvio – Comporta Vagão – Estudo em Modelo Reduzido** – Escala 1:28, 1 Volume, Catalogação RT08683, 1982.

ERBISTI, P. C. F. **Comportas Hidráulicas**. 2ª ed. Rio de Janeiro, 2002.

FLUENT 6.1., **User's Guide, Fluent Inc.**, 2003.

- Fox R. W. and McDonald A. T., 1995, **Introdução a Mecânica dos Fluidos**, Livros Técnicos e Científicos S.A.. Rio de Janeiro.
- HOLMAN, J. P., **Heat Transfer**, 4th Ed., McGraw-Hill Book Co., New York, NY, 1976.
- INCROPERA, F. P.; DEWITT, D. P., **Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa**, 4rd edição, Rio de Janeiro, LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 1998.
- KANNAP, F. H., **Ausfluss, Überfall und Durchfluss im Wasserbau**, Verlag G. Braun, Karlsruhe, 1960.
- LAUNDER, B. E.; SPALDING, D. B. **Lectures in Mathematical Models of Turbulence**. Academic Press, London, England. 1972.
- MALISKA, C. R.; **Transferência de Calor e Mecânica dos Fluidos Computacional**, LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., Rio de Janeiro, 1995.
- MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. EPE, Empresa de Pesquisa Energética. BEN, **Balço Energético Nacional**, 2009.
- MOTTA, Victor Freire. **Curso de teoria da semelhança**. Porto Alegre, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1972.
- MURRAY, R. I. e SIMMONS, W. P., **Hydraulic Downpull Forces on Large Gates**, U. S. Dept. of the Interior, Bureau of Reclamation, Research Report n^a 4, 1966.
- NAUDASCHER, E., KOBUS, H. E. e RAO, R. P., **Hydrodynamic Analysis for High-Head Leaf Gates**, Paper n^o 3904, Journal of the Hydraulics Division, Proceedings of ASCE, vol. 90, HY3, maio 1964.
- PATANKAR, S. V.; **Numerical Prediction of Tree-dimensional Flows**, in Studies in Convection: Theory Measurement and Applications. Academic Press, London, Vol. 1, 1975.

PATANKAR, S. V.; SPALDING, D. B., **A calculation Procedure for Heat, Mass and Momentum Transfer in Tree-dimensional Parabolic Flows**, Int. J. Heat Mass Transfer, Vol 15, 1972.

RAJARATNAM, N., **Practical Problems on Sluice-Gate Flow**, Water Power, March 1969.

SAGAR, B. T. A. e TULLIS, J. P., **Downpull on Vertical Lift Gates**, Water Power and Dam Construction, dezembro 1979.

SAGAR, B. T. A., **Downpull in High-Head Gate Installations**, Water Power and Dam Construction, março 1977.

SCHLICHTING, H., **Boundary Layer Theory**, 7th ed., McGraw-Hill, New York., 1979.

SCHREIBER, Gerhard Paul. **Usinas Hidrelétricas**. São Paulo, Edgard Blüncher; Rio de Janeiro, ENGEVIX, 1987.

TENNEKES, H., LUMLEY, J. L., **A First Course in Turbulence**, MIT Press, Cambridge, MA, 1972.

U.S. ARMY CORPS OF ENGINEERS, **Hydraulic Design Criteria**, Hydraulic Design Chart 320- 2, 320-2/1, 320-2/2, 1961.

U.S. ARMY CORPS OF ENGINEERS, **Hydraulic Design of Reservoir Outlet Structures**, Manual EM 1110-2-1602, 1963.

VERTEEG, H. K.; MALALASEKERA, W., **A Introduction to Computational Fluid Dynamics** – The Volume Methods, Addison Wesley Longman Ltda, 1995.

WHITE, F. M., **Mecânica dos Fluidos**, Livro. p. 570. 1999.

ANEXO I

MECÂNICA DOS FLUIDOS

A mecânica dos fluidos estuda os fenômenos que ocorrem em meios fluidos, procurando estabelecer métodos que tomem por base os princípios gerais da física, e que sejam consistentes com resultados de modernas técnicas experimentais. O desenvolvimento da mecânica dos fluidos foi iniciado antes de Cristo, e até a época do Renascimento as aplicações sem o perfeito conhecimento do comportamento dos fenômenos observados, eram consideradas mais arte do que ciência.

O conhecimento e a compreensão da mecânica dos fluidos são essenciais para a análise de qualquer sistema no qual o fluido é um meio operante. São muitos os campos de aplicação, como por exemplo: construção de máquinas, meteorologia, acústica, transporte, agricultura, medicina, produção de energia, etc.

I.1 – Equações Representativas dos escoamentos

O escoamento de um fluido é causado por ações de forças externas como o gradiente de pressão, a gravidade, as tensões de cisalhamento, a rotação e a tensão superficial. É representado por um modelo matemático que busca a obtenção de soluções para problemas físicos.

Considerando-se a hipótese (figura I.1) do contínuo, onde cada propriedade do fluido é considerada como tendo um valor definido em cada ponto no espaço; e que o fluido analisado em questão seja Newtoniano, as expressões matemáticas que regem o escoamento, de acordo com as leis da conservação da física, determinam:

- a massa do fluido é conservada
- a taxa de variação da quantidade de movimento é igual a soma das forças atuando na partícula fluida
- a taxa de variação de energia é igual a soma da taxa adicional de calor e a taxa de trabalho realizada na partícula

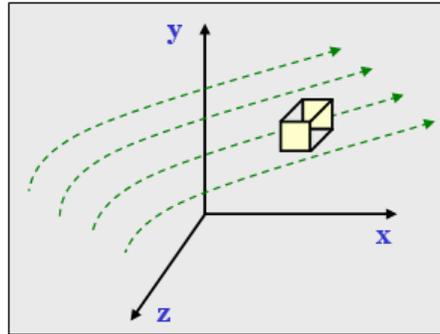


Figura I.1 – Volume de controle para balanços de massa e de quantidade de movimento

- Conservação da massa:

$$\underbrace{\frac{\partial \rho}{\partial t}}_{\text{taxa de variação da massa no volume considerado}} + \underbrace{\nabla \cdot (\rho \vec{u})}_{\text{fluxo líquido de massa através da superfície do volume considerado}} = 0 \quad (\text{I.1})$$

onde: \vec{u} é o vetor velocidade

- Conservação da quantidade de movimento (Equações de Navier-Stokes):

$$m\vec{a} = F_{\text{superfície}} + F_{\text{corpo}} \quad \text{onde:} \quad \vec{a} = \frac{D\vec{u}}{Dt} = \frac{\partial(\vec{u})}{\partial t} + (\vec{u} \cdot \nabla)(\vec{u}) \quad (\text{I.2})$$

onde: \vec{a} = aceleração, F = força e m = massa

Para hipótese de escoamentos incompressíveis e propriedades físicas constantes, obtém-se:

$$\underbrace{\frac{\partial \vec{u}}{\partial t}}_{\text{taxa de variação da quantidade de movimento}} + \underbrace{(\vec{u} \cdot \nabla)\vec{u}}_{\text{fluxo convectivo da quantidade de movimento}} = \underbrace{-\frac{1}{\rho} \nabla p}_{\text{força resultante devido ao gradiente de pressão}} + \underbrace{\nu \cdot \nabla^2 \vec{u}}_{\text{fluxo líquido difusivo da quantidade de movimento ou dissipação de energia cinética dependendo das escalares analisadas}} + \underbrace{\vec{g}}_{\text{vetor da aceleração da gravidade}} \quad (\text{I.3})$$

onde: p = pressão, ν = viscosidade cinemática e \vec{g} = vetor da aceleração da gravidade

O termo relativo ao escoamento líquido convectivo de quantidade de movimento, também expressa as interações não lineares entre as diversas escalas que compõe o espectro de energia típico do escoamento.

– Conservação da energia:

$$\underbrace{\frac{\partial T}{\partial t}}_{\text{taxa de acúmulo de energia interna no volume considerado}} + \underbrace{(\bar{u} \cdot \nabla)T}_{\text{fluxo líquido convectivo de energia interna}} = \underbrace{\alpha \nabla^2 T}_{\text{fluxo líquido difusivo de energia interna}} + \underbrace{\phi_e}_{\text{termo fonte de energia interna devido a dissipação de energia interna}} \quad (\text{I.4})$$

onde: T = temperatura, α = condutividade térmica e ϕ_e = termo fonte de energia

I.2 – Turbulência

O efeito da turbulência pode ser observado em escoamentos que possuem altas velocidades, onde as forças inerciais se sobrepõem às forças viscosas, resultando na instabilidade do escoamento e variação caótica de suas propriedades.

De uma forma geral, os escoamentos encontrados na engenharia tornam-se instáveis a partir de um determinado valor do número de Reynolds.

$$Re = \frac{U_C \cdot L}{\nu} \quad (\text{I.5})$$

onde: U_C = velocidade característica, L = comprimento do escoamento e ν = viscosidade cinemática

O valor do número de Reynolds representa uma medida relativa das forças inerciais e viscosas, possuindo um valor crítico que possibilita a classificação do escoamento como laminar ou turbulento.

$$\underbrace{Re < Re_{\text{crítico}}}_{\text{escoamento laminar}} ; \underbrace{Re > Re_{\text{crítico}}}_{\text{escoamento turbulento}} \quad (\text{I.6})$$

Nos escoamentos classificados como laminar, as camadas adjacentes de fluido deslizam uma sobre as outras; nos escoamentos classificados como turbulentos o mesmo se dá de maneira caótica, e suas propriedades como pressão e velocidade possuem uma variação no tempo, ao longo da região de escoamento.

Para a engenharia, é suficiente a análise do escoamento laminar e turbulento pois existe uma região de transição entre os escoamentos denominada de instabilidade hidrodinâmica. Essa região não possui ainda uma teoria solidificada, e por essa razão, não é abordado em problemas usuais.

A região de transição entre o escoamento laminar e turbulento é:

$$2000 < \underbrace{Re}_{\text{região de transição}} < 10^5 \quad (\text{I.7})$$

Modificam-se as equações básicas de Navier-Stokes, para representação da variação instantânea, como uma composição média da variável. Essas novas equações do escoamento médio possuem, adicionalmente, os termos dos produtos das flutuações das velocidades em diferentes regiões.

$$u = \bar{u} + u' \quad ; \quad v = \bar{v} + v' \quad ; \quad w = \bar{w} + w' \quad (\text{I.8})$$

A componente média é dada por:

$$\bar{u} = \frac{1}{\Delta t} \int_t^{t+\Delta t} \bar{u} \, dt \quad ; \quad \bar{v} = \frac{1}{\Delta t} \int_t^{t+\Delta t} \bar{v} \, dt \quad \text{e} \quad \bar{w} = \frac{1}{\Delta t} \int_t^{t+\Delta t} \bar{w} \, dt \quad (\text{I.9})$$

A turbulência associada à energia cinética turbulenta k (por unidade de massa), é definida por:

$$k = \frac{1}{2} \left(\overline{u'^2} + \overline{v'^2} + \overline{w'^2} \right) \quad (\text{I.10})$$

As equações (I.11 a I.13) representam as equações de Reynolds para um escoamento turbulento e incompressível.

– Conservação da massa:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \bar{\mathbf{u}}) = 0 \quad (\text{I.11})$$

– Conservação da quantidade de movimento:

$$\frac{\partial (\rho \bar{\mathbf{u}})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \bar{\mathbf{u}} \times \bar{\mathbf{u}}) = \nabla \cdot (\boldsymbol{\tau} - \overline{\rho \mathbf{u}' \times \mathbf{u}'}) + \mathbf{S}_M \quad (\text{I.12})$$

onde: $\boldsymbol{\tau} = \mu \nabla \bar{\mathbf{u}}$ = tensor de tensões, \mathbf{S}_M = termo fonte (equação de momento)

– Conservação da energia:

$$\frac{\partial (\rho \bar{\phi}_t)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \bar{\phi}_t \mathbf{u}) = \nabla \cdot (\Gamma \nabla \bar{\phi}_t - \overline{\rho \phi_t' \mathbf{u}'}) + \mathbf{S}_\phi \quad (\text{I.13})$$

onde: $\bar{\phi}_t$ = variável transportada, Γ = difusividade e \mathbf{S}_ϕ = termo fonte (equação de transporte)

I.3 – Modelo k-ε

A modelagem de escoamentos turbulentos é um recurso computacional utilizado para o fechamento das equações do escoamento médio; pois os mesmos são caracterizados por campos flutuantes de velocidade. Para a engenharia hidrodinâmica, é um recurso necessário para o cálculo dos diversos tipos de problemas.

Desenvolvido por Launder e Spalding (1972), o modelo k-ε é baseado na teoria da existência de uma analogia entre a ação da tensão de Reynolds e da tensão viscosa no escoamento médio.

Para um fluido incompressível, temos:

$$\tau_{ij} = \mu e_{ij} = \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (\text{I.14})$$

Com a finalidade de simplificação das equações, serão utilizadas as seguintes notações de sufixo: i ou $j = 1$ (direções em x), $j = 2$ (direção y) e $j = 3$ (direção z); sendo assim, a equação (I.14) pode ser apresentada da seguinte forma:

$$\tau_{12} = \mu \left(\frac{\partial u_1}{\partial x_2} + \frac{\partial u_2}{\partial x_1} \right) \quad (\text{I.15})$$

A relação entre a tensão de Reynolds e a taxa média de deformação, Boussinesq (1877).

$$\tau_{ij} = -\rho \overline{u'_i u'_j} = \mu_t \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \quad (\text{I.16})$$

A equação (I.16) mostra que o transporte do momento turbulento é assumido como proporcional à média do gradiente de velocidade. Por analogia, o transporte de um escalar é proporcional ao valor médio da quantidade transportada.

$$-\rho \overline{u'_i \phi} = \Gamma_t \frac{\partial \bar{\phi}}{\partial x_i} \quad (\text{I.17})$$

onde: Γ_t é a difusibilidade turbulenta.

O modelo k - ϵ assume que a viscosidade turbulenta μ_t é isotrópica, ou seja, a razão entre a tensão de Reynolds e a taxa de deformação é constante em todas as direções. A energia cinética média e a instantânea são dadas por:

$$\bar{k} = \frac{1}{2} \left(\overline{u^2} + \overline{v^2} + \overline{w^2} \right) \quad ; \quad k = \frac{1}{2} \left(u'^2 + v'^2 + w'^2 \right) \quad (\text{I.18})$$

A dissipação de energia cinética turbulenta ϵ é causada pelo trabalho realizado pelos vórtices de pequenas escalas contra a tensão viscosa. A taxa de dissipação por unidade de massa é de extrema importância no estudo da dinâmica da turbulência e é escrito como:

$$\epsilon = 2\nu \overline{e'_{ij} \cdot e'_{ij}} \quad (\text{I.19})$$

É possível desenvolver equações de transporte similares para todas as propriedades de turbulência, incluindo a taxa de dissipação ε . A equação exata de ε , no entanto, apresenta vários termos desconhecidos. O modelo padrão k - ε apresenta duas equações, uma para k e outra para ε , que são utilizadas para definir a escala de velocidade \mathfrak{G} e a escala de comprimento ℓ , como seguem:

$$\mathfrak{G} = k^{1/2} \quad ; \quad \ell = \frac{k^{3/2}}{\varepsilon} \quad (\text{I.20})$$

O modelo de comprimento de mistura assume a viscosidade cinemática turbulenta (m^2/s) como um produto da escala de velocidade turbulenta \mathfrak{G} (m/s) pela escala de comprimento ℓ (m):

$$\mu_t = C_a \mathfrak{G} \ell \quad (\text{I.21})$$

onde: C_a é uma constante adimensional, sendo assim, a viscosidade turbulenta, resulta em:

$$\mu_t = C_a \mathfrak{G} \ell = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (\text{I.22})$$

Os modelos k - ε são obtidos pelo produto das equações de Reynolds, obtendo-se:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \text{div}(\rho k \bar{u}_r) = -\text{div} \left[\frac{\mu_t}{\sigma_k} \text{grad } k \right] + 2\mu_t E_{ij} \cdot E_{ij} - \rho \varepsilon \quad (\text{I.23})$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \text{div}(\rho \varepsilon \bar{u}_r) = -\text{div} \left[\frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \text{grad } \varepsilon \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} 2\mu_t E_{ij} \cdot E_{ij} - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (\text{I.24})$$

As equações (I.23 e I.24) mostram no lado esquerdo a taxa de variação e o termo convectivo; no lado direito, observam-se o transporte por difusão, a taxa de produção e a taxa de dissipação.

As equações k-ε (padrão) apresentam cinco constantes empíricas, C_μ , σ_k , σ_ϵ , $C_{1\epsilon}$ e $C_{2\epsilon}$, que são apresentadas na tabela I.1.

Tabela I.1 – Coeficientes do modelo k-ε de turbulência

C_μ	σ_k	σ_ϵ	$C_{1\epsilon}$	$C_{2\epsilon}$
0,09	1,00	1,30	1,44	1,92

I.4 – Função de Parede

As características de um escoamento turbulento possuem diferentes abordagens, quando analisados próximos a uma parede sólida. A partir de uma determinada distância y da parede, o escoamento sofre o efeito das forças inerciais, porém; o valor do número de Reynolds (I.5) próximo à parede diminui, prevalecendo os efeitos das forças viscosas.

A análise da velocidade média da região possui as seguintes dependências:

- distância da parede sólida (y)
- densidade do fluido (ρ)
- viscosidade do fluido (ν)
- tensão de cisalhamento da parede (τ_w)

A análise dimensional demonstrada por Schlichting (1979) resulta na seguinte expressão:

$$u^+ = \frac{U}{u_\tau} = f\left(\frac{\rho u_\tau y}{\mu}\right) = f(y^+) \quad (I.25)$$

A equação (I.25) é conhecida como lei de parede na qual se apresenta dois adimensionais; a velocidade u^+ e y^+ . Para escoamentos com alto número de Reynolds, o modelo k-ε (padrão) apresentado por Launder e Spalding (1972), não realiza nas proximidades da parede as integrações das equações de Navier-Stokes, para essa região utiliza a lei exponencial.

Fora da camada viscosa, onde a velocidade média está localizada em um ponto y^+ , sendo $30 < y^+ < 60$, satisfaz-se a lei logarítmica da seguinte maneira:

$$u^+ = \frac{1}{\kappa_v} \ln y^+ + B = \frac{1}{\kappa_v} \ln(E_w y^+) \quad (\text{I.26})$$

onde: u^+ é a velocidade próxima à parede, y^+ é a distância adimensional, denotada por:

$$y^+ = \frac{\rho C_\mu^{1/4} \kappa_v^{1/2} y}{\mu} \quad (\text{I.27})$$

onde: as constantes empíricas de von Kármán (κ_v), e o parâmetro de rugosidade da parede (E_w) são apresentados na tabela I.2:

Tabela I.2 – Coeficientes empíricos da função de parede

κ_v	E_w
0,42	9,793

ANEXO II

SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

O método dos volumes finitos (MVF) por vezes é confundido com o método das diferenças finitas (MDF), isso se dá pelo fato de que, em vários casos, as equações discretizadas obtidas por ambos os métodos são iguais. Entretanto, os dois métodos têm bases de formulação bastante diferentes, enquanto que o MDF tem uma dedução puramente matemática, a partir de derivadas usando séries de Taylor, a formulação do MVF tem base física.

Neste trabalho, o método utilizado é o de volumes finitos, onde existem duas maneiras de se obter as equações aproximadas: a primeira é a realização de balanços da propriedade em questão nos volumes elementares ou volumes finitos, a segunda é, partindo-se da equação diferencial na forma conservativa, integrá-la sobre o volume elementar, no espaço e no tempo (MALISKA, 1995).

II.1 – Método dos Volumes Finitos

A equação diferencial conservativa da equação de conservação da massa, para regime permanente, é dada por:

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho u) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v) = 0 \quad (\text{II.1})$$

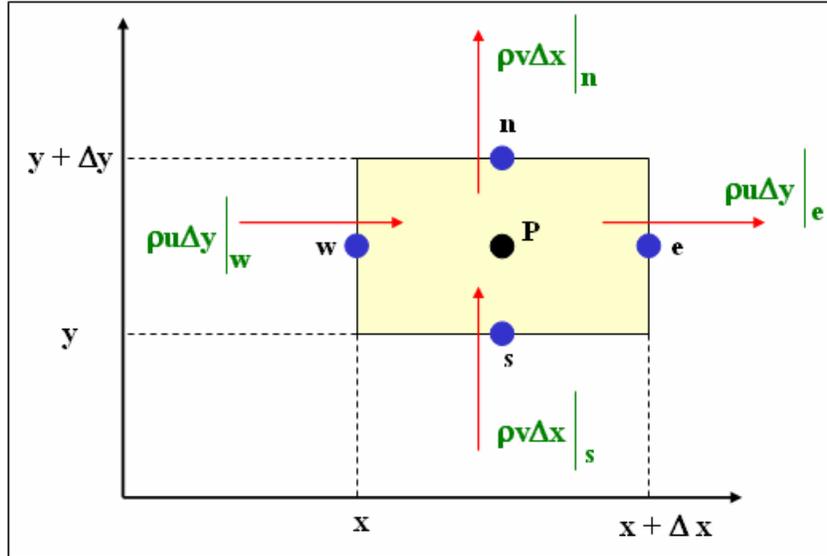


Figura II.1 – Balanço de massa no volume finito

Para a aproximação numérica, através da integração no volume finito, realiza-se a integração sobre o volume mostrado na figura II.1, obtendo-se:

$$\int_w^e \int_s^n \left[\frac{\partial}{\partial x}(\rho u) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v) \right] dx dy = 0 \quad (\text{II.2})$$

$$\int_n^s [\rho u|_e - \rho u|_w] dy + \int_w^e [\rho v|_n - \rho v|_s] dx = 0 \quad (\text{II.3})$$

Considerando que o fluxo de massa avaliado no meio da face do volume de controle representa a média da variação na face, pode-se escrever a equação aproximada para o volume P, apresentado na figura II.1:

$$\rho u \Delta y|_e - \rho u \Delta y|_w + \rho v \Delta x|_n - \rho v \Delta x|_s = 0 \quad (\text{II.4})$$

O domínio do problema a ser analisado é discretizado através de uma malha, onde os “nós” estão centralizados nos volumes (tridimensional) ou faces (bidimensional), portanto, o armazenamento de todas as propriedades dos fluidos, bem como as soluções das variáveis são transferidas / carregadas por esses referidos nós.

II.2 – Acoplamento Pressão–Velocidade

Para este trabalho, o método segregado foi utilizado como o algoritmo de solução numérica. Nesse método, as equações de conservação da quantidade de movimento e da massa, para problemas incompressíveis, gera a necessidade de um procedimento para o acoplamento da pressão-velocidade.

O processo de solução requer que cada variável tenha uma equação evolutiva para ser avançada, melhorando a estimativa do campo de pressão, de modo que o imperfeito campo de velocidade se aproxime de forma progressiva da solução que satisfaça a equação da continuidade, em sua forma discretizada. Dessa maneira, por se tratar de equações não lineares, várias iterações devem ser realizadas até a convergência do sistema.

As etapas nesse processo são descritas abaixo e seu algoritmo apresentado na figura II.2:

- atualização das propriedades do fluido analisado, utilizando como base a solução anterior,
- momento em u , v e w são resolvidos uma de cada vez, utilizando-se o valor atual da pressão e fluxo de massa na face, para atualização do campo de velocidade,
- verificação das velocidades obtidas na etapa anterior, caso as mesmas não satisfaçam a continuidade, deve-se fazer a devida correção nas pressões,
- cálculo das quantidades escalares, como: energia, k e ϵ , e
- verificação dos critérios de convergência.

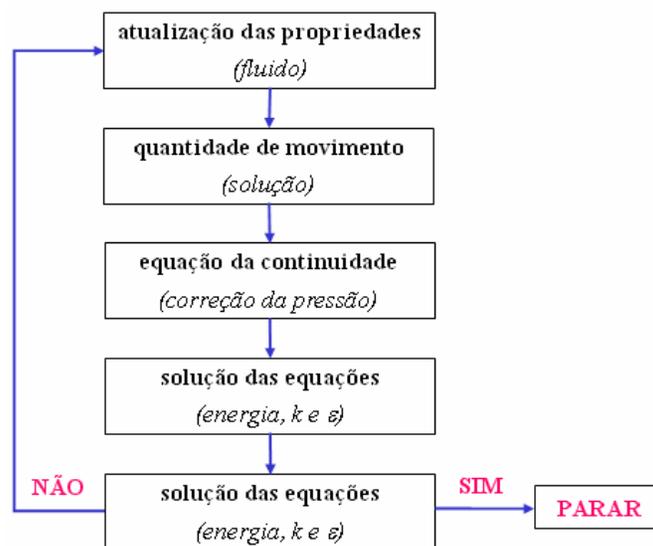


Figura II.2 – Algoritmo do Método de Solução Segregado

II.2.1 – Acoplamento Pressão–Velocidade

O código de CFD FLUENT, permite a escolha de três algoritmos para a acoplagem da pressão velocidade, são eles: SIMPLE, SIMPLEC e PISO.

Para o presente trabalho foi escolhido o método SIMPLE (*Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equations*), originalmente proposto por PATANKAR e SPALDING (1972), onde o balanço de massa é satisfeito para todas as células a cada iteração, dessa forma a equação da quantidade de movimento é sucessivamente corrigida.

As etapas sequenciais para esse método são:

- 1) no instante $t = 0$ são inicializadas as variáveis: P , u , v , w e ϕ ,
- 2) cálculo: $t = t + \Delta t$, com: $u_0 = u$, $v_0 = v$, $w_0 = w$, $P_0 = P$, $\phi_0 = \phi$, onde o índice indica o valor anterior,
- 3) cálculo: $u^* = u$, $v^* = v$, $w^* = w$, $P^* = P$, $\phi^* = \phi$, onde o índice indica o valor anterior da iteração anterior dentro do mesmo intervalo de tempo,
- 4) com o valor de P^* calcula-se as equações da quantidade de movimento obtendo-se u^* , v^* e w^* ,
- 5) cálculo da equação para a correção da pressão,
- 6) cálculo de P fazendo: $P^* + P'$,
- 7) cálculo de u' , v' e w' fazendo a correção de u , v e w ,
- 8) cálculo da variável escalar ϕ ,
- 9) retorno ao item 3 até que os resíduos das variáveis vetoriais sejam menores que a referência adotada,
- 10) retorno ao item 2 caso $t < t_{\text{máx}}$, caso negativo a solução é considerada como convergida.

O algoritmo inicia com a utilização do campo de pressão p^* para a solução do campo de velocidade u^* ou de fluxo dado por:

$$J_f^* = \hat{J}_f^* + d_f \cdot (p_{C0}^* - p_{C1}^*) \quad (\text{II.5})$$

onde: \hat{J}_f^* é a função de fluxo de massa $\rho \cdot u^*$, através da face f , e d_f = função da razão da área da célula em relação aos coeficientes lineares “ a_p ”.

Para satisfazer a condição de continuidade, a função de correção da pressão \hat{J}'_f é introduzida na função de fluxo J_f^* , resultando em uma função de fluxo corrigida, dada por:

$$J_f = J_f^* + J'_f \quad (\text{II.6})$$

A função de correção é dada por:

$$J'_f = d_f \cdot (p'_{C0} - p'_{C1}) \quad (\text{II.7})$$

onde: p' é a pressão de correção

O algoritmo SIMPLE substitui as equações de correções de fluxo dentro da equação de continuidade, dessa forma:

$$a_p \cdot p' = \sum_{nb} a_{nb} p'_{nb} + b \quad (\text{II.8})$$

Onde os índices “ nb ” que se referem às células vizinha a “ a_p ” e “ a_{nb} ” são os coeficientes lineares de “ ϕ ” e “ ϕ_{nb} ”. O número de células vizinhas depende da topologia dos pontos nodais que tipicamente será igual ao número de faces da célula. A equação é escrita para cada célula do modelo, formando um sistema de equações algébricas, cuja matriz dos coeficientes é uma matriz esparsa.

Na solução desta matriz, utiliza-se o método de sub-relaxação para o controle da variação de ϕ durante o processo iterativo. de forma simplificada, o novo valor ϕ_{anterior} e de um coeficiente de sub-relaxação α_r , como segue na equação abaixo:

O termo fonte b é o fluxo de massa através da célula computacional:

$$b = \sum_f^{N_{\text{faces}}} J_f^* A_f \quad (\text{II.9})$$

A equação da pressão de correção é resolvida através de iterações até a convergência. Neste processo computacional, a equação de correção de pressão está sujeita à divergência no resultado, portanto, é necessário um processo de sobre-relaxação α_p nas correções dos valores de pressão e de fluxo, da seguinte forma:

$$p = p^* + \alpha_p \cdot p' \quad (\text{II.10})$$

$$J_f = J_f' + d_f \cdot (p_{C0}' - p_{C1}') \quad (\text{II.11})$$