

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

KARINA THOMÉ RAMALHO

**MODELAGEM COMPUTACIONAL TRIDIMENSIONAL DO ESCOAMENTO EM
ADUFAS DE DESVIO**

CURITIBA

2016

KARINA THOMÉ RAMALHO

**MODELAGEM COMPUTACIONAL TRIDIMENSIONAL DO ESCOAMENTO EM
ADUFAS DE DESVIO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental (PPGERHA), Departamento de Hidráulica e Saneamento (DHS), Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do grau de Mestre em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. José Junji Ota

CURITIBA

2016

R165m

Ramalho, Karina Thomé

Modelagem computacional tridimensional do escoamento em adufas de desvio / Karina Thomé Ramalho. – Curitiba, 2016.

94 f ; il. color : 30 cm.

Dissertação - Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental, 2016.

Orientador: José Junji Ota .

Bibliografia: p. 92-94.

1. Escoamento. 2. Adufas de desvio. 3. Vazão – Medidores. 4. Medidores de fluxo. I. Universidade Federal do Paraná. II. Ota, José Junji. III. Título.

CDD: 551.48



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
Setor TECNOLOGIA
Programa de Pós Graduação em ENGENHARIA DE RECURSOS HÍDRICOS E
AMBIENTAL
Código CAPES: 40001016021P0

TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em ENGENHARIA DE RECURSOS HÍDRICOS E AMBIENTAL da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da Dissertação de Mestrado de **KARINA THOME RAMALHO**, intitulada: "**Modelagem Computacional Tridimensional do Escoamento em Adufas de Desvio**", após terem inquirido a aluna e realizado a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO.

Curitiba, 01 de Junho de 2016.


Prof JOSÉ JUNJI OTA

Presidente da Banca Examinadora (UFPR)


Prof CLAUDIO MARCHAND KRUGER

Avaliador Externo (UFPR)


Prof JÚLIO GOMES

Avaliador Interno (UFPR)


Prof MIRIAM RITA MORO MINE

Avaliador Interno (UFPR)

“O rico nem sempre é sábio, mas o sábio é sempre rico”.

Tales de Mileto
(624 a.C. – 548 a.C.)

AGRADECIMENTOS

A Deus pela oportunidade de conduzir essa pesquisa e por providenciar força e coragem nos dias mais difíceis.

À minha família, pelo amor e dedicação, e por me mostrar desde muito cedo o valor do conhecimento. Porque, a cada passo à frente que dei, só foi possível graças ao apoio e incentivo de pessoas tão amadas e queridas como vocês. Em especial, agradeço ao meu marido, Filipe, pelo carinho e tempo dedicado a mim e a esse trabalho, pelas palavras de incentivo e por todos os momentos dedicados a nós.

À Intertechne pela oportunidade de trabalhar com pessoas tão experientes e poder compartilhar do conhecimento delas, proporcionando-me crescimento profissional e até mesmo pessoal. Agradeço também, pelo incentivo à busca do conhecimento, pelo tempo e ferramentas disponibilizados para a realização dessa pesquisa.

Aos meus amigos e colegas de trabalho pelo companheirismo, pelas conversas e por dividirem comigo as dificuldades enfrentadas no dia-a-dia. É muito bom ter ao meu lado pessoas como vocês, que às vezes, mesmo distantes, se fazem tão presentes, com palavras de carinho e incentivo, tornando meus dias mais alegres.

Aos meus professores a quem registro minha profunda gratidão e admiração. Cada um de vocês teve um papel fundamental no meu crescimento. Em especial, aos professores da banca de Qualificação e Defesa, professora Miriam Rita Moro Mine, professor Julio Gomes e professor Claudio Marchand Krüger, por aceitarem o convite e pelas contribuições e comentários tão pertinentes que enriqueceram o conteúdo desse trabalho.

Finalmente, agradeço ao meu professor orientador, José Junji Ota, pela confiança e dedicação que, somados à sua experiência, sabedoria e paciência, contribuiu muito para o desenvolvimento desse estudo. Professor, muito obrigada por ser meu mestre e guiar meu caminho.

RESUMO

Uma maneira segura de estudar projetos de obras hidráulicas, particularmente de usinas hidrelétricas, é simular a operação da obra em laboratório, em uma escala reduzida, garantindo os critérios de semelhança. Os estudos em laboratório são muito importantes na identificação e solução de problemas e, por isso, são muito recomendados pelos projetistas. Esse tipo de estudo representa uma parcela importante do custo do projeto, assim como pode implicar em um “atraso” na conclusão dos estudos. Contudo, quando o projeto não tem esse benefício para tomada de decisão, podem ocorrer falhas graves que resultam em prejuízos adicionais exacerbados, seja em termos de prazos ou custos.

Nos casos onde o investidor não pode arcar com os custos de um modelo hidráulico reduzido, ou então, em fases iniciais do projeto e durante estudos de alternativas, a simulação numérica tridimensional pode ser uma ferramenta muito importante, permitindo que sejam realizados estudos complexos, considerando um grande número de cenários, sem incorrer na necessidade de se executar repetidas mudanças no modelo físico reduzido.

Este trabalho apresenta um estudo numérico realizado no programa computacional FLOW3D®, cujo objetivo foi avaliar o desempenho dessa ferramenta em representar o escoamento através de adufas de desvio, particularmente, quanto aos valores de pressão na máscara do emboque.

O emboque de adufas de desvio é uma região que pode ficar sujeita a importantes reduções de pressão devido às altas velocidades locais do escoamento. O principal efeito decorrente das altas velocidades impostas ao fluxo está relacionado a problemas devido à cavitação em estruturas de concreto. Quando o fluxo acelerado é acompanhado por uma redução de pressão capaz de formar bolhas de água vaporizadas, em algumas situações, pode ocorrer a implosão dessas bolhas e provocar danos ao revestimento.

Para subsidiar as análises e validar o modelo numérico foram utilizados os resultados do modelo físico reduzido da UHE Salto Caxias. O emboque das adufas de desvio dessa usina foi amplamente estudado pelo Centro de Hidráulica e Hidrologia Professor Parigot de Sousa (CEHPAR). Foram realizados ensaios para otimização da

forma da máscara do emboque, dando ênfase às distribuições de pressões obtidas para três configurações distintas dessa máscara.

Nessa pesquisa foram reproduzidos no modelo computacional tridimensional os testes realizados pelo laboratório em modelo físico reduzido, considerando a descarga da vazão de 14.000 m³/s (máxima vazão estudada pelo CEHPAR).

O estudo em modelo numérico mostrou que a ferramenta utilizada pode auxiliar na previsão da distribuição de pressões na máscara do emboque, contribuindo para a definição da geometria mais adequada e minimizando a necessidade de se realizar diversas modificações no modelo reduzido.

Palavras-chave: adufas de desvio, pressões na máscara do emboque, modelagem computacional tridimensional, distribuição de pressões.

ABSTRACT

Modeling hydraulic projects is a safe way of studying these projects, especially the ones of power plants, through reduced model of the operation system, when it is possible to guarantee the criteria of similarity. Laboratory studies are very important on identifying and solving problems and that is the reason why most of design engineers recommend it. This kind of study represents a very important part of the whole project cost, and also can imply on a study delay. However, without this tool for the decision making, many fails can be expected which can produce large unexpected losses, either in time, whether in costs.

In cases where the investors cannot afford the costs of a numerical modeling and also in initial phases of the project or during the alternative studies, a tridimensional numerical simulation can be a very important tool that allows very complex studies considering several different scenarios, avoiding the necessity of repeated changes on a reduced physical model.

This dissertation presents a numerical study using the FLOW3D software. The main objective is evaluating the performance of this numerical model on representing the flow through diversion galleries, especially when it comes to pressure values in the entrance mask.

The entrance of the diversion galleries is part of the system that can be susceptible to important decreasing pressures due to high velocity flow. The main effects due to these high velocities are cavitations problems in concrete structures. If the fast flow is followed by a pressure reduction that can generate vaporized water bubbles, in some cases, these bubbles can implode, causing damage.

To support the computational analysis and also validate the numerical model, the results of a realistic reduced model of Salto Caxias HPP were used. The entrance of the diversion galleries of this HPP was thoroughly studied by the Hydraulic and Hydrological Center Professor Parigot de Souza (CEHPAR), in Curitiba, Brazil. Some tests were conducted to optimize the shape of the entrance mask, emphasizing the pressure distribution obtained for three different configurations of the mask.

The research results reproduced, in a computational 3D model, the tests conducted for the lab in real reduced model considering a flow discharge of 14.000 m³/s (maximum flow studied by CEHPAR).

The numerical modeling studies showed that the computation tool can help in the prediction of pressure distribution on the entrance mask and collaborate on the definition of the best shape. As a consequence, it will avoid the necessity of constant changes in the reduced model.

Key words: diversion galleries, entrance mask pressures, 3D computation modeling, pressure distribution.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2.1 – FASES DE DESVIO (UHE FOZ DO AREIA)	6
FIGURA 2.2 – FASE 1 DO DESVIO DO RIO IGUAÇU (UHE SALTO CAXIAS)	7
FIGURA 2.3 – FASE 2 DO DESVIO DO RIO IGUAÇU (UHE SALTO CAXIAS)	7
FIGURA 2.4 – SEÇÃO TÍPICA DE UMA ADUFA DE DESVIO SOB VERTEDOURO.	9
FIGURA 2.5 – TIPOS DE RESTITUIÇÃO	9
FIGURA 2.6 – VARIÁVEIS USADAS PARA A DETERMINAÇÃO DO TIPO DE FLUXO ATRAVÉS DAS ADUFAS.....	11
FIGURA 2.7 – ESCOAMENTO TIPO I	14
FIGURA 2.8 – ESCOAMENTO TIPO II.....	14
FIGURA 2.9 – ESCOAMENTO TIPO III	15
FIGURA 2.10 – ESCOAMENTO TIPO IV.....	16
FIGURA 2.11 – ESCOAMENTO TIPO V.....	17
FIGURA 2.12 – ESCOAMENTO TIPO VI.....	17
FIGURA 2.13 – REPRESENTAÇÃO DA LINHA DE ENERGIA E LINHA PIEZOMÉTRICA	22
FIGURA 2.14 – COEFICIENTE DE PERDA DE CARGA PARA TRANSIÇÕES ABRUPTAS.....	27
FIGURA 2.15 – COEFICIENTE DE PERDA DE CARGA PARA TRANSIÇÃO GRADUAL - EXPANSÃO	27
FIGURA 2.16 – COEFICIENTE DE PERDA DE CARGA PARA TRANSIÇÃO GRADUAL – CONTRAÇÃO	28
FIGURA 2.17 – MÁSCARA DO EMBOQUE – FORMA ELÍPTICA.....	31
FIGURA 2.18 – MÁSCARA DO EMBOQUE – COMBINAÇÃO DE ELIPSES	31
FIGURA 2.19 – COEFICIENTE DE QUEDA DE PRESSÃO – FORMA ELÍPTICA ...	32
FIGURA 2.20 – COEFICIENTE DE QUEDA DE PRESSÃO – COMBINAÇÃO DE ELIPSES	33

FIGURA 2.21 – COEFICIENTE DE QUEDA DE PRESSÃO – FORMA ELÍPTICA RELATIVAMENTE CURTA	34
FIGURA 2.22 – CONFRONTO ENTRE AS DIVERSAS FORMAS DA MÁSCARA DO EMBOQUE	36
FIGURA 3.1 – FLUXOGRAMA DO MÉTODO DE ESTUDO	44
FIGURA 3.2 – ADUFA CONCEITUAL.....	48
FIGURA 3.3 – GEOMETRIA DA ADUFA CONCEITUAL IMPLANTADA NO MODELO NUMÉRICO	48
FIGURA 3.4 – RESULTADOS OBTIDOS COM A SIMULAÇÃO NUMÉRICA, MODELO REDUZIDO E TRAÇADO DE REDE DE CORRENTE PARA A ADUFA CONCEITUAL	49
FIGURA 3.5 – PRESSÕES NO TETO AO LONGO DO EIXO CENTRAL DA ADUFA DE DESVIO.....	57
FIGURA 4.1 – MÁSCARA DO EMBOQUE – GEOMETRIA CIRCULAR – ENSAIO 1	62
FIGURA 4.2 – MÁSCARA DO EMBOQUE – GEOMETRIA ELÍPTICA – ENSAIO 2.....	63
FIGURA 4.3 – MÁSCARA DO EMBOQUE – GEOMETRIA ELÍPTICA – ENSAIO 3.....	65
FIGURA 4.4 – GEOMETRIA DO MODELO MATEMÁTICO – ENSAIO 2	68
FIGURA 4.5 – MÁSCARAS DO EMBOQUE DA UHE SALTO CAXIAS ESTUDAS NA PRESENTE PESQUISA.....	69
FIGURA 4.6 – MALHA DE ELEMENTOS ADOTADA NAS SIMULAÇÕES NUMÉRICAS.....	70
FIGURA 4.7 – DETALHE DA MALHA DE ELEMENTOS ADOTADA NAS SIMULAÇÕES NUMÉRICAS	71
FIGURA 4.8 – LOCALIZAÇÃO DOS PONTOS PARA OBTENÇÃO DOS RESULTADOS NO MODELO NUMÉRICO (PROBES)	74
FIGURA 5.1 – ENSAIO 1 – REPRESENTAÇÃO DA LINHA PIEZOMÉTRICA NA MÁSCARA DO EMBOQUE	77
FIGURA 5.2 – ENSAIO 1 – DISTRIBUIÇÃO DE PRESSÕES AO LONGO DA ADUFA DE DESVIO.....	77
FIGURA 5.3 – ENSAIO 1 – COEFICIENTE DE QUEDA DE PRESSÃO	78
FIGURA 5.4 – ENSAIO 2 – REPRESENTAÇÃO DA LINHA PIEZOMÉTRICA NA MÁSCARA DO EMBOQUE	80

FIGURA 5.5 – ENSAIO 2 – DISTRIBUIÇÃO DE PRESSÕES AO LONGO DA ADUFA DE DESVIO.....	81
FIGURA 5.6 – ENSAIO 2 – COEFICIENTE DE QUEDA DE PRESSÃO	82
FIGURA 5.7 – ENSAIO 2 – RELAÇÃO OBTIDA PELO US CORPS OF ENGINEERS PARA O COEFICIENTE DE QUEDA DE PRESSÃO DE UM PERFIL ELÍPTICO RELATIVAMENTE CURTO.....	83
FIGURA 5.8 – ENSAIO 3 – REPRESENTAÇÃO DA LINHA PIEZOMÉTRICA NA MÁSCARA DO EMBOQUE	84
FIGURA 5.9 – ENSAIO 3 – DISTRIBUIÇÃO DE PRESSÕES AO LONGO DA ADUFA DE DESVIO.....	85
FIGURA 5.10 – ENSAIO 3 – COEFICIENTE DE QUEDA DE PRESSÃO	86
FIGURA 5.11 – ENSAIO 3 – RELAÇÃO OBTIDA PELO US CORPS OF ENGINEERS PARA O COEFICIENTE DE QUEDA DE PRESSÃO DE UM PERFIL ELÍPTICO RELATIVAMENTE CURTO.....	86

LISTA DE TABELAS

TABELA 2.1 – TIPOS DE ESCOAMENTOS ATRAVÉS DE ADUFAS	12
TABELA 2.2 – FORMAS GEOMÉTRICAS PARA A MÁSCARA DO EMBOQUE E RESPECTIVAS PREVISÕES DE PRESSÕES	35
TABELA 3.1 – RESUMO DAS SIMULAÇÕES REALIZADAS PARA DEFINIR OS PARÂMETROS A SEREM ADOTADOS NAS SIMULAÇÕES DAS ADUFAS DE DESVIO DA UHE SALTO CAXIAS	54
TABELA 3.2 – PRESSÕES NA MÁSCARA DO EMBOQUE.....	55
TABELA 3.3 – DIFERENÇAS ENTRE OS VALORES DE PRESSÕES NA MÁSCARA DO EMBOQUE MEDIDOS NO MODELO HIDRÁULICO REDUZIDO E OS VALORES OBTIDOS NAS SIMULAÇÕES NUMÉRICAS	56
TABELA 4.1 – CURVA DE DESCARGA OBTIDA NO MODELO HIDRÁULICO REDUZIDO.....	72
TABELA 4.2 – COORDENADAS DOS PONTOS DE MEDIÇÃO (PROBES).....	73
TABELA 5.1 – ENSAIO 1 – DISTRIBUIÇÃO DE PRESSÃO NA MÁSCARA DO EMBOQUE	76
TABELA 5.2 – ENSAIO 2 – DISTRIBUIÇÃO DE PRESSÃO NA MÁSCARA DO EMBOQUE	80
TABELA 5.3 – ENSAIO 3 – DISTRIBUIÇÃO DE PRESSÃO NA MÁSCARA DO EMBOQUE	84

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	OBJETIVOS	2
1.1.1	Objetivo Geral	2
1.1.2	Objetivos Específicos	2
2	REVISÃO DA LITERATURA	4
2.1	DESVIO DE RIO	4
2.2	ADUFAS DE DESVIO	8
2.3	CÁLCULO HIDRÁULICO DE ADUFAS DE DESVIO	10
2.3.1	Tipos de Escoamentos	10
2.3.1.1	Escoamento do Tipo I	13
2.3.1.2	Escoamento do Tipo II	14
2.3.1.3	Escoamento do Tipo III	15
2.3.1.4	Escoamento do Tipo IV	15
2.3.1.5	Escoamento do Tipo V	16
2.3.1.6	Escoamento do Tipo VI	17
2.3.2	Capacidade de Descarga	17
2.3.2.1	Descarga em Regime de Superfície Livre (Tipos I, II, III e V)	18
2.3.2.2	Descarga Sob Pressão (Tipos IV e VI)	20
2.3.2.3	Linha Piezométrica e Linha de Energia	21
2.3.2.4	Cálculo das Perdas de Carga	23
2.3.2.5	Geometria da Máscara do Emboque	28
2.4	DINÂMICA DOS FLUIDOS COMPUTACIONAL	36
2.4.1	Equações Governantes	37
2.4.2	Modelos de Turbulência	40
3	MÉTODO	43
3.1	SIMULAÇÃO DE UMA ADUFA DE DESVIO CONCEITUAL	47

3.2	AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DE PARÂMETROS DO MODELO NUMÉRICO NOS RESULTADOS.....	50
4	ESTUDO DE CASO – UHE SALTO CAXIAS	59
4.1	DESCRIÇÃO DO ARRANJO GERAL DA USINA	59
4.2	ESTUDOS EM MODELO HIDRÁULICO REDUZIDO	60
4.3	MODELO NUMÉRICO	65
4.3.1	Geometria.....	66
4.3.2	Malha de Volumes Finitos	70
4.3.3	Definição das Condições de Contorno	71
4.3.4	Localização dos Pontos de Controle para Obtenção de Resultados.....	72
5	APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	75
5.1	ENSAIO 1 – MÁSCARA SUPERIOR DO EMBOQUE COM FORMA CIRCULAR DE RAIOS IGUAIS A 3 METROS.....	75
5.2	ENSAIO 2 – MÁSCARA SUPERIOR DO EMBOQUE COM FORMA ELÍPTICA DE SEMI-EIXOS IGUAIS A 5,0 E 3,0 METROS	79
5.3	ENSAIO 3 – MÁSCARA SUPERIOR DO EMBOQUE COM FORMA CONSTITUÍDA DE UM TRECHO DE ELÍPSE DE SEMI-EIXOS IGUAIS A 10,0 E 4,0 METROS.....	83
6	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES PARA ESTUDOS FUTUROS	88
	REFERÊNCIAS.....	92

1 INTRODUÇÃO

Durante a construção de uma barragem é necessário desviar o rio do seu curso natural para permitir a construção das obras no leito.

Apesar de normalmente ser considerado como uma obra provisória, o manejo do rio representa uma etapa importante dentro do âmbito geral da obra, cuja concepção pode ter um impacto significativo no custo e no tempo de construção do empreendimento.

Devido à variedade dos parâmetros envolvidos e às características particulares inerentes ao arranjo geral, não é possível estabelecer uma regra comum a todos os projetos. Dessa forma, a concepção do esquema de desvio do rio exige um estudo das características hidrológicas e morfológicas do local em estudo.

Em função das características do vale, o desvio do rio pode ser realizado em uma única fase ou em diversas fases. O caso mais comum é o de desvio realizado em duas fases.

Na primeira fase de desvio, o rio permanece escoando em seu leito natural, entretanto, parte da sua calha é estrangulada por meio de ensecadeiras permitindo criar uma área seca onde serão construídas as primeiras obras no leito.

A segunda fase corresponde ao fechamento total da calha do rio. Nesta etapa toda vazão afluyente é desviada para jusante do empreendimento através de estruturas hidráulicas devidamente dimensionadas para esse fim. As estruturas mais comuns utilizadas nessa etapa são: túneis, adufas (galerias em concreto) e estruturas rebaixadas.

A utilização de adufas para o Desvio de Segunda Fase é uma solução bastante utilizada no Brasil. O posicionamento dessas estruturas depende das características de cada projeto; normalmente, são incorporadas na estrutura do vertedouro.

Segundo o Comitê Brasileiro de Barragens (CBDB, 2009), das cento e nove barragens pesquisadas, 44,5% dos desvios de segunda fase foram realizados através de adufas ou galerias de desvio. Dentre os vários aproveitamentos que adotaram essa solução, pode-se citar a UHE Salto Caxias e a UHE Foz do Areia, ambas localizadas no rio Iguaçu, estado do Paraná.

O emboque das adufas de desvio é uma região que pode ficar sujeita a importantes reduções de pressão devido às altas velocidades locais do escoamento.

O principal efeito decorrente dessas altas velocidades impostas ao fluxo está relacionado a problemas devido à cavitação em estruturas de concreto. Segundo PINTO (1979), quando o fluxo acelerado é acompanhado por uma redução de pressão capaz de formar bolhas de água vaporizadas, em algumas situações, pode ocorrer a implosão dessas bolhas e provocar danos à estrutura.

A forma da máscara do emboque é de fundamental importância no estabelecimento dessas pressões, portanto, deve ser dimensionada para proporcionar uma aceleração progressiva e gradual do fluxo. Em geral são adotadas superfícies elípticas de modo a evitar pressões negativas capazes de provocar riscos de cavitação.

A bibliografia clássica baseada na teoria potencial permite visualizar as regiões de maiores velocidades do escoamento e, portanto, menores pressões. A precisão desse tipo de aproximação está intimamente relacionada ao traçado das linhas de corrente que deve ser feito com cuidado para evitar interpretações erradas. Atualmente, os métodos numéricos vêm sendo utilizados com muita frequência pelos projetistas, que em determinadas situações utilizam os resultados obtidos dessas simulações para subsidiar os estudos em modelo reduzido.

1.1 OBJETIVOS

Neste item seguem apresentados os objetivos geral e específicos deste trabalho de pesquisa.

1.1.1 Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho é avaliar o potencial do uso de um modelo computacional tridimensional como ferramenta de projeto no dimensionamento de adufas de desvio, sobre tudo, avaliar se o modelo numérico é capaz de reproduzir os valores de pressão no emboque observados no modelo reduzido.

1.1.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos do estudo proposto são:

- Apresentar um roteiro para o dimensionamento hidráulico de adufas de desvio de rios;

- Avaliar e validar o modelo numérico tridimensional escolhido para as simulações do escoamento através de adufas de desvio submetidas a altas velocidades;
- Avaliar a influência de certos parâmetros do modelo numérico nos resultados obtidos, visando a determinação de uma metodologia para obtenção de resultados capazes de orientar projetos futuros;
- Identificar eventuais problemas na modelagem matemática e contribuir na solução desses inconvenientes.

2 REVISÃO DA LITERATURA

Este capítulo apresenta os principais aspectos e características do dimensionamento de adufas de desvio, bem como, o estado da arte da modelagem numérica, buscando a integração dos estudos anteriores e o embasamento necessário para o desenvolvimento da pesquisa.

2.1 DESVIO DE RIO

Embora tenha um caráter provisório, o desvio do rio é uma etapa muito importante na construção de um empreendimento hidráulico. Por definição, tem o objetivo de realizar o manejo do rio durante a construção das obras no leito, garantindo a segurança da obra.

O esquema de desvio do rio deve fazer parte do planejamento geral da obra, contemplando um conjunto de projetos especialmente desenvolvidos para reduzir custos e prazo de construção, dentro dos padrões aceitáveis de riscos.

Não é possível estabelecer uma regra comum a todos os projetos, a escolha do esquema de desvio necessariamente deve levar em consideração aspectos hidrológicos, topográficos e econômicos do local da obra. Deve ser adequado ao cronograma e ao arranjo da obra.

De acordo com a Comissão Internacional de Grandes Barragens, em linhas gerais, a abordagem para a construção das obras permanentes pode ser feita de três maneiras distintas (ICOLD, 1986):

- Desvio do rio acontecendo simultaneamente com a construção das obras do leito, em uma única operação;
- Desvio parcial do curso de água com execução da obra em etapas. Construção de duas ou mais ensecadeiras para desviar o rio através de estruturas de desvio (túnel, adufa, etc.);
- Construção das obras permanentes separadamente das obras do leito. Neste caso, as obras permanentes estão acima do nível do rio e não sofrem interferência do fluxo de água.

O desvio do rio em uma única operação é usual em vales estreitos, quando não se dispõe de muito espaço para ensecar parte do leito do rio. Por exemplo, o

desvio do rio Iguaçu para a construção do aproveitamento hidrelétrico Foz do Areia foi realizado através de túneis de desvio. O esquema de desvio do rio durante a construção de Foz do Areia foi um fator determinante no projeto. O rio Iguaçu apresenta um comportamento de vazões bastante irregular. Cheias podem ocorrer em qualquer época do ano e com crescimento muito rápido. Este tipo de comportamento hidrológico, associado à pequena largura da calha do rio no local da obra, conduziu a solução utilizando túneis de desvio localizados na margem direita (CBDB, 2009).

A FIGURA 2.1 ilustra as etapas do desvio do rio Iguaçu para a construção da UHE Foz do Areia. Os trabalhos começaram com a escavação do túnel de desvio e a execução das ensecadeiras de proteção durante a construção (diques). Nessa primeira etapa (FIGURA 2.1 – A), o rio escoava em seu leito natural, em uma brecha formada entre as ensecadeiras de montante e jusante do eixo da futura barragem (Diques 2 e 3). Após a conclusão do túnel de desvio, as ensecadeiras de proteção das escavações do túnel (Diques 1 e 2) são removidas e a brecha nas ensecadeiras do leito do rio é fechada. Nesse momento (FIGURA 2.1 – B), o leito do rio entre as ensecadeiras formadas pelos Diques 2 e 3 está totalmente seco, permitindo a execução da barragem (FIGURA 2.1 – C). Simultaneamente à construção da barragem, outras estruturas são executadas. A FIGURA 2.1 – D mostra a etapa final da construção da UHE Foz do Areia, quando todas as obras já estão finalizadas e o reservatório já está formado.

As principais estruturas dessa obra são:

- Túnel de desvio do rio;
- Tomada de água;
- Casa de força;
- Canal de fuga;
- Vertedouro, e
- Barragem.

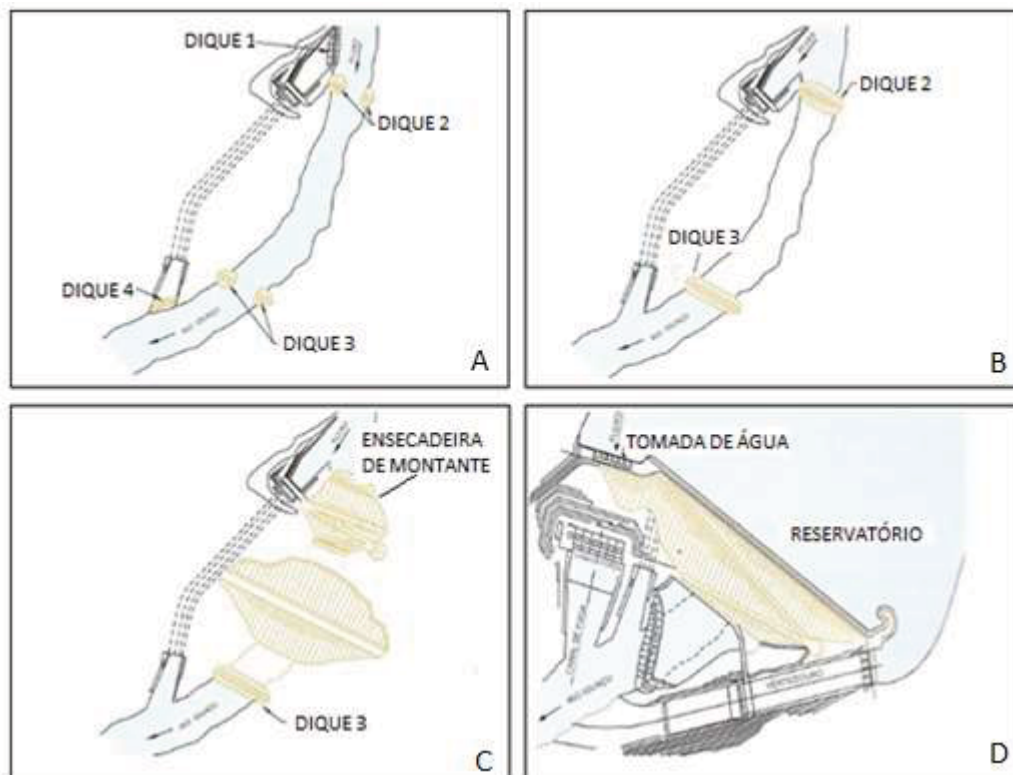


FIGURA 2.1 – FASES DE DESVIO (UHE FOZ DO AREIA)
Fonte: CBDB (2009).

O esquema de desvio utilizado durante a construção da Usina de Salto Caxias é um exemplo de uma construção em vale aberto, que, diferentemente do exemplo de Foz do Areia, foi realizado em duas fases. Na primeira fase, o canal natural do rio foi reduzido por uma ensecadeira em forma de U, construída a partir da margem direita. Esta ensecadeira permitiu a construção do vertedouro, das adufas de desvio e de parte da barragem. Após a construção desta parte da estrutura, o rio foi desviado através das adufas, de modo que o restante da barragem pudesse ser construído (CBDB, 2009).

A FIGURA 2.2 mostra a primeira fase do desvio do rio Iguaçu para a construção da UHE Salto Caixas. Nessa primeira fase, o rio escoava no seu leito natural, enquanto parte do vertedouro é executado na margem direita. A FIGURA 2.3 apresenta a segunda etapa do desvio, onde 5 vãos do vertedouro estão operacionais, e por onde a vazão do rio é escoada, permitindo a execução do restante do vertedouro e da barragem propriamente dita.

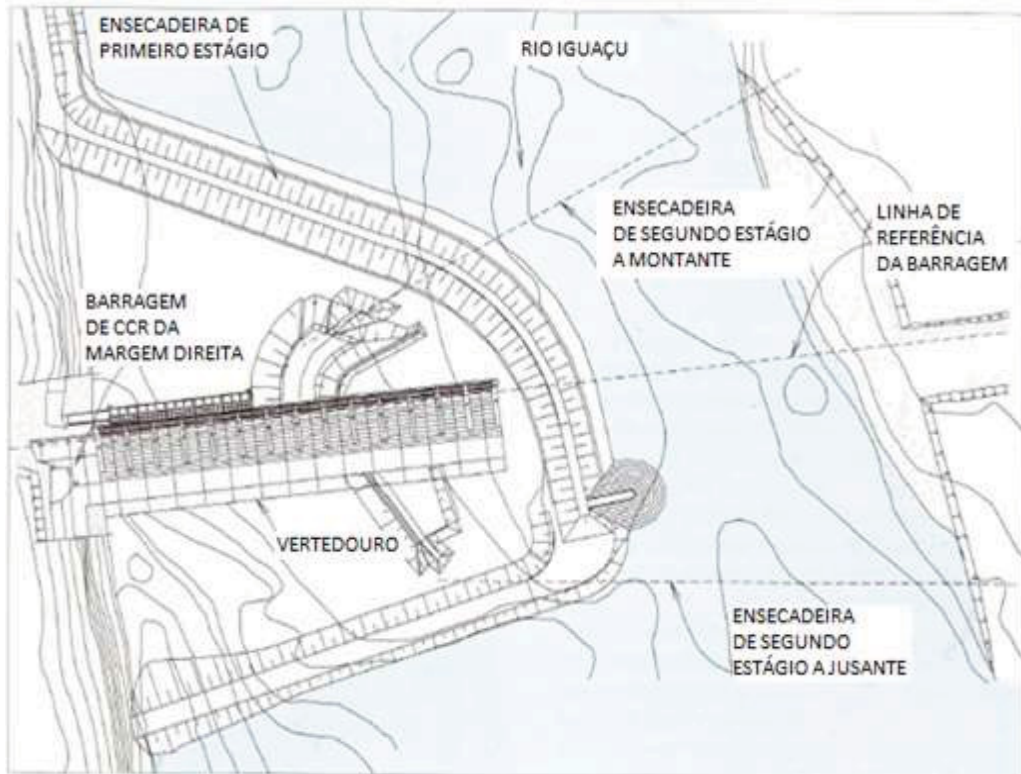


FIGURA 2.2 – FASE 1 DO DESVIO DO RIO IGUAÇU (UHE SALTO CAXIAS)
Fonte: CBDB (2009).

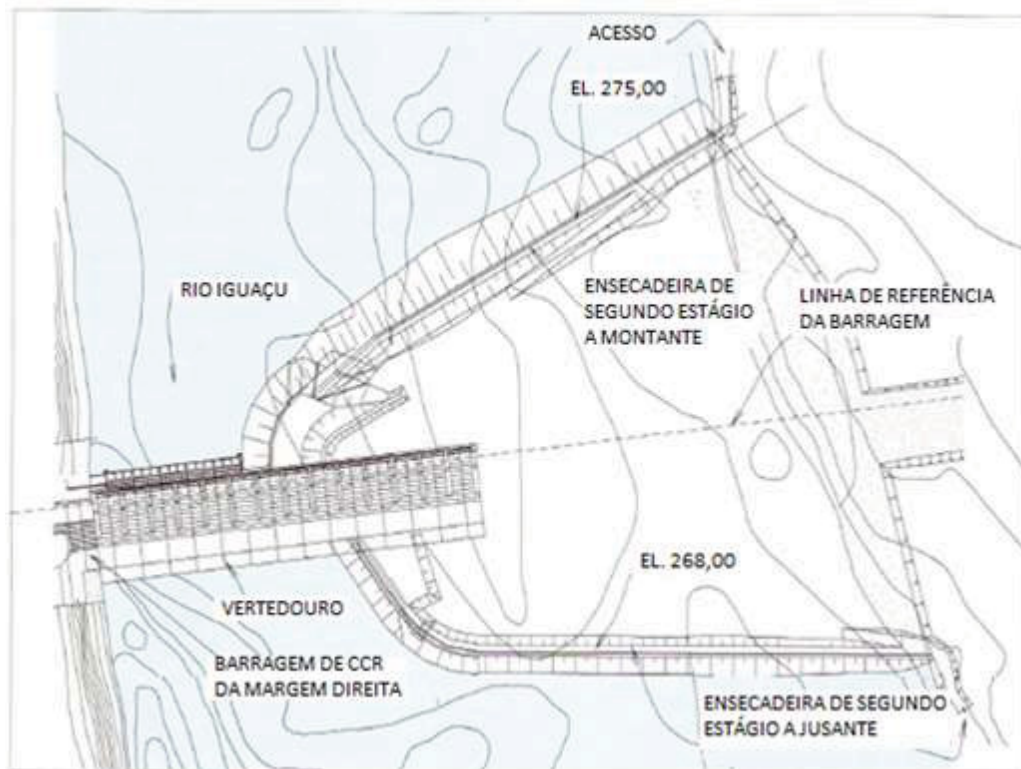


FIGURA 2.3 – FASE 2 DO DESVIO DO RIO IGUAÇU (UHE SALTO CAXIAS)
Fonte: CBDB (2009).

2.2 ADUFAS DE DESVIO

Adufas de desvio são galerias em concreto, normalmente construídas embaixo de soleiras de vertedouros, cujo objetivo é escoar a vazão de projeto durante a segunda fase do desvio.

O uso desse tipo de estrutura é mais comum em esquemas de desvio compostos por duas ou mais fases, entretanto, também há a possibilidade de se utilizar adufas sem a necessidade de desviar o rio previamente. Nesse caso, as adufas são construídas a seco, em um nível mais alto, por exemplo, no interior de um canal lateral, enquanto o rio escoar em seu leito natural.

Segundo CHOW (1959), Yarnell, Nagler e Woodward foram os pioneiros nos estudos desse tipo de estrutura. Realizaram mais de 3.000 ensaios em laboratório para diferentes geometrias de adufas, com seções circulares e quadradas. O *U.S. Bureau of Standards* também realizou campanhas experimentais em modelos reduzidos para determinar o comportamento hidráulico desse tipo de estrutura hidráulica (USNBS, 1970).

As adufas de desvio compreendem três estruturas principais:

- A estrutura de controle (que compreende a máscara do emboque);
- A galeria em si; e
- A estrutura de restituição.

A estrutura de controle tem por objetivo acelerar o fluxo, assegurando a transição do escoamento lento a montante, para o escoamento em regime rápido no interior da adufa (PINHEIRO, 2002). Além disso, é na estrutura de controle onde são posicionadas as comportas para fechamento do desvio para realizar o posterior enchimento do reservatório.

As comportas devem ser dimensionadas para cortar o fluxo de água e permitir o tamponamento definitivo das adufas de desvio. Eventualmente, pode-se prever o aproveitamento da estrutura de desvio como descarga de fundo e/ou tomada de água; neste caso, não há um tamponamento definitivo.

A geometria das adufas depende de vários fatores e deve levar em consideração os seguintes aspectos (PINHEIRO, 2002):

- Características hidrológicas, topográficas e geológicas;

- Dimensão da ensecadeira de montante, cuja altura está inversamente relacionada com a capacidade de descarga da adufa;
- Redução da seção hidráulica da adufa por razões econômicas;
- Evitar velocidades excessivas susceptíveis de provocar abrasão e/ou cavitação.

A FIGURA 2.4 ilustra uma seção típica de uma adufa de desvio incorporada aos blocos de concreto do vertedouro.

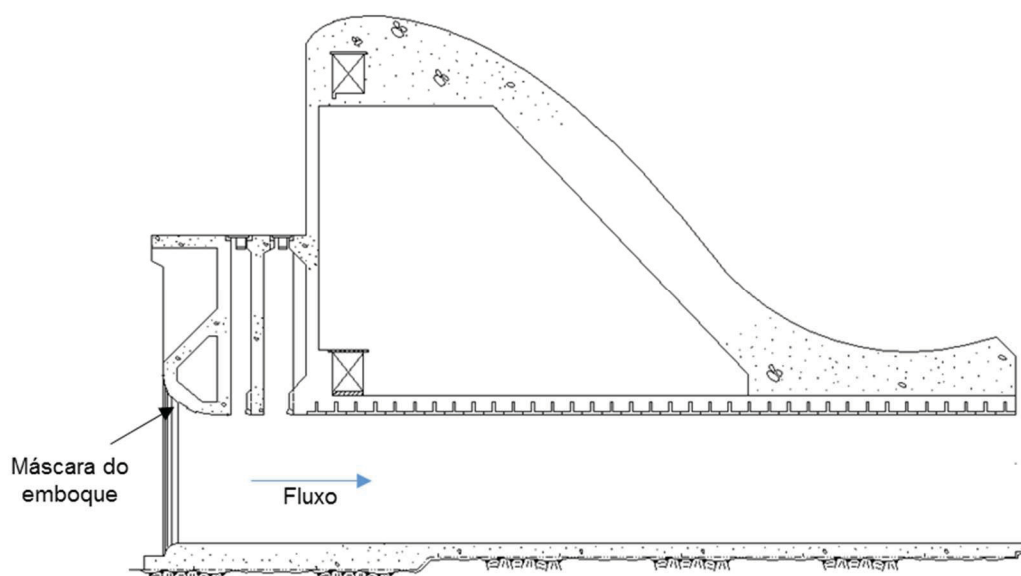
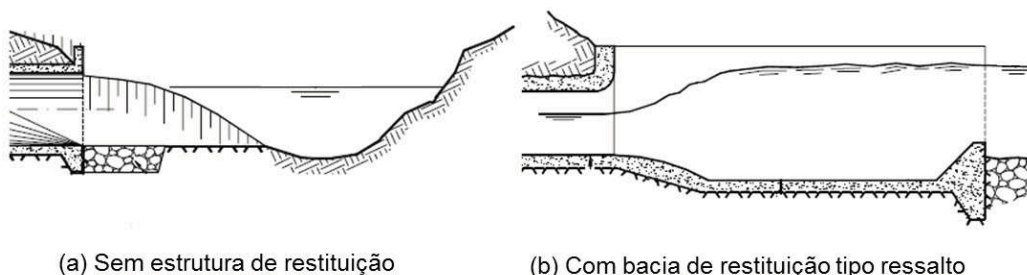


FIGURA 2.4 – SEÇÃO TÍPICA DE UMA ADUFA DE DESVIO SOB VERTEDOIRO
Fonte: COPEL (2000).

Normalmente, a restituição das águas é feita diretamente ao curso de água, podendo haver um canal escavado, ou eventualmente, uma estrutura para dissipação da energia em excesso. A FIGURA 2.5 ilustra esquematicamente esses dois tipos de restituição do fluxo a jusante.



(a) Sem estrutura de restituição

(b) Com bacia de restituição tipo ressalto

FIGURA 2.5 – TIPOS DE RESTITUIÇÃO
Fonte: Adaptado de PINHEIRO (2002).

2.3 CÁLCULO HIDRÁULICO DE ADUFAS DE DESVIO

O dimensionamento de adufas é usualmente realizado a partir de formulações definidas com base em resultados experimentais obtidos de estudos anteriores em modelo hidráulico reduzido.

O *U.S. Army Corps of Engineers* publicou o *Hydraulic Design of Reservoir Outlet Works* (USACE, 1980), onde se apresentam orientações para o dimensionamento hidráulico desse tipo de estrutura de desvio. Esse documento é baseado em resultados de experimentos laboratoriais e de protótipos, e correlacionados com a teoria clássica, quando possível.

Este item apresenta os conceitos básicos e os principais aspectos do dimensionamento de uma adufa de desvio.

2.3.1 Tipos de Escoamentos

As análises hidráulicas do fluxo através de adufas de desvio basicamente envolvem duas condições de fluxo. Quando o reservatório formado a montante da estrutura de desvio está com o nível de água baixo, por exemplo, durante o desvio do rio, a estrutura trabalha como um canal aberto. À medida que o nível de água do reservatório vai aumentando, ou seja, a profundidade do fluxo, o tipo do escoamento através da estrutura vai sendo alterado, até o ponto em que as adufas deixam de trabalhar como um canal aberto e passam a funcionar como um orifício/bocal (seção plena).

As adufas trabalham como um canal aberto sempre e quando a seção de escoamento estiver parcialmente cheia, ou seja, o fluxo escoar com superfície livre. Nesse caso, as comportas e válvulas de controle são fatores determinantes para estabelecer a capacidade de descarga. Entretanto, quando as adufas estiverem funcionando como condutos forçados, a capacidade de descarga é determinada tanto pela geometria da adufa propriamente dita, quanto pela geometria da seção de controle. Neste caso, um dos aspectos fundamentais no cálculo é a faixa de validade das equações para determinação das perdas de energia.

A determinação das características do fluxo depende de muitas variáveis, incluindo a geometria da entrada, declividade, tamanho, rugosidade, condições de aproximação e restituição, etc. (CHOW, 1959). Portanto, é necessário conhecer

adequadamente o tipo de escoamento imposto pelo fluxo e onde o controle é estabelecido.

Em termos práticos, o controle do escoamento através das adufas pode ser classificado em três hipóteses possíveis:

- Funcionamento como canal aberto (conduto livre). Quando o fluxo escoar com superfície livre em toda extensão da adufa, estando a entrada livre também;
- Escoamento com superfície livre ao longo de toda extensão da adufa, porém, com a entrada afogada;
- Escoamento sob pressão (do tipo conduto forçado). Quando o fluxo escoar sob pressão ao longo de toda extensão da adufa.

Como apresentado por CHOW (1959), a combinação dessas hipóteses de cálculo com as características geométricas da estrutura e condições de montante e de jusante resulta em uma classificação com seis tipos diferentes de escoamento, cujas principais características são apresentadas na TABELA 2.1, a seguir.

A FIGURA 2.6 apresenta esquematicamente a simbologia adotada na TABELA 2.1.

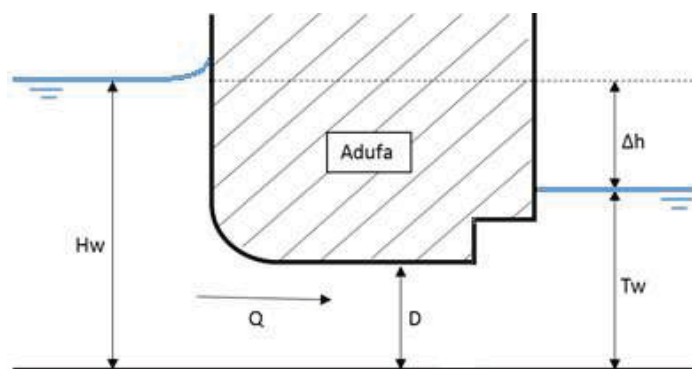


FIGURA 2.6 – VARIÁVEIS USADAS PARA A DETERMINAÇÃO DO TIPO DE FLUXO ATRAVÉS DAS ADUFAS

Fonte: Autoria Própria.

Onde:

H_w = altura de água acima do piso da galeria na seção de montante (m);

- Q = vazão (m^3/s);
 D = diâmetro ou altura da seção transversal da adufa (m);
 T_w = nível de água a jusante (m);
 Δh = desnível (m)
 h_c = altura crítica (m)

TABELA 2.1 – TIPOS DE ESCOAMENTOS ATRAVÉS DE ADUFAS
 Fonte: CHOW (1959)

Tipo	Forma de Escoamento	Controle	H_w/D	T_w/D	T_w/h_c	Característica
I	Superfície livre	Entrada	$< 1,5$	$\leq 1,0$	$< 1,0$	Altura crítica a montante
II	Superfície livre	Saída	$< 1,5$	$\leq 1,0$	$< 1,0$	Altura crítica a jusante
III	Superfície livre	Saída	$< 1,5$	$\leq 1,0$	$> 1,0$	Escoamento lento (Subcrítico)
IV	Sob pressão	Saída	$> 1,0$	$> 1,0$	-	Saída submersa e seção plena
V	Superfície livre	Entrada	$\geq 1,5$	$\leq 1,0$	-	Entrada afogada e regime rápido
VI	Sob pressão	Saída	$\geq 1,5$	$\leq 1,0$	-	Saída livre e seção plena

O valor de 1,5 da relação H_w/D foi definido a partir de investigações feitas em laboratório. Segundo CHOW (1959), a adufa trabalhará com seção plena quando a sua saída estiver submersa, ou quando a profundidade na entrada for alta e seu corpo (adufa propriamente dita) for suficientemente longo. De acordo com essas investigações, a entrada não estará submersa se a profundidade da água na entrada for menor que 1,2 a 1,5 vezes a altura da adufa, e para uma análise inicial utiliza-se o limite superior (1,5).

O comportamento do escoamento é diretamente influenciado pelas condições impostas ao fluxo. Se a saída se encontra submersa, a adufa funcionará como um conduto (Tipo IV). Se não está submersa, a profundidade na entrada pode ser maior ou menor que a altura crítica. Quando é maior, tem-se a ocorrência do escoamento Tipo V ou VI. Quando a profundidade da entrada é menor que a profundidade crítica, a profundidade na saída pode ser maior ou menor que a profundidade crítica na saída. Quando a profundidade na saída é alta, tem-se a ocorrência do Tipo III, e quando é baixa o escoamento é do Tipo II, e se a declividade da adufa for subcrítica, do Tipo I.

A classificação feita na TABELA 2.1 é apresentada com um pouco mais de detalhe nos itens a seguir, cujo texto foi baseado em CHOW (1959) e MARTINS (2000).

As Figuras 2.7 a 2.12 mostram as características de cada tipo de escoamento usando como exemplo bueiros rodoviários, cujo padrão de escoamento é semelhante às adufas de desvio.

2.3.1.1 Escoamento do Tipo I

O Tipo I é caracterizado por um escoamento em regime supercrítico com superfície livre em toda extensão da adufa e o controle está na seção de montante. Nessa condição, a altura crítica ocorre nas proximidades da entrada e o controle da vazão está no emboque, que funciona praticamente como uma soleira espessa.

Para que ocorra esse tipo de escoamento, as seguintes condições devem ser verificadas:

- Emboque livre. A relação entre a altura de água a montante e a altura da adufa (H_w/D) não excede 1,5;
- Canal supercrítico. A declividade da galeria (S_0) é superior à declividade crítica (S_c);
- Não há interferência do nível de água de jusante. A altura de água a jusante é inferior à altura crítica na seção avaliada.

A FIGURA 2.7 ilustra as principais características do escoamento do Tipo I.

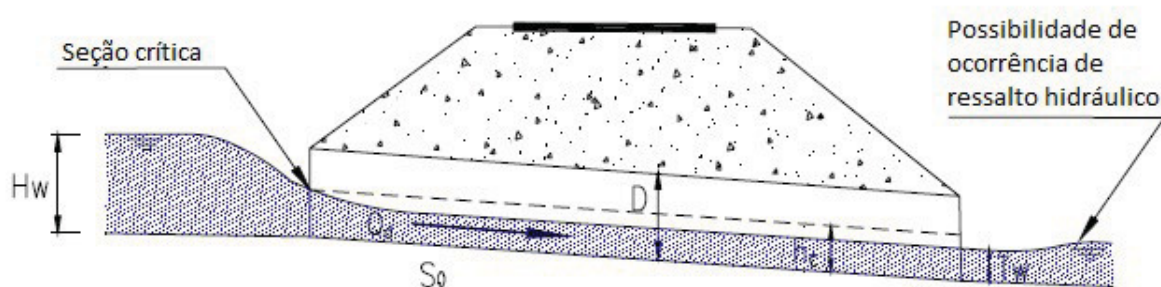


FIGURA 2.7 – ESCOAMENTO TIPO I
Fonte: MARTINS (2000).

2.3.1.2 Escoamento do Tipo II

Assim como o escoamento do Tipo I, o escoamento do Tipo II é em superfície livre, estando com controle a jusante.

Para que ocorra este tipo de escoamento, as seguintes condições devem ser verificadas:

- Emboque livre. A relação entre a altura de água a montante e a altura da adufera (H_w/D) não excede 1,5;
- Canal subcrítico. A declividade da galeria (S_0) é inferior à declividade crítica (S_c);
- Altura crítica na seção de saída. A altura de água a jusante é inferior à altura crítica na mesma seção.

A FIGURA 2.8 ilustra as principais características do escoamento do Tipo II.

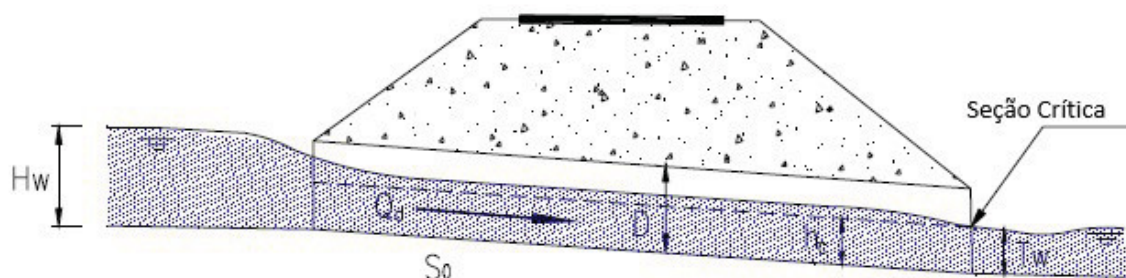


FIGURA 2.8 – ESCOAMENTO TIPO II
Fonte: MARTINS (2000).

2.3.1.3 Escoamento do Tipo III

O Tipo III é caracterizado por um escoamento lento em toda adufa. Neste escoamento, o controle é a jusante (em uma região mais a jusante da saída da adufa). Para que ocorra este tipo de escoamento, as seguintes condições devem ser verificadas:

- Emboque livre. A relação entre a altura de água a montante e a altura da adufa (H_w/D) não excede 1,5;
- Saída livre. A altura de água a jusante (T_w) não excede a altura da adufa, entretanto é superior à altura crítica (h_c).

Como se pode verificar na FIGURA 2.9, a altura do escoamento é sempre superior à altura crítica.

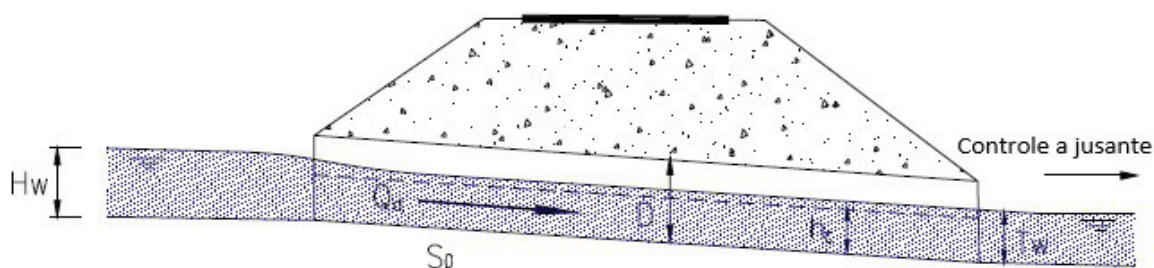


FIGURA 2.9 – ESCOAMENTO TIPO III
Fonte: MARTINS (2000).

2.3.1.4 Escoamento do Tipo IV

O fluxo submetido a este tipo de escoamento processa-se sob pressão. Neste caso, as alturas de água a montante e a jusante são superiores à altura da adufa (emboque e desemboque afogados).

A vazão de dimensionamento pode ser determinada a partir da equação da conservação de energia (Equação de Bernoulli), ou recorrendo-se às leis de resistência dos escoamentos uniformes (MARTINS, 2000). A FIGURA 2.10 ilustra as principais características do escoamento do Tipo IV.

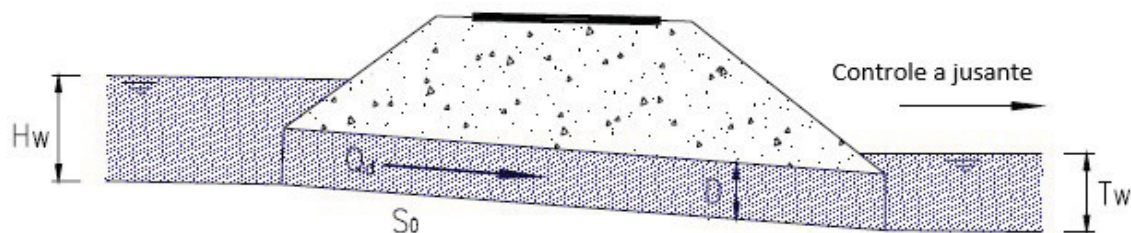


FIGURA 2.10 – ESCOAMENTO TIPO IV
Fonte: MARTINS (2000).

2.3.1.5 Escoamento do Tipo V

O Tipo V é caracterizado por um escoamento em regime rápido e entrada afogada. Para que ocorra esse tipo de escoamento, a relação entre a altura de água a montante (H_w) e a altura da adufa (D) deve exceder o valor de 1,5 e o controle é estabelecido na seção de montante. Ao longo de toda adufa a altura da superfície livre é sempre inferior à altura crítica, podendo ocorrer ressalto hidráulico a jusante da estrutura de saída.

Nesse caso, a profundidade crítica (h_c) é menor que a altura do emboque e o emboque da adufa funciona como um orifício numa condição de eficiência hidráulica sensivelmente inferior às condições de uma adufa trabalhando como um canal (CORRADINI, 1984).

A profundidade crítica (h_c) no emboque cresce com o aumento de vazão afluyente e para maiores níveis de montante, haverá um aumento de área molhada dentro da adufa até um momento em que a seção hidráulica ficará totalmente cheia (seção plena) e a adufa passará a funcionar como um conduto forçado (Tipo IV).

A FIGURA 2.11 ilustra as principais características do escoamento do Tipo V. Esse tipo de escoamento é muito comum em adufas de desvio de rios, produzindo alta capacidade de descarga, com altas velocidades e conseqüentemente, baixas pressões no emboque.

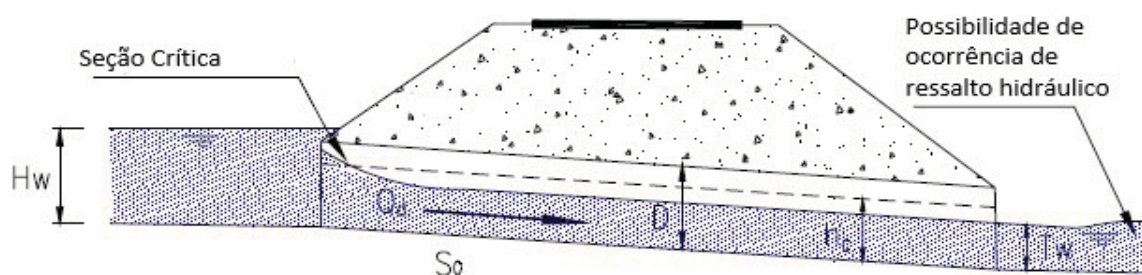


FIGURA 2.11 – ESCOAMENTO TIPO V
Fonte: MARTINS (2000).

2.3.1.6 Escoamento do Tipo VI

Nesse tipo de escoamento a adufa trabalha com seção plena ao longo de toda a sua extensão, entretanto, a estrutura de saída não está afogada e o controle do escoamento é a jusante da estrutura de saída. A FIGURA 2.12 ilustra as principais características do escoamento do Tipo VI.

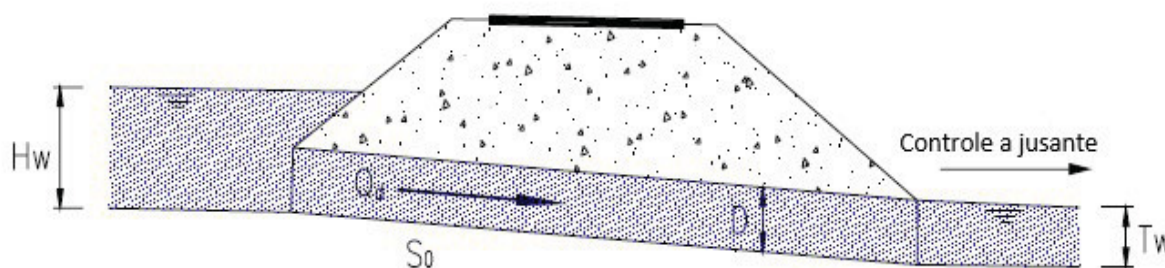


FIGURA 2.12 – ESCOAMENTO TIPO VI
Fonte: MARTINS (2000).

2.3.2 Capacidade de Descarga

Este item apresenta um método para cálculo da capacidade de descarga de adufas de desvio, com base na teoria apresentada pelo *U.S. Corps of Engineers* (USACE, 1980).

Vários autores publicaram métodos para dimensionamentos de adufas de desvio, entre eles: CHOW (1959), HENDERSON (1966) e o *Bureau of Reclamation* (USBR, 1970). Entretanto, independente do procedimento de cálculo adotado, o

dimensionamento deve levar em consideração a possibilidade de ser efetuado um reconhecimento do local de implantação da obra, tendo em vista a avaliação das condições de escoamento a jusante, de forma a evitar possíveis prejuízos ou interferências com propriedades adjacentes.

A determinação da capacidade de descarga de uma adufa de desvio envolve uma série de fatores, como por exemplo: diâmetro, comprimento, rugosidade, bem como a altura de água a montante (carga hidráulica) e os níveis de água a jusante (condições de restituição).

Como apresentado no item anterior, para vazões mais baixas pode ocorrer escoamento com superfície livre, onde a análise é governada pelos mesmos princípios que se aplicam a um canal aberto. Já para os casos em que a adufa trabalha com seção plena, o fluxo escoo sob pressão e a capacidade de descarga é determinada tanto pela geometria da galeria, quanto pela geometria da seção de controle, e nesse caso, um dos aspectos fundamentais é o cálculo das perdas de carga contínuas.

Para avaliar a capacidade de descarga de escoamentos através de adufas de desvio, pode-se considerar o seguinte:

- Nos escoamentos com superfície livre: escoamento em regime lento (Tipo III), escoamento com altura crítica à saída (Tipo II) e escoamento com altura crítica à entrada (Tipo I), o dimensionamento é similar ao cálculo de um canal aberto.
- Para escoamentos com superfície livre e entrada afogada (Tipo V): o dimensionamento hidráulico pode ser realizado considerando descarga através de um orifício.
- No caso de escoamentos sob pressão (Tipo IV e Tipo VI): o dimensionamento hidráulico pode ser realizado utilizando as leis de resistência dos escoamentos uniformes.

2.3.2.1 Descarga em Regime de Superfície Livre (Tipos I, II, III e V)

Se o escoamento através da adufa é em regime de superfície livre, a análise do fluxo é governada pelos mesmos princípios aplicados a um canal aberto. O perfil longitudinal da superfície livre é determinado a partir dos dados de vazão, geometria, rugosidade e declividade de um canal. Nesse caso é importante conhecer a posição

do controle hidráulico, pois, o perfil da superfície livre está associado com o tipo de controle que ocorre.

Para descargas em adufa parcialmente cheia, têm-se três tipos de controles: controle de profundidade crítica, controle na saída e controle na entrada.

- **Controle de profundidade crítica (Tipo I e II):** esse tipo de controle acontece somente quando se tem fluxo livre dentro da adufa e quando a energia total (altura de velocidade + profundidade do fluxo), para a vazão dada, é a energia mínima. A profundidade do fluxo nessa condição é definida como profundidade crítica e a declividade requerida para produzir este fluxo é definida como declividade crítica. A capacidade de descarga é definida onde a profundidade crítica ocorre. Se a profundidade crítica ocorrer na entrada, a energia a montante será a energia mínima, obtida a partir da profundidade crítica na seção de controle. Quando a profundidade crítica ocorre próxima à seção de saída, o cálculo da capacidade de descarga deve levar em consideração as perdas localizadas (curvas, etc) e perdas contínuas, e nesse caso, a energia a montante pode ser obtida a partir das curvas de remanso (*Standard Step Method*).
- **Controle na saída (Tipo III):** quando o controle do escoamento estiver localizado a jusante da saída da adufa, caracteriza um escoamento do tipo lento (subcrítico) em toda a adufa. A capacidade de descarga depende de todos os parâmetros hidráulicos a montante do controle, tais como: geometria do emboque, diâmetro, declividade, coeficiente de resistência ao escoamento e profundidade do fluxo. Nesse caso, o perfil da superfície livre dentro da adufa será em grande parte não-uniforme e vai determinar a capacidade de descarga da estrutura. Também é importante verificar o nível de água de jusante da estrutura (em geral, a curva-chave natural do rio), pois, quando o nível de jusante excede a profundidade crítica na saída, a capacidade de descarga pode ser afetada.

O cálculo da capacidade de descarga para os casos dos escoamentos do Tipo I, II e III segue os mesmos princípios adotados para o cálculo de um canal aberto. Portanto, envolve a determinação dos perfis longitudinais para determinação da superfície livre do fluxo (Curvas de Remanso).

CHOW (1959) apresentou três métodos de cálculo para encontrar a superfície livre do fluxo em um canal, resolvendo simultaneamente a equação de Darcy-Weisbach e a equação da continuidade. O método mais utilizado é o Método do Passo Padrão (*Standard Step Method*), cujo princípio básico é a solução das equações em várias seções ao longo do canal. A distância entre estas seções é conhecida e o objetivo é determinar a elevação da superfície livre em cada seção mediante um procedimento de “erro e acerto”, até encontrar o valor esperado.

- **Controle na entrada (Tipo V):** quando a seção de controle está localizada perto do emboque da estrutura (entrada submersa) e o escoamento ocorre com superfície livre, a capacidade de descarga depende exclusivamente da geometria da seção de entrada e da profundidade da carga hidráulica. O controle na entrada existirá enquanto a água escoar através da adufa com velocidade maior do que a água pode entrar. Nesse caso, a vazão através da adufa será correspondente a um orifício, dada pela seguinte equação:

$$Q = C A \sqrt{2g H} \quad (2.1)$$

Onde:

C = coeficiente de descarga para o orifício;

H = diferença entre o nível de água de montante e jusante (m);

A = área da seção do orifício (m²).

2.3.2.2 Descarga Sob Pressão (Tipos IV e VI)

Um dos aspectos fundamentais no cálculo de escoamentos sob pressão é a determinação da faixa de validade das equações para contabilização das perdas de carga contínuas, válidas para regimes de escoamentos plenamente estabelecidos (perfil de velocidades estável). Segundo CORRADINI (1984), para que ocorra um regime de escoamento plenamente estabelecido, com perfil de velocidades estável e completo desenvolvimento da camada limite, é necessário um comprimento de 20 a 40 diâmetros.

Quando o escoamento se processa sob pressão, o controle é estabelecido a jusante da saída da adufa. Neste caso, a capacidade de descarga é função das

perdas de carga localizadas (entrada, curvas, etc.), da rugosidade da superfície hidráulica, da inclinação do piso, do comprimento, do diâmetro e do nível de água a jusante.

A energia do escoamento a montante pode ser obtida a partir da energia do escoamento a jusante, adicionando-se a esta, as perdas de carga contínua e perdas localizadas. Desta forma, a determinação da capacidade de descarga envolve a junção da equação de Darcy-Weisbach, a equação da continuidade e o diagrama de Moody.

O item 2.3.2.3, a seguir, apresenta como se obtém a Linha Piezométrica e Linha de Energia (gradientes) para determinação da capacidade de descarga das adufas de desvios, nos casos onde as perdas de carga contínua e localizada devem ser contabilizadas (escoamentos sob pressão ou quando o controle está na saída).

2.3.2.3 Linha Piezométrica e Linha de Energia

O princípio básico para analisar fluxo permanente e incompressível é a lei da conservação de energia (Equação de Bernoulli). A equação da energia para qualquer ponto da seção transversal da adufa é dada por:

$$H = Z + \frac{P}{\gamma} + \alpha \frac{V^2}{2g} \quad (2.2)$$

Onde:

- H = energia total / altura total (m);
- Z = altura sobre o plano de referência (m);
- P = pressão no ponto (N/m²);
- γ = peso específico da água (N/m³);
- V = velocidade média do escoamento (m/s);
- g = aceleração da gravidade (m/s²);
- α = coeficiente de *Coriolis*, fator de correção de energia cinética devido as variações da velocidade na seção (adimensional).

Como a distribuição de velocidades pode variar ao longo de uma seção transversal, o termo da energia cinética deve ser corrigido por um fator e correção. O coeficiente de *Coriolis* " α " que aparece na Equação de Bernoulli representa a relação

que existe, para uma dada seção, entre a energia real e a que se obteria considerando a distribuição uniforme de velocidades. Segundo WHITE (2002), para escoamento laminar totalmente desenvolvido em tubos o valor de " α " é igual a 2, e de 1,04 a 1,11 para escoamentos turbulentos em tubos. Ensaios experimentais mostraram que " α " varia entre 1,03 e 1,36 para canais com seção prismática e de declividade de fundo constante. O uso do coeficiente de *Coriolis* depende da exatidão que se esperam os resultados. Na prática, para escoamentos turbulentos de seção transversal de tamanho regular, adota-se " α " igual à unidade sem prejuízos nos cálculos do dimensionamento hidráulico. Desta forma, a Equação 2.3 pode ser escrita como:

$$H = Z + \frac{P}{\gamma} + \frac{V^2}{2g} \quad (2.3)$$

A Equação 2.3 permite determinara a pressão em qualquer seção da adufa usando o princípio da conservação de energia e a linha piezométrica, também chamada de gradiente de pressão (" P/γ " acima da linha de centro da adufa).

A linha de energia está a " $V^2/2g$ " acima da linha piezométrica, onde " V " é a velocidade média do fluxo. A perda de energia que resulta entre a seção 1 e a seção 2 está representada por " h_f ".

A FIGURA 2.13 mostra um diagrama simplificado da representação da linha de energia e linha piezométrica, onde se considera fluxo paralelo e distribuição de velocidades uniforme. Nesse caso, a linha da superfície livre da água coincide com a linha piezométrica e a perda de carga é decorrente apenas de perdas contínuas.

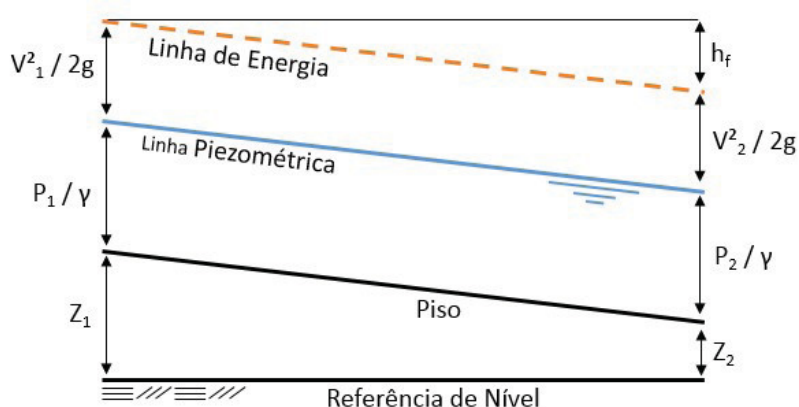


FIGURA 2.13 – REPRESENTAÇÃO DA LINHA DE ENERGIA E LINHA PIEZOMÉTRICA
Fonte: Adaptado de CHOW (1959).

Por definição, a energia em um ponto qualquer da adufa é igual à energia em um ponto a jusante mais as perdas de carga. Portanto, a equação da energia pode ser expressa da seguinte forma:

$$Z_1 + \frac{P_1}{\gamma} + \frac{V_1^2}{2g} = Z_2 + \frac{P_2}{\gamma} + \frac{V_2^2}{2g} + h_f \quad (2.4)$$

No caso de uma adufa, onde há um reservatório a montante, a altura de velocidade na seção do reservatório pode ser negligenciada e a Equação 2.4 pode ser escrita da seguinte forma:

$$Z_1 + \frac{P_1}{\gamma} = Z_2 + \frac{P_2}{\gamma} + \frac{V_2^2}{2g} + h_f \quad (2.5)$$

Na Equação 2.5, o termo à esquerda da igualdade representa a elevação do reservatório formado a montante da adufa. Esta equação pode ser aplicada para determinar a pressão em qualquer ponto ao longo da adufa.

2.3.2.4 Cálculo das Perdas de Carga

Em geral, a perda de carga pode ser classificada em duas categorias:

- **Perda contínua:** é a perda de carga devido à resistência ao escoamento causada pela tensão entre a superfície da estrutura e o fluido.
- **Perdas localizadas:** esta parcela da perda de carga é devido à resistência de forma, ou seja, contrações, expansões, mudanças do alinhamento da estrutura (curvas), pilares, válvulas, etc.

Perda de Carga Contínua:

A equação de Darcy-Weisbach para obtenção da perda de carga contínua pode ser expressa como (HENDERSON, 1966):

$$h_f = \frac{f L}{D} \frac{V^2}{2g} \quad (2.6)$$

Onde:

- h_f = perda de carga contínua (m);
- f = coeficiente de resistência ao escoamento;
- D = diâmetro ou altura da seção transversal (m);
- V = velocidade média do escoamento (m/s)
- L = comprimento (m);
- g = aceleração da gravidade (m/s²).

Em 1932, Nikuradse demonstrou através de experimentos que o coeficiente de resistência ao escoamento varia com a rugosidade da superfície hidráulica e com o número de Reynolds.

O valor do coeficiente de resistência ao escoamento também pode ser obtido através do diagrama de Moody, que é a representação gráfica em escala duplamente logarítmica do fator de resistência ao escoamento (f) em função do número de Reynolds (Re) e a rugosidade relativa de uma tubulação (e/D).

Normalmente, na engenharia de obras hidráulicas, a perda de carga contínua é calculada com base na equação de Manning e a perda contínua pode ser obtida da seguinte forma:

$$h_f = L \frac{Q^2 n^2}{A^2 R_h^{4/3}} \quad (2.7)$$

Onde:

- h_f = perda de carga contínua (m);
- n = coeficiente de Manning;
- L = comprimento (m);
- Q = vazão (m³/s);
- A = área da seção de escoamento (m²);
- R_h = raio hidráulico (m);

Perdas de Carga Localizadas (resistência devido à forma):

No cálculo da capacidade de descarga devem ser contabilizadas todas as perdas de carga localizadas. As perdas de carga localizadas são devido à forma da estrutura, ou seja, tipo de aproximação (entrada), curvas, comportas, grades, válvulas, pilares, etc. Em geral, são tão importantes quanto a perda contínua e são definidas por uma expressão do tipo (FOX e McDONALD, 2001):

$$h_L = K_L \frac{V^2}{2g} \quad (2.8)$$

Onde:

- h_L = perda de carga localizada (m);
- K_L = coeficiente de perda localizada (adimensional);
- V = velocidade de referência (m/s);
- g = aceleração da gravidade (m/s²).

Como mostra a Equação 2.8, sempre que ocorrer fluxo em regime turbulento, a perda de carga localizada varia com o quadrado da velocidade.

Em quase todos os casos, o coeficiente de perda localizada “ K_L ” é determinado experimentalmente. Entretanto, uma exceção é o caso da perda por expansão brusca (Equação de Borda Carnot):

$$K_L = \left(1 - \frac{A_1}{A_2}\right)^2 \quad (2.9)$$

Onde A_1 e A_2 são respectivamente a área da seção de montante e de jusante da seção transversal onde ocorre a perda localizada e a velocidade de referência nesse caso é a velocidade de montante (V_1).

Quando a expansão brusca ocorre na saída da estrutura, e esta por sua vez está submersa, A_1/A_2 é igual a zero e o coeficiente de perda localizada “ K_L ” se torna igual a unidade ($K_L = 1$). Desta forma, a perda de carga localizada na saída devido à expansão brusca é a altura de velocidade ($V^2/2g$).

Assim como a expansão, a contração brusca também resulta em uma perda de carga localizada, e nesse caso, a velocidade de referência é a velocidade da seção a jusante da contração (V_2):

$$K_L = \left(\frac{1}{C_c} - 1 \right)^2 \quad (2.10)$$

Onde:

C_c = coeficiente de contração (adimensional);

K_L = coeficiente de perda localizada (adimensional);

Na bibliografia existem diversas tabelas e equações para se obter os coeficientes de perdas localizadas (K_L), as quais estão intimamente relacionadas com a geometria da estrutura. As Figuras 2.14, 2.15 e 2.16 foram extraídas do *U.S Army Corps of Engineers* (USACE, 1980) e apresentam uma estimativa de perdas localizadas para transições (abruptas ou graduais).

A FIGURA 2.14 apresenta o coeficiente de perda de carga localizada para transições abruptas em função do parâmetro A_1/A_2 (expansão) e A_2/A_1 (contração). Quando há uma transição de seção transversal, a perda localizada deste efeito também deve ser contabilizada.

A FIGURA 2.15 mostra os coeficientes de perda de carga localizada para expansão com transições graduais. Este tipo de expansão foi estudado por GIBSON (1914), HUANG (1964) e PETERS (1934). Os testes mostraram que o coeficiente de perda é função do ângulo formado entre a linha de centro e a abertura da transição.

As perdas de carga na transição gradual para a situação de contração são apresentadas na FIGURA 2.16.

As Figuras 2.15 e 2.16 foram obtidas para transições cônicas.

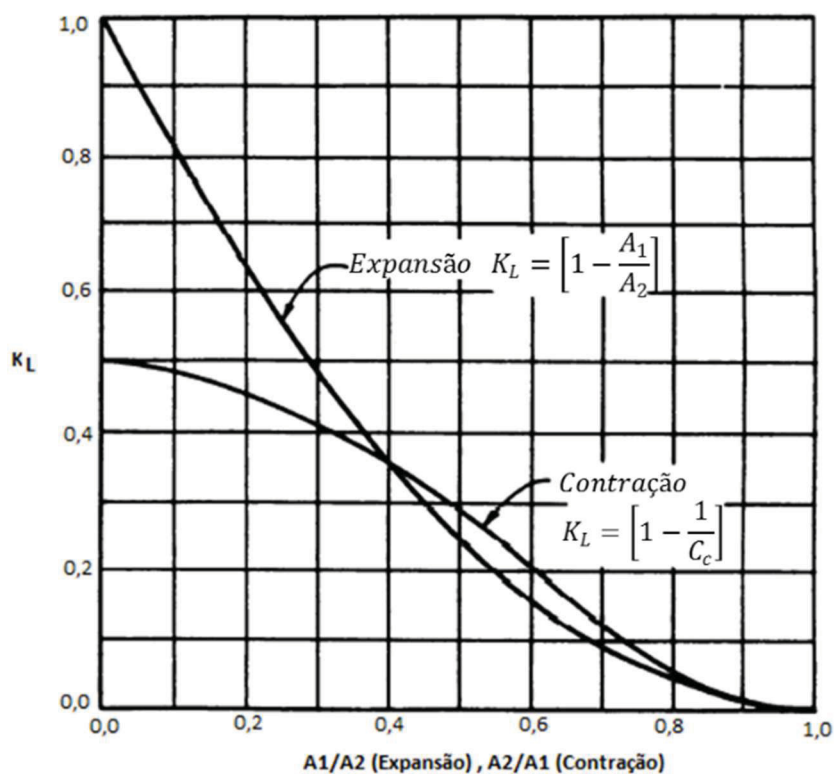


FIGURA 2.14 – COEFICIENTE DE PERDA DE CARGA PARA TRANSIÇÕES ABRUPTAS
Fonte: USACE (1980).

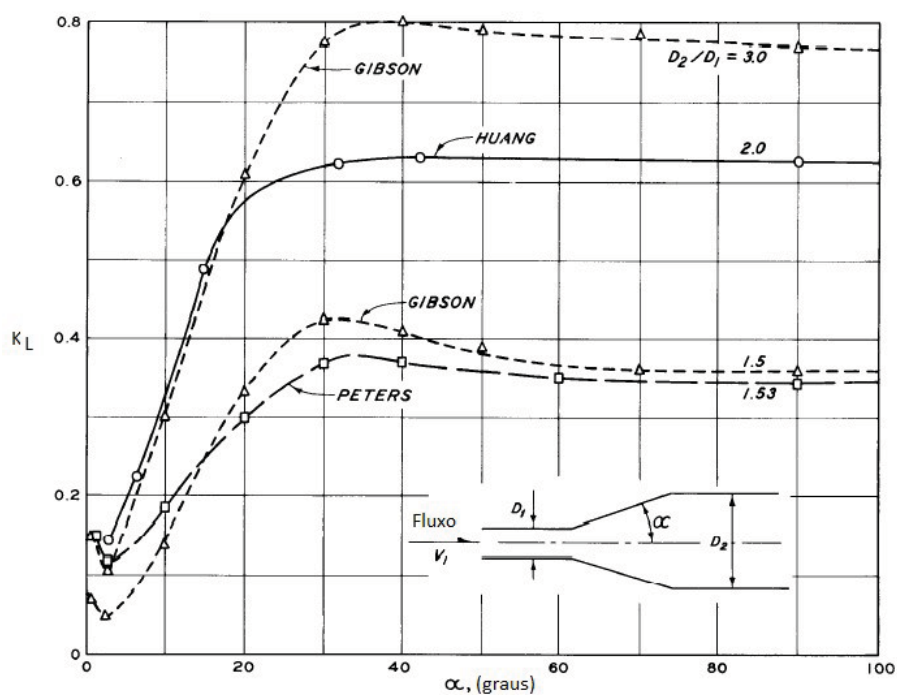


FIGURA 2.15 – COEFICIENTE DE PERDA DE CARGA PARA TRANSIÇÃO GRADUAL - EXPANSÃO
Fonte: USACE (1980).

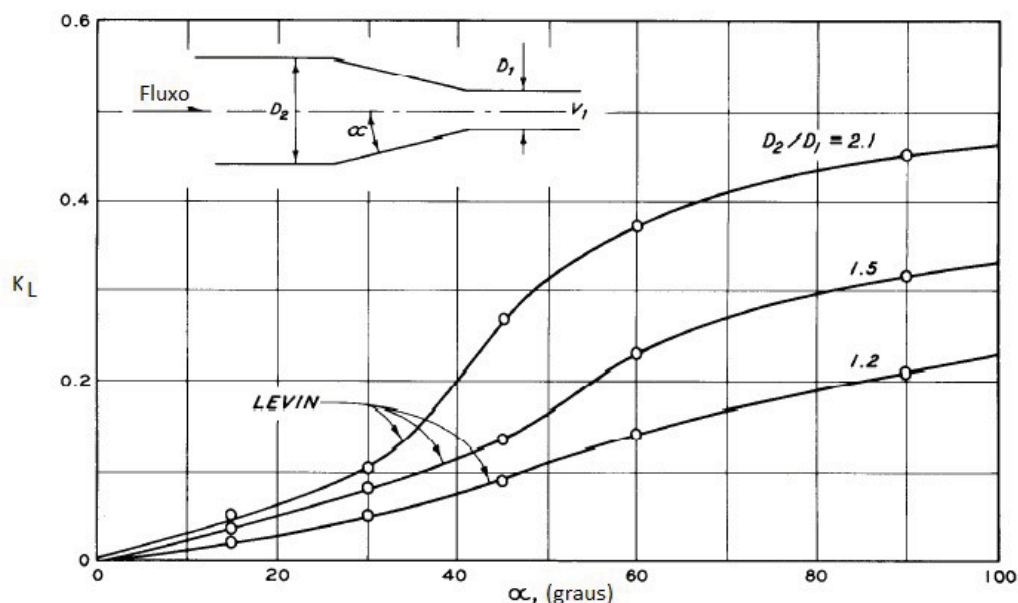


FIGURA 2.16 – COEFICIENTE DE PERDA DE CARGA PARA TRANSIÇÃO GRADUAL – CONTRAÇÃO
Fonte: USACE (1980).

2.3.2.5 Geometria da Máscara do Emboque

O emboque das adufas de desvio é uma região normalmente sujeita a fluxos com altas velocidades e importantes reduções de pressão (OTA e TOZZI, 1994).

A forma da máscara tem fundamental importância nos casos em que o controle hidráulico está a montante (escoamentos do Tipo I e V). Devem ser projetadas para evitar pressões negativas capazes de provocar o fenômeno da cavitação, e simultaneamente, proporcionar a descarga da vazão de projeto com segurança.

Cavitação é caracterizada pela formação e o colapso (implosão) de sucessivas bolhas de vapor em baixas pressões e altas velocidades. Este fenômeno frequentemente causa danos nas superfícies de concreto e aço.

A redução de pressão pode ser causada por mudanças bruscas na geometria, o que provoca uma zona de separação e contração do fluxo, resultando em altas velocidades e baixas pressões.

A equação básica associada aos estudos de cavitação é dada por (USACE, 1980):

$$\sigma = \frac{(P_0 - P_v)}{\frac{\gamma}{V^2} \frac{1}{2g}} \quad (2.11)$$

Onde:

- σ = parâmetro de cavitação (adimensional);
- P_0 = pressão absoluta (N/m²);
- P_v = pressão de vapor (N/m²);
- V = velocidade média do fluxo (m/s);
- γ = peso específico da água (N/m²);
- g = aceleração da gravidade (m/s²).

O emboque das adufas é executado em curva para “guiar” o fluxo com o mínimo de distorção até a seção interna da adufa. Teoricamente, se a máscara do emboque for executada com a forma do escoamento livre sob uma comporta, as pressões produzidas nesta região seriam nulas (atmosféricas), ou seja, a máscara estaria livre de pressões negativas e de qualquer dano devido à cavitação.

Em 1976, o físico alemão Gustav Kirchhoff, baseado na teoria do escoamento potencial, obteve uma forma teórica que conduz a pressões nulas em toda a extensão da máscara do emboque, cujo perfil é dado pela Equação 2.12 (OTA e TOZZI, 1994).

$$x = \frac{1}{2} \log \frac{1 + \sqrt{2y - y^2}}{1 - \sqrt{2y - y^2}} - \sqrt{2y - y^2} \quad (2.12)$$

Onde x e y são coordenadas adimensionais definidas pelas equações 2.13 e 2.14 respectivamente, e D é a altura da adufa.

$$x = \frac{x \pi}{2 D} \quad (2.13)$$

$$y = \frac{y \pi}{2 D} \quad (2.14)$$

Por facilidade e por questões econômicas é comum a adoção de curvas elípticas ou combinação de curvas em emboques com altas velocidades, como no caso das adufas de desvio (OTA e TOZZI, 1994).

Uma forma elíptica clássica que coincide praticamente com a solução teórica de Kirchhoff é dada pela seguinte equação (OTA e TOZZI, 1994):

$$\frac{x^2}{(2D)^2} + \frac{y^2}{(2D/3)^2} = 1 \quad (2.15)$$

A adoção deste tipo de solução resulta mais atrativa do ponto de vista econômico, uma vez que há redução do volume de concreto na construção do emboque. A forma elíptica em substituição à solução dada por Kirchhoff pode conduzir a pressões negativas no emboque, contudo, o importante é verificar a magnitude destas pressões, evitando valores excessivos que possam sugerir a formação do fenômeno da cavitação.

O *U.S. Army Corps of Engineers* (USACE, 1974) apresenta uma solução muito utilizada para definir a geometria da máscara do emboque, que proporciona bons resultados de pressão. Segundo a referência citada, a forma elíptica deve ser normalmente utilizada, entretanto, em algumas situações é necessário adotar uma combinação de curvas elípticas para prevenir a ocorrência de pressões negativas excessivas.

Na maioria dos casos a geometria apresentada na FIGURA 2.17 é suficiente para evitar pressões muito negativas. A escolha entre as geometrias do emboque deve levar em consideração o fato de que quanto mais curto o emboque, maior é a chance de se ter pressões a ponto de cavitação. Por outro lado, quanto mais longa e gradual for a entrada, maior será o volume de concreto (e o custo da estrutura).

A seguir, apresenta-se a geometria da máscara sugerida pelo *Corps of Engineers*, sendo a forma elíptica representada na FIGURA 2.17 e a combinação de elipses na FIGURA 2.18.

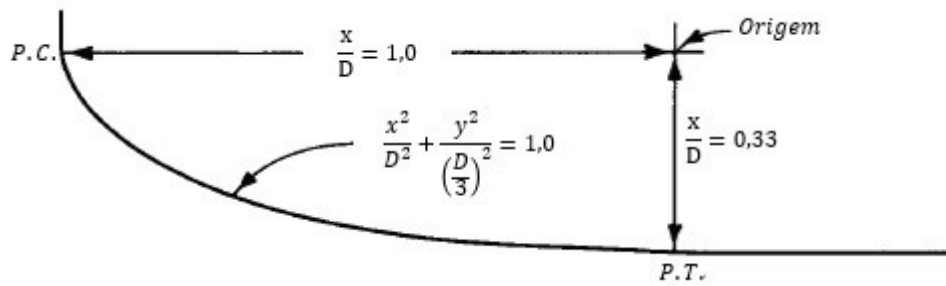


FIGURA 2.17 – MÁSCARA DO EMBOQUE – FORMA ELÍPTICA
Fonte: USACE (1974).

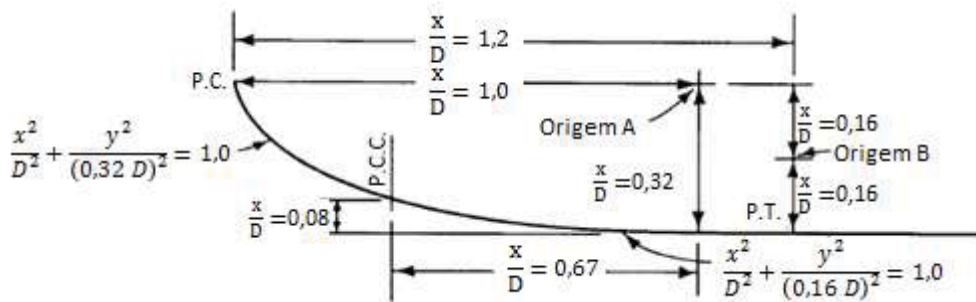


FIGURA 2.18 – MÁSCARA DO EMBOQUE – COMBINAÇÃO DE ELIPSES
Fonte: USACE (1974).

Na etapa de concepção do projeto da adufa, para efeito da estimativa das pressões a se esperar no emboque, normalmente se vale do conceito do coeficiente de queda de pressão definido pelo *U.S. Army Corps of Engineers* (USACE, 1974). O coeficiente de queda de pressão (C) é um número adimensional definido pela expressão:

$$C = \frac{H_d}{V^2/2g} \quad (2.16)$$

Onde:

C = coeficiente de queda de pressão (adimensional);

H_d = queda de pressão a partir da superfície livre do reservatório (m);

g = aceleração da gravidade (m/s^2);

V = velocidade média no conduto (m/s).

Para cada uma das geometrias definidas pela FIGURA 2.17 e pela FIGURA 2.18 há um respectivo gráfico com a representação do coeficiente de queda de pressão contra a relação L/D , onde L representa a distância entre o alinhamento do paramento de montante e a posição da tomada de pressão, e D é a altura da adufa.

Os gráficos obtidos pelo *U.S. Army Corps of Engineers* (USACE, 1974) para as geometrias apresentadas na FIGURA 2.17 e na FIGURA 2.18 estão reproduzidos respectivamente na FIGURA 2.19 e na FIGURA 2.20.

A Figura 2.19 apresenta os resultados obtidos experimentalmente pelo U.S. Army Corps of Engineers (USACE, 1974) considerando a geometria da máscara do emboque conforme apresentado na Figura 2.17, ou seja, a máscara do emboque foi representada por uma elipse.

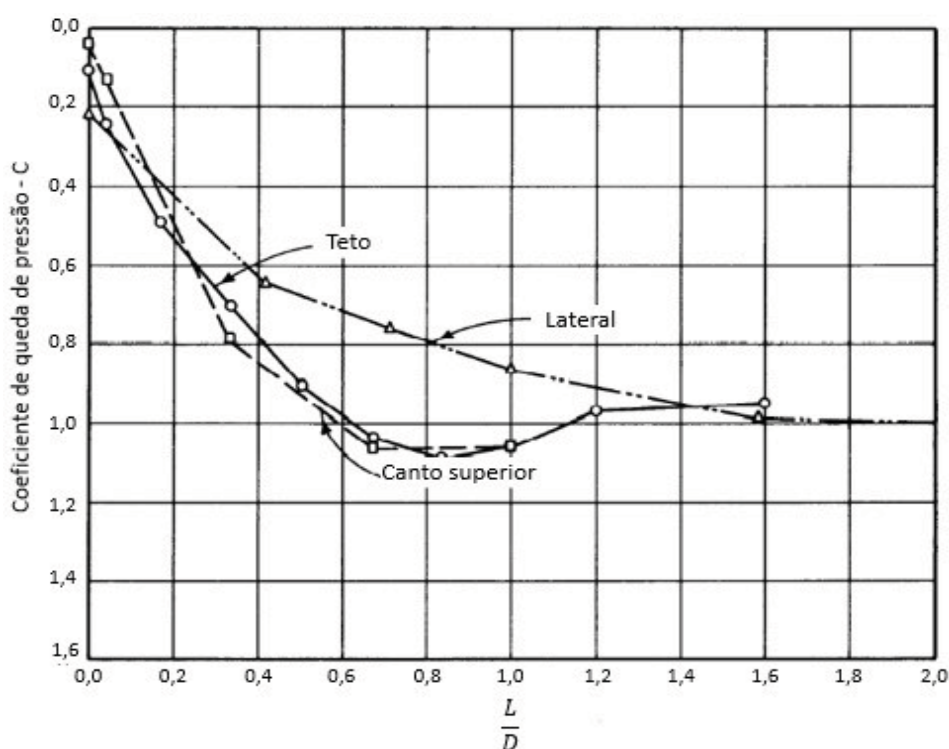


FIGURA 2.19 – COEFICIENTE DE QUEDA DE PRESSÃO – FORMA ELÍPTICA
Fonte: (USACE, 1974) – Chart 211-1.

Da mesma forma, a Figura 2.20 apresenta os resultados obtidos para o emboque formado por uma combinação de elipses (definida pela geometria da Figura 18).

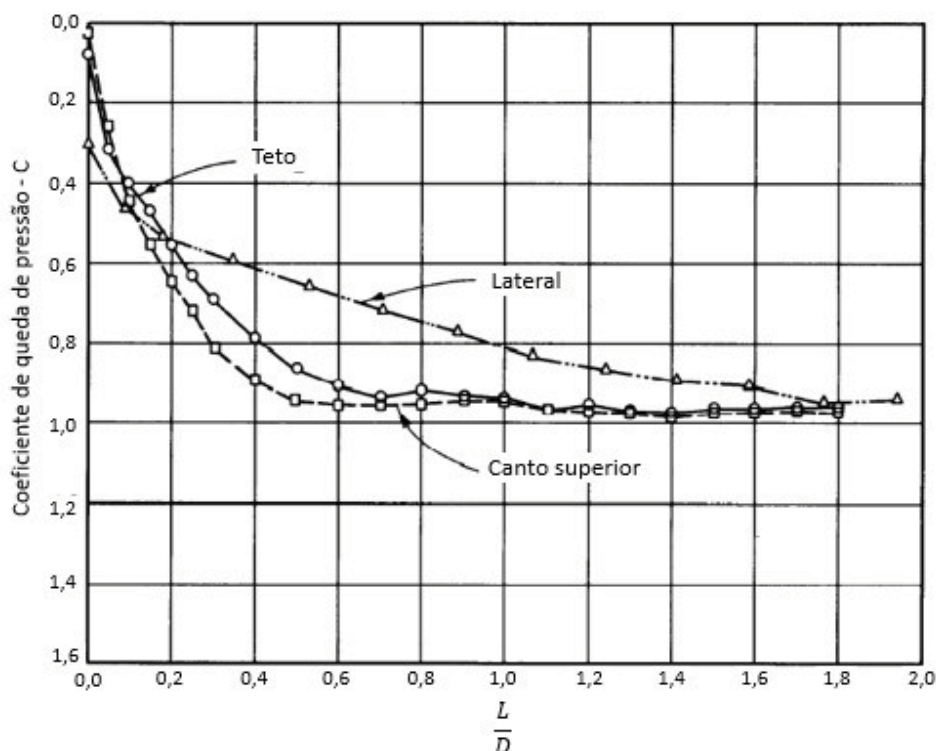


FIGURA 2.20 – COEFICIENTE DE QUEDA DE PRESSÃO – COMBINAÇÃO DE ELIPSES
 Fonte: (USACE, 1974) – Chart 211-1,1/1.

De acordo com esses gráficos (Figuras 2.19 e 2.20) o valor máximo do coeficiente de queda de pressão é da ordem de 1,10 para L/D igual a 0,8, isto é, a queda de pressão máxima é da ordem de $-1,1 \times V^2/2$ g, considerando a geometria da máscara proposta pelo *U.S. Army Corps of Engineers* na FIGURA 2.17.

Outra relação apresentada pelo *U.S. Army Corps of Engineers*, para previsão de pressões na máscara do emboque de adufas, é definida pelo seguinte perfil elíptico:

$$\frac{x^2}{D^2} + \frac{y^2}{(2D/3)^2} = 1 \quad (2.17)$$

Para a geometria da Equação 2.17 o valor máximo do coeficiente de queda de pressão é da ordem de 1,35 para L/D igual a 0,7, ou seja, queda de pressão máxima é da ordem de $-1,35 \times V^2/2$ g, conforme mostra a FIGURA 2.21.

Pode-se observar que o coeficiente de queda de pressão resulta maior quando utilizamos a geometria proposta pela Equação 2.17 em comparação com as

geometrias das Figuras 2.17 e 2.18, isso acontece porque a Equação 2.17 sugere uma elipse menor, o que produz pressões maiores na máscara do emboque.

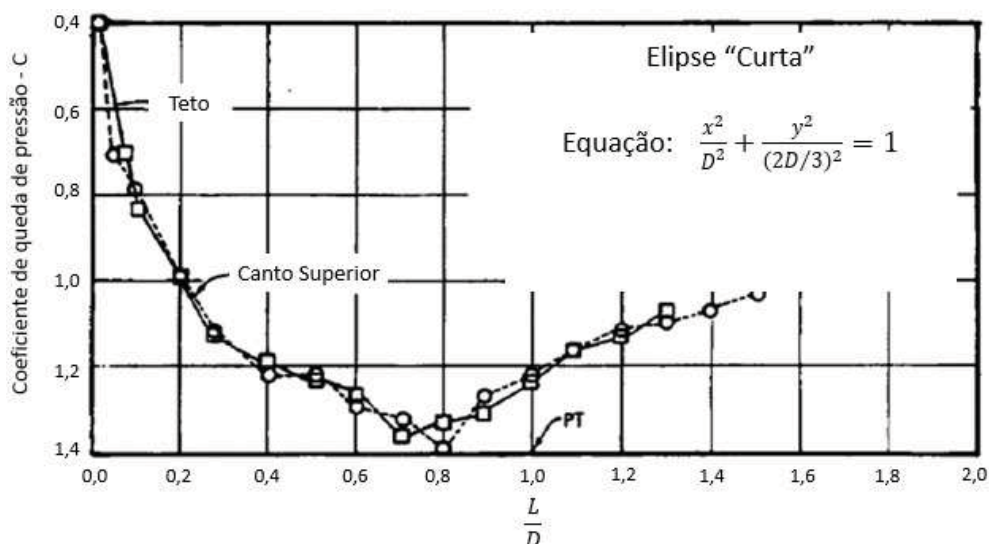


FIGURA 2.21 – COEFICIENTE DE QUEDA DE PRESSÃO – FORMA ELÍPTICA RELATIVAMENTE CURTA
Fonte: USACE (1974) – Chart 221-2, 2/1.

Com base nos estudos realizados *U.S. Army Corps of Engineers*, formalizados nos gráficos para determinação do coeficiente de queda de pressão (Figuras 2.19, 2.20 e 2.21), é possível determinar a pressão em qualquer ponto da máscara do emboque a partir da seguinte equação:

$$P = NA + (Hd - El_{pt}) \quad (2.18)$$

Onde:

P = pressão (mca);

NA = nível de água no reservatório (m);

Hd = queda de pressão a partir da superfície livre no reservatório (m);

El_{pt} = Elevação do ponto onde se pretende conhecer a pressão (m).

A TABELA 2.2 mostra um resumo das equações apresentadas para definir o perfil da máscara do emboque em função da previsão de pressões nessa região. Como comentado, é muito comum em projetos desse tipo de estrutura, se adotar um perfil elíptico que resulte em pressões negativas aceitáveis. O perfil teórico definido

por Kirchhoff, que impõe a pressão atmosférica em toda a extensão da máscara, conduz a uma solução conservadora e desfavorável do ponto de vista econômico, uma vez que esta geometria, além de resultar em um volume maior de concreto, proporciona uma capacidade de descarga menor que uma geometria com um perfil elíptico suave com pressões negativas admissíveis e inferiores ao limite de cavitação.

TABELA 2.2 – FORMAS GEOMÉTRICAS PARA A MÁSCARA DO EMBOQUE E RESPECTIVAS PREVISÕES DE PRESSÕES

Fonte: Autoria Própria.

Equação do Perfil da Máscara do Emboque	Previsão de Pressões	Referência/Fonte
$x = \frac{1}{2} \log \frac{1 + \sqrt{2y - y^2}}{1 - \sqrt{2y - y^2}} - \sqrt{2y - y^2}$	Pressão atmosférica	Gustav Kirchhoff OTA e TOZZI (1994)
$\frac{x^2}{(2D)^2} + \frac{y^2}{\left(\frac{2D}{3}\right)^2} = 1$	Solução que se aproxima da pressão atmosférica	OTA e TOZZI (1994)
$\frac{x^2}{(D)^2} + \frac{y^2}{\left(\frac{D}{3}\right)^2} = 1$	$H_d = -1,1 \frac{V^2}{2g}$ (ver FIGURA 2.19)	USACE (1974)
$\frac{x^2}{D^2} + \frac{y^2}{(0,32D)^2} = 1$ $\frac{x^2}{D^2} + \frac{y^2}{(0,16D)^2} = 1$	$H_d = -0,95 \frac{V^2}{2g}$ (ver FIGURA 2.20)	USACE (1974)
$\frac{x^2}{D^2} + \frac{y^2}{\left(\frac{2D}{3}\right)^2} = 1$	$H_d = -1,35 \frac{V^2}{2g}$ (ver FIGURA 2.21)	USACE (1974)

A FIGURA 2.22 apresenta uma comparação entre três formas de máscara de emboque indicadas na bibliografia, considerando a altura D igual a 10 m. Nessa figura, a geometria da forma elíptica é definida conforme equação apresentada na FIGURA 2.17 e a forma elíptica curta pela equação da FIGURA 2.21. Ambas as geometrias são recomendadas pelo *Corps of Engineers* em alternativa à geometria do perfil

teórico definida por Kirchhoff (jato livre). Observa-se que a geometria do perfil teórico é significativamente maior do que as outras duas geometrias apresentadas, o que justifica a preocupação com questões econômicas e com o processo construtivo.

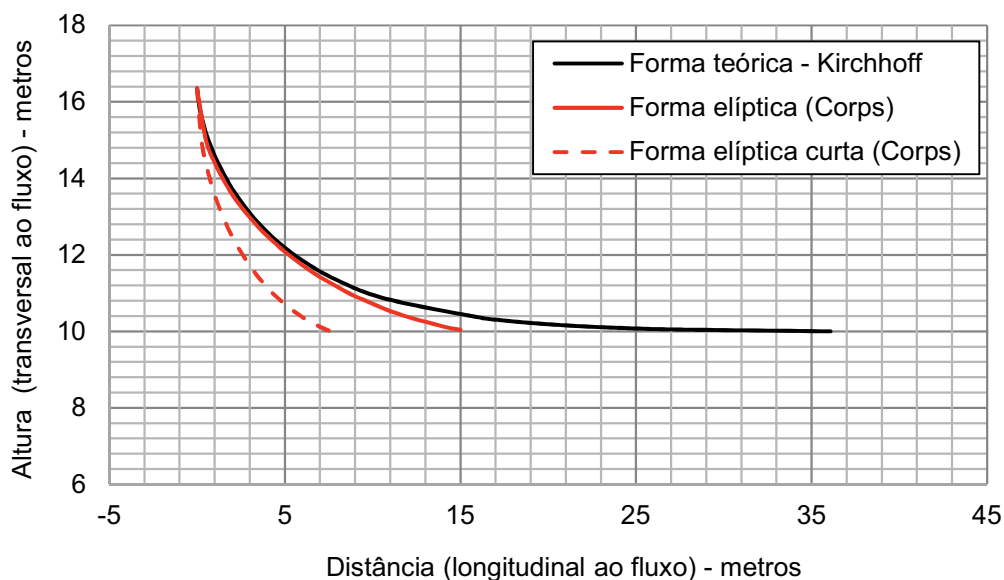


FIGURA 2.22 – CONFRONTO ENTRE AS DIVERSAS FORMAS DA MÁSCARA DO EMBOQUE
Fonte: Autoria Própria.

2.4 DINÂMICA DOS FLUIDOS COMPUTACIONAL

O estudo da dinâmica do fluido é, de uma forma ou de outra, baseado nas três equações fundamentais: Conservação da Massa; Segunda lei de Newton e Conservação da Energia (ANDERSON, 1995). A dinâmica dos fluidos estuda os fluidos em movimento e se fundamenta principalmente na segunda lei de Newton para corpos com aceleração ($\sum F = ma$). O movimento dos fluidos é utilizado para analisar os efeitos das forças sobre o fluido, e o método que descreve numericamente este comportamento é conhecido como dinâmica dos fluidos computacional.

A Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD - *Computational Fluid Dynamics*) é um método para resolver problemas envolvendo fluidos em que as equações de fluxo clássicas, tais como as equações de Navier-Stokes e equação da continuidade, são discretizadas e resolvidas para cada célula computacional.

Pode ser considerada como uma ciência para construir soluções numéricas para as equações de conservação, avançando a solução no espaço e no tempo para obter uma descrição numérica do escoamento (FERREIRA *et al.*, 2010).

A utilização de programas computacionais para simular numericamente o fluxo através de estruturas hidráulicas é, em muitos aspectos, semelhante à criação de um modelo físico reduzido. Se o modelo físico, ou numérico, não está configurado corretamente para simular uma determinada situação, os resultados obtidos não irão representar de forma adequada a realidade.

2.4.1 Equações Governantes

Os fluidos escoam de forma tridimensional, ou seja, as propriedades de fluxo variam em todas as direções e o campo de velocidade é função das coordenadas de posição e tempo. Num escoamento tridimensional, o vetor velocidade apresenta três componentes de velocidade ($U = u_i + v_j + w_k$). Contudo, em alguns casos as variações mais significativas ocorrem unicamente em duas direções, ou até mesmo em uma única direção. Nestes casos, pode-se desprezar as outras direções, o que torna as análises mais simplificadas.

A maioria dos fluidos encontrados na natureza, como a água, o ar e a gasolina, obedecem a Lei da Viscosidade de Newton, onde o valor da viscosidade dinâmica (μ) é constante, e, portanto, são conhecidos como fluidos newtonianos. Se μ é constante, a tensão depende linearmente do gradiente de velocidade e é diretamente proporcional à taxa de deformação (FOX e McDONALD, 2001). Para escoamento unidimensional, a Lei da Viscosidade de Newton é dada por:

$$\tau_{yx} = \mu \frac{du}{dy} \quad (2.19)$$

Onde:

- τ = tensão de cisalhamento (N/m^2);
- μ = viscosidade absoluta ou dinâmica ($kg/m.s$).

Para fluidos newtonianos, as tensões podem ser expressas em termos de gradiente de velocidade e propriedades dos fluidos. Para o caso de fluido incompressível, permanente e com viscosidade constante, as formulações resultam em um conjunto de equações conhecidas como Equações de Navier-Stokes, que

adicionadas à equação da continuidade, descrevem o comportamento de um fluido (FOX e McDONALD, 2001).

A seguir são apresentadas a equação da continuidade e as equações de Navier-Stokes para escoamento incompressível com viscosidade constante.

Equação da continuidade:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (2.20)$$

Equações de Navier-Stokes:

$$\rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) = \rho g_x - \frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \quad (2.21)$$

$$\rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) = \rho g_y - \frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) \quad (2.22)$$

$$\rho \left(\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) = \rho g_z - \frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) \quad (2.23)$$

Na bibliografia é comum encontrar as Equações de Navier-Stokes em notação vetorial, como mostrado na Equação 2.24.

$$\rho \frac{D \vec{V}}{Dt} = \rho \vec{g} - \nabla p + \mu \nabla^2 \vec{V} \quad (2.24)$$

As equações de Navier-Stokes representam o equilíbrio entre transporte da quantidade de movimento e as forças gravitacionais, de pressão e viscosa. Portanto, na Equação 2.24 o termo à esquerda da igualdade representa a variação da massa por unidade de volume vezes a aceleração (transporte de quantidade de movimento) e os termos à direita representam as parcelas das forças (força de campo, força de superfície e força viscosa).

Atualmente, a tecnologia computacional disponível não tem capacidade para resolver os sistemas de equações formados pela equação da continuidade e as três equações de Navier-Stokes.

Segundo MCDONOUGH (2007), é possível estimar o número de equações simultâneas a cada iteração para resolver as equações de Navier-Stokes em um escoamento turbulento, em função do número de Reynolds do escoamento utilizando a Equação 2.25.

$$N \sim Re^{9/4} \quad (2.25)$$

Portanto, para um escoamento turbulento típico em obras hidráulicas, com número de Reynolds da ordem de 10^7 , seria necessária a resolução de 10^{16} equações simultâneas a cada interação. Isso ocorre porque, para resolver completamente as equações de Navier-Stokes, seria necessário resolver as equações até onde as escalas de tensões viscosas têm significado físico, ou seja, escalas capazes de resolver os vórtices onde a dissipação viscosa ocorre.

Desta forma, é usual a utilização da chamada Decomposição de Reynolds, que se trata das Equações de Navier-Stokes reescritas em termos de quantidades médias de velocidade e pressão. Reynolds foi o primeiro a estudar sistematicamente a turbulência e propôs a decomposição do escoamento considerando que estes dois parâmetros (velocidade e pressão) podem ser decompostos em um valor médio e um valor que corresponde à flutuação turbulenta (KUNDU e COHEN, 2008).

As equações obtidas a partir da decomposição de Reynolds associadas às equações de Navier-Stokes resultam nas chamadas equações de Navier-Stokes com média de Reynolds, conhecidas pelo termo em inglês “RANS - *Reynolds Averaged Navier-Stokes*”.

As equações RANS são semelhantes às equações de Navier-Stokes, o que difere é o aparecimento de novos termos que representam a influência das flutuações turbulentas no escoamento. Tais termos criam a necessidade de equações adicionais para resolver o problema, as quais são fornecidas pelos chamados “modelos de turbulência”, para os quais existem várias formulações dependendo do problema que se está analisando. A seguir, apresentam-se as equações RANS.

Equações RANS:

$$\frac{\partial U}{\partial t} + u \frac{\partial U}{\partial x} + v \frac{\partial U}{\partial y} + w \frac{\partial U}{\partial z} = g_x - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \left(\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} \right) - \left(\overline{\frac{\partial u'^2}{\partial x}} + \overline{\frac{\partial u'v'}{\partial y}} + \overline{\frac{\partial u'w'}{\partial z}} \right) \quad (2.26)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + u \frac{\partial V}{\partial x} + v \frac{\partial V}{\partial y} + w \frac{\partial V}{\partial z} = g_y - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \nu \left(\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial z^2} \right) - \left(\overline{\frac{\partial v'u'}{\partial x}} + \overline{\frac{\partial v'^2}{\partial y}} + \overline{\frac{\partial v'w'}{\partial z}} \right) \quad (2.27)$$

$$\frac{\partial W}{\partial t} + u \frac{\partial W}{\partial x} + v \frac{\partial W}{\partial y} + w \frac{\partial W}{\partial z} = g_z - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \nu \left(\frac{\partial^2 W}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 W}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 W}{\partial z^2} \right) - \left(\overline{\frac{\partial w'u'}{\partial x}} + \overline{\frac{\partial w'v'}{\partial y}} + \overline{\frac{\partial w'^2}{\partial z}} \right) \quad (2.28)$$

2.4.2 Modelos de Turbulência

Reynolds em 1883 estudou pela primeira vez o comportamento caótico dos escoamentos turbulentos. O número de Reynolds (Re), dado pela Equação 2.29, é o parâmetro que serve para classificar o tipo do escoamento, em laminar ou turbulento. Não é possível definir com exatidão a transição do escoamento laminar para o turbulento, pois a transição depende do grau de perturbação pré-existente do escoamento.

$$Re = \frac{V L}{\nu} \quad (2.29)$$

Onde:

- Re = número de Reynolds (adimensional);
- V = velocidade (m/s);
- L = comprimento característico (m);
- ν = viscosidade cinemática (m²/s).

A turbulência é uma propriedade que pode ser produzida, dissipada e passível de advecção e difusão. No escoamento turbulento as propriedades do fluido como velocidade, temperatura e pressão estão sujeitas a flutuações no espaço e no tempo. Por isso, para se aproximarem da realidade, os modelos de turbulência devem ser capazes de considerar e representar esses fatos.

Existem muitos modelos de turbulência, cujo critério de classificação está relacionado ao número de equações de transporte consideradas. A equação de transporte é uma equação diferencial que faz um balanço da conservação da turbulência sendo transportada (ABRH, 1989).

Os modelos mais simples são aqueles que não utilizam Equações de Transporte. Modelos deste tipo usam basicamente o conceito de viscosidade turbulenta proposto por Boussinesq em 1877. Este modelo é baseado na analogia entre as tensões viscosas e as tensões de Reynolds, onde se assume que as tensões turbulentas são proporcionais ao gradiente de velocidade média do escoamento, e o coeficiente de proporcionalidade é chamado de viscosidade turbulenta.

Em 1925, o físico alemão Prandtl introduziu o conceito de modelo de turbulência com uma equação de transporte. Segundo Prandtl, o processo turbulento poderia ser visto como um transporte aleatório de “blocos” de partículas fluidas de uma região com certa velocidade para uma outra região com velocidade diferente. A distância deste transporte foi denominada “comprimento de mistura”. Esse conceito é importante porque representa de alguma maneira o tamanho dos vórtices característicos do escoamento.

A partir do conceito de Prandtl surgiram os modelos com duas equações de transporte, capazes de simular a turbulência de um escoamento de forma mais genérica e com bons resultados.

Os modelos com duas equações utilizam a equação de transporte para a energia cinética de turbulência por unidade de massa (k), e outra equação para uma outra variável auxiliar.

Dentre os modelos de turbulência de duas equações, o mais utilizado é o chamado modelo $k - \epsilon$. Este modelo simula a viscosidade turbulenta através de duas equações diferenciais parciais, uma para a energia cinética turbulenta (k), e outra para a taxa de dissipação de energia cinética turbulenta (ϵ). As constantes neste modelo estão em melhor acordo com experimentos, sendo que ϵ aparece naturalmente na equação de k , enquanto que isto não ocorre com as outras variáveis (ABRH, 1989).

No programa computacional FLOW3D® há a possibilidade de se utilizar o modelo de turbulência $k - \epsilon$ RNG (*Renormalized Group Model*), que é capaz de descrever com precisão os escoamentos turbulentos de baixa intensidade e regiões com fortes tensões (FLOW SCIENCE, 2014). Esse modelo foi desenvolvido por Yakhot e Orszag em 1986, e baseia-se na teoria da renormalização de grupos. Este

modelo apresenta as mesmas equações para a energia cinética turbulenta e para a taxa de dissipação turbulenta do modelo $k - \varepsilon$, porém utiliza um coeficiente $c_{\varepsilon 2}$ definido de forma explícita através de equações, enquanto que no modelo $k - \varepsilon$ padrão, os coeficientes são obtidos de forma empírica.

3 MÉTODO

A modelagem computacional tridimensional, da simulação do escoamento em estruturas hidráulicas, não conta com muitos estudos antecedentes devido ao recente desenvolvimento deste tipo de programa (*software*) e a necessidade de computadores com grande capacidade para o cálculo intensivo.

Na ocasião dos estudos de investigação da UHE Salto Caxias, os programas numéricos computacionais não eram tão acessíveis quanto atualmente, sendo a modelagem física a única ferramenta utilizada para estudar o comportamento hidráulico das estruturas.

Hoje em dia, as simulações numéricas podem complementar as investigações em modelo físico, permitindo estudar modificações na geometria sem a necessidade de se repetir em modelo físico cada modificação, e com isso, é possível ganhar agilidade nos estudos e reduzir os custos das investigações em modelo físico.

Como mencionado no item 1.1, o objetivo deste estudo é avaliar se o modelo numérico tridimensional adotado pode ser utilizado como ferramenta de projeto no dimensionamento de adufas de desvio. Sobretudo, estuda-se o potencial do modelo em reproduzir os valores de pressão no emboque de adufas de desvio de rios. E, ao mesmo tempo, apresentar um roteiro para o dimensionamento hidráulico desse tipo de estrutura, avaliando a influência de certos parâmetros do modelo numérico nos resultados.

Para avaliar o desempenho do modelo numérico foram reproduzidos três ensaios realizados no modelo hidráulico reduzido. Os resultados obtidos a partir das simulações numéricas foram comparados com os resultados apresentados pelo laboratório de hidráulica do Centro de Hidráulica e Hidrologia Professor Parigot de Souza - CEHPAR (CEHPAR, 1995).

A modelagem matemática é realizada mediante a utilização do *software* comercial FLOW3D®, desenvolvido pela empresa *Flow Science*, localizada em Santa Fé, nos Estados Unidos.

A pesquisa foi dividida em duas etapas. A primeira – Etapa 1 – concentra-se na busca pelo conhecimento das ferramentas de cálculo disponíveis no programa computacional FLOW3D®, e a segunda – Etapa 2 – é a modelagem propriamente dita das adufas de desvio da UHE Salto Caxias. Em ambas as etapas, os resultados

obtidos nas simulações numéricas são comparados com resultados de modelo hidráulico reduzido.

O fluxograma apresentado na FIGURA 3.1 resume a sequência dos procedimentos metodológicos considerados no desenvolvimento deste trabalho.

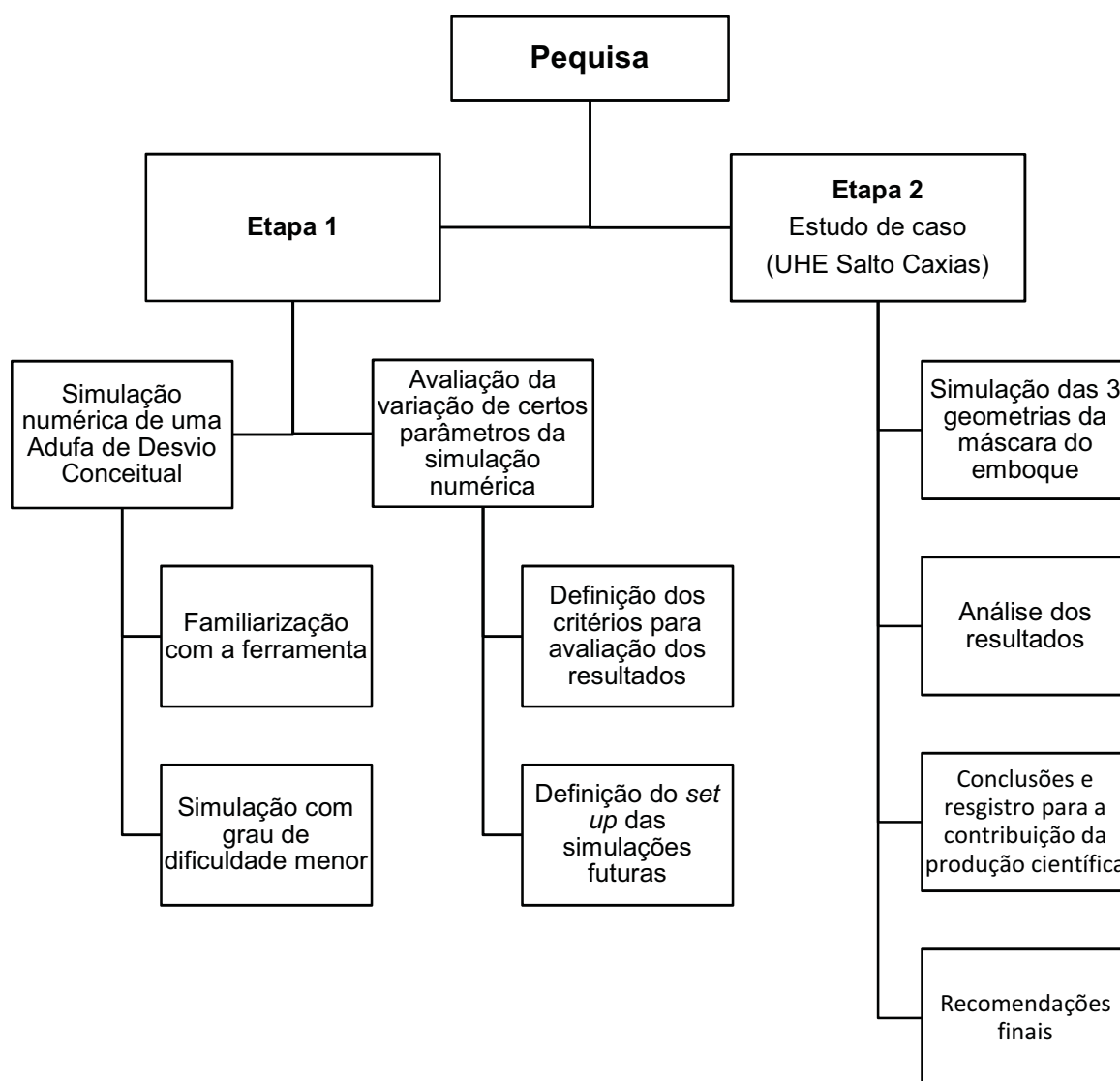


FIGURA 3.1 – FLUXOGRAMA DO MÉTODO DE ESTUDO

A Etapa 1 faz parte da metodologia aplicada no desenvolvimento da pesquisa, e, portanto, apresenta-se ainda neste capítulo. Esta etapa subdivide-se em dois itens, o item 3.1 que apresenta a simulação de uma geometria mais simples (Adufa de Desvio Conceitual) e o item 3.2 que descreve um estudo de sensibilidade realizado para avaliar a influência de alguns parâmetros do modelo numérico na obtenção de resultados.

A Etapa 2, que descreve o estudo de caso onde foram aplicados os conhecimentos obtidos na Etapa 1, é apresentada no capítulo 4.

A seguir apresenta-se o roteiro básico dos estudos, adotado na Etapa 1.

Simulação numérica de uma adufa de desvio conceitual (item 3.1):

- Como mencionado, o programa adotado nessa pesquisa é o FLOW3D®. Esse programa dispõe de uma série de recursos capazes de simular tridimensionalmente escoamentos complexos. Para se familiarizar e adquirir experiência na utilização desse programa, decidiu-se simular uma geometria mais simples, bidimensional, de uma adufa de desvio existente no laboratório da Universidade Federal do Paraná. Os detalhes dessa simulação estão apresentados no item 3.1.
- Na simulação numérica apresentada no item 3.1, não se realizaram variações dos parâmetros para análise de sensibilidade dos resultados obtidos, ou seja, não houve avaliação de geometria, tamanho de malha, variação dos modelos de turbulência e condições de contorno. Os parâmetros adotados no início da simulação produziram os resultados apresentados nesse item.

Avaliação da variação de alguns parâmetros da simulação numérica (item 3.2):

- Modelagem tridimensional da geometria: um dos dados de entrada da simulação numérica é a geometria da estrutura que se pretende estudar. A geometria deve ser representada em três dimensões utilizando um programa de desenho (software). Para desenhar a geometria das adufas de Salto Caxias e criar um modelo tridimensional dessa estrutura utilizou-se o software AUTOCAD. O modelo

3D AUTOCAD foi elaborado a partir dos desenhos em 2D apresentados no relatório do modelo reduzido (CEHPAR, 1995).

- Avaliação da geometria mínima necessária para a modelagem numérica: inicialmente foram realizadas simulações bidimensionais, ou seja, a geometria da adufa considerada na simulação tem largura unitária (uma fatia de adufa de desvio igual a um metro de largura). O objetivo dessas simulações foi obter resultados rapidamente (em poucas horas) e entender como os efeitos tridimensionais afetavam a distribuição de pressões na região da máscara do emboque.
- Definição da malha de elementos: o tamanho dos elementos da malha e sua configuração podem interferir diretamente nos resultados. Para definir uma malha que represente o escoamento através das adufas de desvio de Salto Caxias de maneira satisfatória, e dentro de um prazo de obtenção de resultados razoável, realizou-se uma análise de sensibilidade comparando resultados obtidos com o tempo necessário para solução.
- Imposição das condições de contorno: em todas as simulações foi adotado como condição de contorno de montante o nível de água (carga hidráulica) resultante do modelo hidráulico reduzido e a jusante uma condição de descarga livre (outflow).
- Definição do modelo de turbulência: foram realizadas simulações para avaliar a influência do modelo de turbulência em escoamentos de adufas de desvio.
- Avaliação dos resultados parciais: cada modificação no modelo numérico foi avaliada em termos de resultados obtidos e tempo de simulação. Um dos parâmetros avaliados que contribuiu para a seleção da configuração adotada nas simulações finais das adufas de Salto Caxias foi o parâmetro estatístico RMSE (Root Mean Square Error), ou seja, raiz quadrada do erro quadrático médio. Para cada um dos valores de pressão obtidos no modelo matemático, a equação do RMSE calcula a diferença entre esse valor e o valor obtido no modelo hidráulico reduzido, informando a dispersão dos mesmos. Quanto menor esse parâmetro, mais próximo os resultados do modelo numérico estão do modelo físico reduzido. O parâmetro RMSE é definido pela Equação 3.1.

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_{\text{MHR},i} - X_{\text{SN},i})^2}{n}} \quad (3.1)$$

Onde:

RMSE = Root Mean Square Error – raiz quadrada do erro quadrático médio (m.c.a.);

X_{MHR} = resultados de pressão obtidos do modelo hidráulico reduzidos (m.c.a.);

X_{SN} = resultados de pressão obtidos nas simulações numéricas (m.c.a.);

n = número total de resultados.

- Simulação das adufas de Salto Caxias: após os esclarecimentos obtidos na Etapa 1 dos estudos com relação à geometria, malha de elementos, modelo de turbulência e condições de contorno, foi possível estabelecer critérios para as simulações numéricas do estudo de caso (Capítulo 4). O item 4.3 descreve detalhadamente os modelos numéricos de cada uma das três geometrias estudadas.

3.1 SIMULAÇÃO DE UMA ADUFA DE DESVIO CONCEITUAL

Para familiarização com o programa computacional adotado, decidiu-se analisar o comportamento da máscara do emboque de uma adufa em um canal didático de reduzida largura existente no laboratório da Universidade Federal do Paraná.

A Universidade tem um laboratório didático de mecânica dos fluidos equipado com um canal de paredes transparentes de 4 cm de largura, onde se encontra instalado o modelo reduzido parcial de uma adufa conceitual em escala de 1:250, com máscara de emboque de seção circular (raio = 2 cm), instrumentada com 11 (onze) piezômetros.

O objetivo do uso desse modelo foi estudar a distribuição das pressões na máscara da adufa para o caso bidimensional e efetuar o confronto de resultados da simulação numérica utilizando o FLOW3D®, com os resultados medidos no modelo reduzido e os resultados obtidos através da aplicação da teoria potencial (rede de corrente), que não leva em conta a dissipação turbulenta (perda de energia).

As pressões no emboque da adufa conceitual foram medidas no modelo reduzido a partir da leitura do nível de água nos onze piezômetros instalados.

A FIGURA 3.2 mostra esquematicamente a adufa implantada no laboratório didático.

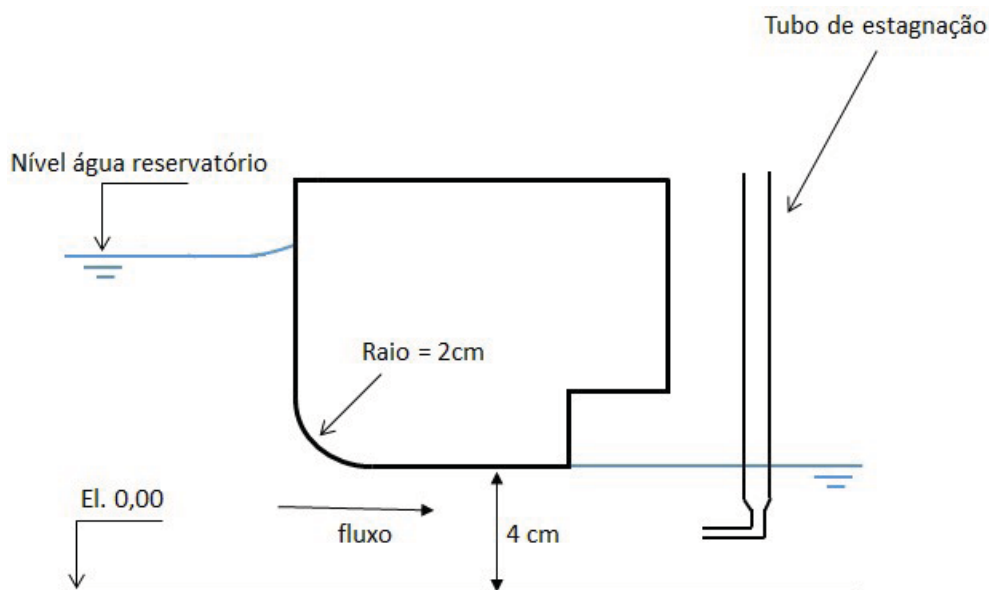


FIGURA 3.2 – ADUFA CONCEITUAL
Fonte: Autoria Própria.

O resultado da rede de corrente é extremamente dependente do cuidado que se toma com seu traçado, contudo a utilização desse método permite identificar a região com maior velocidade, e, conseqüentemente menor pressão.

O modelo numérico da adufa conceitual reproduziu a geometria do modelo reduzido, ou seja, um vão de adufa, com emboque circular de raio igual a 2 cm, implantada em um canal de 4 cm de largura.

A FIGURA 3.3 mostra a geometria da adufa conceitual implantada no modelo numérico. Os pontos amarelos mostrados na figura representam a localização dos pontos de medição do modelo matemático, correspondentes à posição onde foram instalados os piezômetros no modelo reduzido.



FIGURA 3.3 – GEOMETRIA DA ADUFA CONCEITUAL IMPLANTADA NO MODELO NUMÉRICO

Nessa simulação, não foi realizado um estudo de sensibilidade para definir o tamanho dos elementos da malha. Adotou-se uma malha ortogonal com elementos cúbicos de 0,2 cm e 0,1 cm de aresta (dois blocos de malha). Como condição de contorno de montante, foi imposto à simulação o nível de água a montante igual a 10,9 cm (carga hidráulica medida no modelo reduzido) e a jusante a condição de descarga livre (*outflow*).

A FIGURA 3.4 mostra a comparação dos resultados obtidos a partir dos três métodos utilizados para determinação das pressões no emboque da adufa conceitual. Apresentam-se os resultados do modelo reduzido, resultados do traçado da rede de corrente e os resultados obtidos a partir da simulação numérica do escoamento utilizando FLOW3D®.

Nessa figura, a localização dos piezômetros está representada pelos pontos na cor preta e correspondem à localização implantada no modelo reduzido.

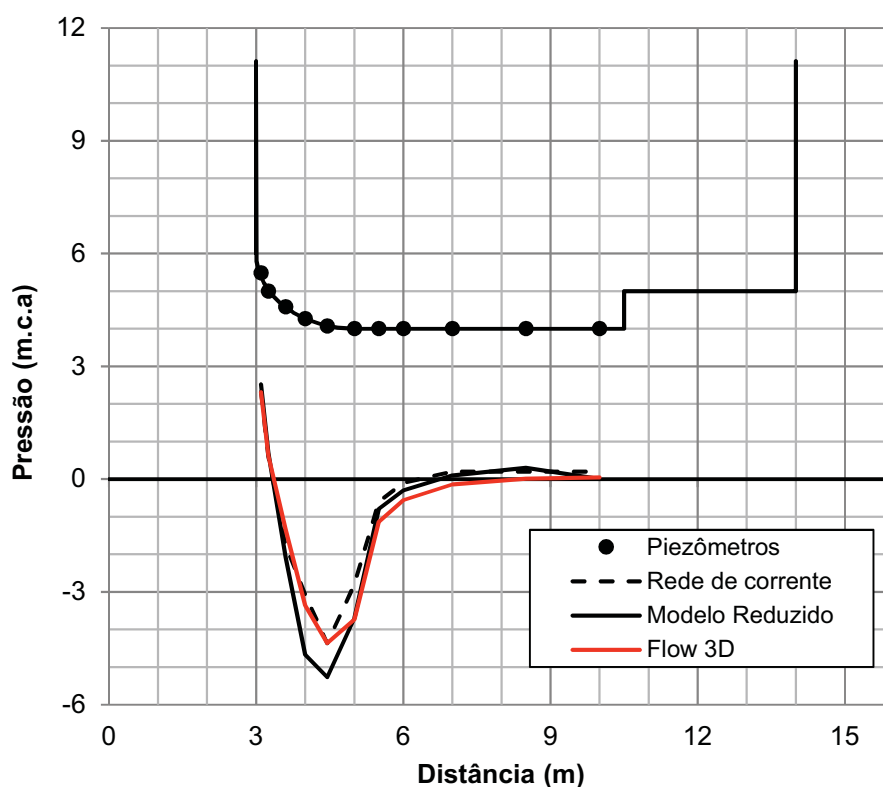


FIGURA 3.4 – RESULTADOS OBTIDOS COM A SIMULAÇÃO NUMÉRICA, MODELO REDUZIDO E TRAÇADO DE REDE DE CORRENTE PARA A ADUFA CONCEITUAL

Conforme apresentado na FIGURA 3.4, para o caso da adufa conceitual, onde se adotou a hipótese bidimensional, os resultados obtidos na simulação numérica

indicam que o uso do FLOW3D® pode auxiliar na previsão das pressões na máscara do emboque de adufas de desvio.

Entretanto, os efeitos tridimensionais, como por exemplo, os efeitos da aproximação do fluxo, podem ser determinantes para o cálculo das pressões no emboque das adufas de desvio, e, portanto, para o caso das adufas de Salto Caxias foi realizada uma análise de sensibilidade onde se levou em consideração esses efeitos, conforme estudado no modelo hidráulico reduzido (ver item 3.2).

3.2 AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DE PARÂMETROS DO MODELO NUMÉRICO NOS RESULTADOS

Este item descreve as simulações numéricas realizadas para identificar a influência de alguns parâmetros na representação do escoamento através de adufas de desvio, visando a determinação de um método para estudos dessa natureza.

Nesta etapa, para cada modificação realizada no modelo numérico, foram obtidos os resultados de pressão na máscara do emboque, capacidade de descarga da estrutura e o esforço computacional (tempo de simulação).

Para comparação dos resultados e definição dos parâmetros, foi selecionada uma única configuração geométrica que deu origem a seis simulações distintas. Nesse estudo, optou-se por modelar a geometria da adufa de desvio da UHE Salto Caxias com emboque definido pelo Modelo 2 (ver Figura 4.2). Essa geometria foi escolhida para a análise de sensibilidade por apresentar valores de pressão no emboque intermediários em relação às outras duas geometrias (CEHPAR, 1995).

Todas as simulações foram realizadas impondo como condição de contorno de montante a carga hidráulica correspondente à vazão de 14.000 m³/s, que representa a máxima vazão ensaiada pelo laboratório de hidráulica do CEHPAR. A capacidade de descarga obtida nas simulações numéricas é um dos parâmetros avaliados nesse estudo, ou seja, para uma mesma carga (nível de água de montante) foi realizada uma comparação entre o valor da vazão obtido no modelo numérico com a vazão de 14.000 m³/s medida no modelo hidráulico reduzido. Essa comparação é apresentada em termos percentuais na TABELA 3.1.

As características principais das seis simulações realizadas nessa etapa estão descritas a seguir:

- **Simulação 1:** Modelo com largura unitária (fatia de 1,0 m) e apenas um bloco de malha de elementos. A malha foi definida com elementos cúbicos de 0,5 m, perfazendo um total de 54.163 elementos. O modelo de turbulência adotado foi o *Renormalized Group Model* (RNG).
- **Simulação 2:** Modelo representando um vão de adufa de desvio sem o pilar central (largura igual a 4,35 m). Malha de elementos com bloco único, definida por cubos de 0,5 m, perfazendo um total de 246.884 elementos. O modelo de turbulência adotado foi o RNG.
- **Simulação 3:** Modelo representando dois vãos de adufa de desvio, sendo um vão central ladeado por duas metades (largura total igual a 12,70 m). Malha de elementos com bloco único, definida por cubos de 0,5 m, perfazendo um total de 601.339 elementos. O modelo de turbulência adotado foi o RNG.
- **Simulação 4:** Modelo representando dois vãos de adufa de desvio, sendo um vão central ladeado por duas metades (largura total igual a 12,70 m). A malha de elementos foi definida a partir da utilização de três blocos com elementos de 0,5 m, 0,25 m e 0,125 m. Nessa simulação o número total de elementos é de 1.705.443 e o modelo de turbulência adotado foi o RNG.
- **Simulação 5:** Essa simulação corresponde à simulação 4, cuja única diferença está no modelo de turbulência adotado, que foi o $k - \epsilon$.
- **Simulação 6:** Modelo representando dois vãos de adufa de desvio, sendo um vão central ladeado por duas metades (largura total igual a 12,70 m). A malha de elementos foi definida a partir da utilização de quatro blocos com elementos de 0,5 m, 0,25 m, 0,125 m e 0,0625. Nessa simulação, o número total de elementos é de 2.617.304 e o modelo de turbulência adotado foi o RNG.

A Tabela 3.1 apresenta um resumo dos estudos realizados para avaliar a influência da geometria, da malha de elementos e do modelo de turbulência nos resultados de pressão no emboque.

As três primeiras simulações (Simulação 1, 2 e 3) foram realizadas com o objetivo de avaliar o domínio representativo da geometria. Dessa forma, a malha de

elementos para as três simulações foi mantida a mesma (bloco único com elementos cúbicos de arestas igual a 0,5 m), variando apenas a abrangência da geometria.

A Simulação 1, com apenas um metro de largura, resultou em um erro na capacidade de descarga da ordem de 5% (13.311 m³/s) e um índice RMSE de 5,3 m.c.a. O RMSE representa a diferença entre o valor medido no modelo reduzido e o valor obtido na simulação numérica. Quanto mais próximo de zero, menor é o erro da aproximação numérica em relação aos resultados obtidos no modelo reduzido.

Na Simulação 2 foi representado um vão completo de adufa de desvio sem a modelagem dos pilares laterais (largura total igual 4,35 m). Essa simulação resultou em valores de pressão mais próximos dos valores obtidos no modelo reduzido (RMSE igual a 4,0 m.c.a.), no entanto, o erro na vazão descarregada pela adufa foi de 7% (12.973 m³/s).

A Simulação 3, que considera a modelagem de um vão central da adufa ladeada por duas metades e dois pilares (largura total de 12,7 m) resultou em um RMSE igual a 4,1 m.c.a. e um erro na capacidade de descarga de 5% (13.262 m³/s).

Com base na análise dos resultados dessas três simulações, verificou-se que os resultados de vazão e pressão no emboque são sensíveis às variações da geometria. Como detalhado mais adiante, no item 4.3.1, adotou-se para as simulações numéricas das adufas da UHE Salto Caxias a representação de dois vãos completos e dois pilares, ou seja, um vão central ladeado por duas metades. As Simulações 4, 5 e 6 seguiram com essa definição de geometria.

A Simulação 4 resultou em valores de pressão no emboque e capacidade de descarga mais próximos dos valores medidos em modelo reduzido, quando comparado aos valores obtidos nas três simulações anteriores. Este fato foi atribuído ao refinamento da malha, sendo que, nessa simulação, houve uma redução de 4 vezes do tamanho dos elementos (menor elemento igual a 0,125 m). O refinamento da malha resulta em uma melhor representação da geometria, evitando descontinuidades na superfície modelada e conduzindo a valores de pressão mais próximos dos valores medidos em modelo hidráulico reduzido. O item 4.3.2 descreve com mais detalhes a influência da malha nos resultados obtidos nas simulações numéricas.

A Simulação 5 mostrou que os modelos de turbulência testados não interferem diretamente nos resultados obtidos. Foram testados dois modelos de turbulência disponíveis no programa computacional FLOW3D®, o RNG e o $k - \varepsilon$.

Esses modelos de turbulência simulam a viscosidade turbulenta através de duas equações diferenciais parciais. A diferença entre eles é que o RNG utiliza um coeficiente de forma explícito através de equações, enquanto que no modelo $k - \varepsilon$ esse coeficiente é obtido de forma empírica (para mais detalhes sobre os modelos de turbulência ver item 2.4.2). Os resultados obtidos na Simulação 4 e 5 são similares entre si, entretanto, observa-se que a Simulação 5 (modelo de turbulência $k - \varepsilon$) se mostrou mais eficiente em termos de esforço computacional (tempo de simulação).

A Simulação 6 representa a simulação mais completa desta bateria de testes. Nessa simulação, a geometria equivalente a dois vãos da adufa de desvio e dois pilares (largura total de 12,7 m) foi discretizada por quatro blocos de malha, com elementos cúbicos de arestas igual a 0,5 m, 0,25, 0,125 e 0,0625. A influência do refinamento da malha se mostrou bastante preponderante na obtenção de valores de pressão no emboque mais próximos dos valores medidos no modelo hidráulico reduzido. Nessa simulação, o RMSE resultou em 2,0 m.c.a. e o erro na vazão descarregada pela adufa de desvio é da ordem de 4%, conforme mostra a TABELA 3.1.

TABELA 3.1 – RESUMO DAS SIMULAÇÕES REALIZADAS PARA DEFINIR OS PARÂMETROS A SEREM ADOTADOS NAS SIMULAÇÕES DAS ADUFAS DE DESVIO DA UHE SALTO CAXIAS

SIMULAÇÃO	GEOMETRIA	MALHA DE ELEMENTOS	NÚMERO DE ELEMENTOS	TEMPO DE SIMULAÇÃO	MODELO DE TURBULÊNCIA	ERRO NA VAZÃO (%)	ÍNDICE RMSE
1	Bidimensional Largura unitária ("fatia" de 1 m de largura)	Malha única com elementos de 0,5 m	54.163	16 minutos	RNG	5%	5,3 m.c.a.
2	Bidimensional Um vão da adufa sem pilar (largura igual a 4,35 m)	Malha única com elementos de 0,5 m	246.884	4 horas	RNG	7%	4,0 m.c.a.
3	Tridimensional Dois vãos da adufa e dois pilares (largura igual a 12,70 m)	Malha única com elementos de 0,5 m	601.399	10 horas	RNG	5%	4,1 m.c.a.
4	Tridimensional Dois vãos da adufa e dois pilares (largura igual a 12,70 m)	Três blocos de malha com elementos de 0,5 m, 0,25 m, e 0,125 m	1.705.443	4 dias	RNG	4%	2,4 m.c.a.
5	Tridimensional Dois vãos da adufa e dois pilares (largura igual a 12,70 m)	Três blocos de malha com elementos de 0,5 m, 0,25 m, e 0,125 m	1.705.443	3 dias	k – ε	4%	2,4 m.c.a.
6	Tridimensional Dois vãos da adufa e dois pilares (largura igual a 12,70 m)	Três blocos de malha com elementos de 0,5 m, 0,25 m, 0,125 m e 0,0625	2.617.304	8 dias	RNG	4%	2,0 m.c.a.

A TABELA 3.2 apresenta os valores de pressão obtidos para cada uma das seis simulações realizadas nesta etapa dos estudos. Em destaque, estão os valores mínimos de pressão obtidos em cada simulação. Observa-se que a posição em que ocorreu a mínima pressão mudou conforme a variação dos parâmetros analisados, sendo que, para a Simulação 6, a pressão mínima foi registrada na mesma posição medida no modelo hidráulico reduzido (piezômetro 13).

TABELA 3.2 – PRESSÕES NA MÁSCARA DO EMBOQUE

Piezômetro	Pressão (metros de coluna de água - m.c.a)						
	MHR *	Simulação 1	Simulação 2	Simulação 3	Simulação 4	Simulação 5	Simulação 6
P1	10,13	2,12	11,50	11,98	8,71	8,66	8,69
P2	7,77	-1,50	9,19	9,75	6,62	6,56	6,18
P3	4,00	-5,77	5,74	6,36	3,78	3,72	2,90
P4	-1,20	-9,06	1,82	2,41	-0,85	-0,90	-1,28
P5	-3,60	-10,20	-0,76	-0,25	-2,49	-2,53	-2,89
P6	-5,83	-10,85	-2,83	-2,41	-4,91	-4,94	-5,13
P7	-8,99	-9,89	-3,55	-3,25	-5,97	-6,00	-6,59
P8	-9,07	-10,43	-4,99	-4,81	-8,05	-8,08	-7,79
P9	-7,79	-10,28	-5,88	-5,81	-9,02	-9,04	-8,36
P10	-10,43	-9,51	-5,84	-5,86	-8,85	-8,87	-9,56
P11	-9,55	-9,28	-6,31	-6,44	-8,27	-8,28	-8,41
P12	-12,08	-9,09	-6,58	-6,82	-8,34	-8,36	-8,60
P13	-12,58	-8,37	-6,28	-6,61	-8,43	-8,44	-10,19
P14	-12,02	-7,61	-5,84	-6,26	-7,06	-7,07	-7,74
P15	-9,18	-5,85	-4,52	-4,98	-6,76	-6,76	-7,40
P16	-6,37	-2,79	-2,27	-2,53	-3,79	-3,80	-3,80

* MHR – Modelo Hidráulico Reduzido

A TABELA 3.3 apresenta a diferença entre os valores de pressão na máscara do emboque medidos no modelo hidráulico reduzido e os valores obtidos em cada uma das seis simulações numéricas realizadas nesta etapa. A maior diferença encontrada entre os valores de pressão foi registrada na Simulação 1, cujo valor é da

ordem de 9 metros de coluna de água. Na Simulação 6, a qual apresentou os melhores resultados, essa diferença é da ordem de 4 metros de coluna de água.

TABELA 3.3 – DIFERENÇAS ENTRE OS VALORES DE PRESSÕES NA MÁSCARA DO EMBOQUE MEDIDOS NO MODELO HIDRÁULICO REDUZIDO E OS VALORES OBTIDOS NAS SIMULAÇÕES NUMÉRICAS

Piezômetro	Pressão (metros de coluna de água - m.c.a.)					
	Simulação 1	Simulação 2	Simulação 3	Simulação 4	Simulação 5	Simulação 6
P1	-8,0	1,4	1,9	-1,4	-1,5	-1,4
P2	-9,3	1,4	2,0	-1,2	-1,2	-1,6
P3	-9,8	1,7	2,4	-0,2	-0,3	-1,1
P4	-7,9	3,0	3,6	0,3	0,3	-0,1
P5	-6,6	2,8	3,4	1,1	1,1	0,7
P6	-5,0	3,0	3,4	0,9	0,9	0,7
P7	-0,9	5,4	5,7	3,0	3,0	2,4
P8	-1,4	4,1	4,3	1,0	1,0	1,3
P9	-2,5	1,9	2,0	-1,2	-1,2	-0,6
P10	0,9	4,6	4,6	1,6	1,6	0,9
P11	0,3	3,2	3,1	1,3	1,3	1,1
P12	3,0	5,5	5,3	3,7	3,7	3,5
P13	4,2	6,3	6,0	4,1	4,1	2,4
P14	4,4	6,2	5,8	5,0	5,0	4,3
P15	3,3	4,7	4,2	2,4	2,4	1,8
P16	3,6	4,1	3,8	2,6	2,6	2,6

A FIGURA 3.5 apresenta graficamente o confronto entre os resultados de pressões no teto, ao longo do eixo central da adufa de desvio, medidos no modelo hidráulico reduzido e os valores obtidos nas simulações numéricas. No gráfico, o eixo das abcissas representa a localização das posições de medição de pressão em relação a entrada do emboque da adufa de desvio, e nas ordenadas está sendo representada a cota piezométrica obtida (pressão em metros de coluna de água mais a elevação do piezômetro).

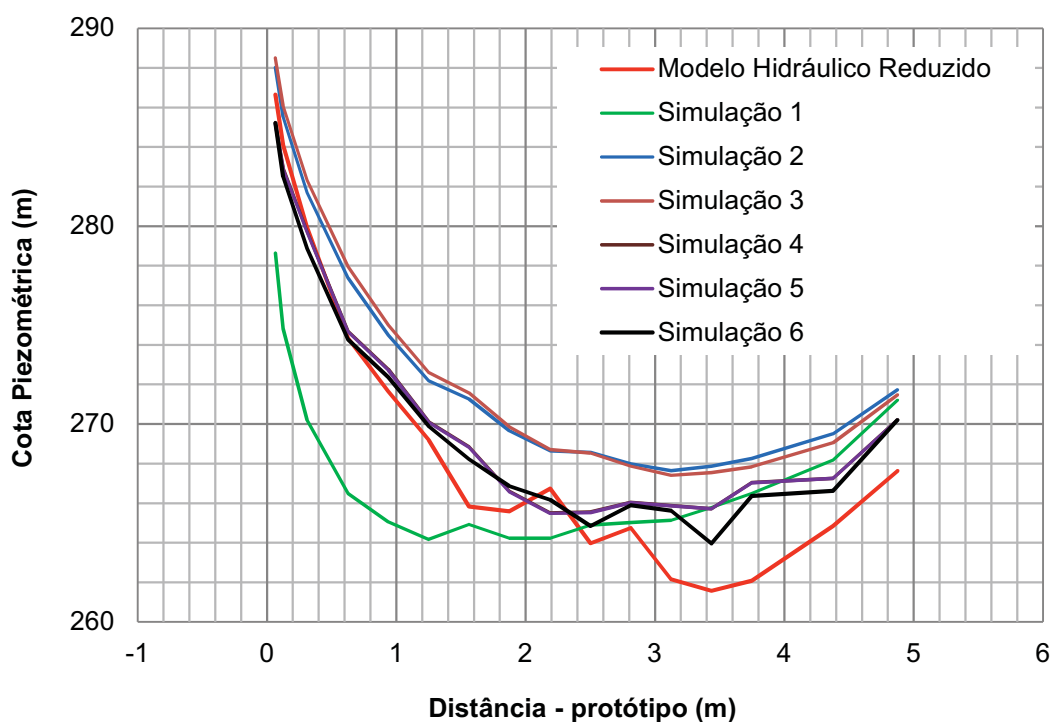


FIGURA 3.5 – PRESSÕES NO TETO AO LONGO DO EIXO CENTRAL DA ADUFA DE DESVIO

Como base na avaliação dos resultados obtidos nessa etapa dos estudos, foi possível obter as seguintes conclusões preliminares:

- **Geometria:** observou-se que os efeitos tridimensionais, atribuídos à aproximação do escoamento às adufas de desvio, são relevantes na obtenção dos valores de pressão no emboque. Dessa forma, nas simulações seguintes esse fato foi considerado, julgando-se necessária a modelagem de dois vãos completos das adufas de desvio, sendo um vão central ladeado por duas metades de adufas (incluindo a modelagem do pilar central).
- **Malha:** o refinamento da malha interfere diretamente nos resultados e no tempo de simulação. Com base nos resultados obtidos e tempos de processamento de cada simulação realizada nessa fase, verificou-se que o máximo refinamento desejável para a malha são elementos cúbicos de arestas 0,0625 m. Uma malha com elementos menores exigiria um esforço computacional além do tempo disponível para os estudos desta pesquisa.

- **Modelo de turbulência:** o modelo k- ϵ apresentou resultados semelhantes aos obtidos com o outro modelo testado (RNG) e exigiu um esforço computacional menor, portanto, todas as simulações seguintes adotaram o modelo k- ϵ como modelo de turbulência.

Após definidos os parâmetros mais relevantes foram realizadas as simulações numéricas do estudo de caso proposto nesta pesquisa, conforme apresentado no Capítulo 4.

O Capítulo 4 descreve detalhadamente os parâmetros adotados nas simulações numéricas das adufas de desvio da Usina de Salto Caxias (estudo de caso) e apresenta também uma breve descrição do arranjo da usina, bem como os estudos em modelo hidráulico reduzido realizados pelo laboratório de hidráulica do CEHPAR.

4 ESTUDO DE CASO – UHE SALTO CAXIAS

Para subsidiar os estudos desta pesquisa e validar as análises numéricas no programa computacional adotado, buscaram-se resultados de modelo hidráulico reduzido de usinas já em operação. A usina selecionada para o estudo de caso foi a UHE Salto Caxias, por apresentar vários registros dos ensaios realizados no modelo hidráulico reduzido e por atender aos requisitos dessa análise.

O emboque das adufas de desvio de Salto Caxias foi amplamente estudado pelo Centro de Hidráulica e Hidrologia Professor Parigot de Sousa (CEHPAR). Foram realizados ensaios para otimização da forma da máscara do emboque, dando ênfase às distribuições de pressões obtidas para três configurações distintas dessa máscara.

Em função da constatação de pressões muito baixas na máscara superior do emboque da adufa de desvio da UHE Salto Caxias, para a geometria inicialmente definida pela projetista, houve a necessidade de se realizar investigações no modelo reduzido considerando mudanças na configuração das adufas.

A verificação das pressões ao longo da máscara do emboque foi realizada inicialmente para a configuração do projeto básico, com a máscara formada por uma superfície circular definida por um único raio. Considerando que as pressões negativas observadas na máscara circular poderiam conduzir à ocorrência de cavitação na estrutura de concreto, devido às altas velocidades do escoamento nessa região, foram estudadas outras duas geometrias considerando a máscara do emboque com forma elíptica.

Nessa pesquisa, são reproduzidos no modelo computacional tridimensional os três testes realizados pelo laboratório em modelo hidráulico reduzido. Embora os testes no modelo reduzido tenham sido realizados para uma faixa de vazões, as análises numéricas realizadas para as adufas de Salto Caxias se concentraram na simulação do escoamento com a vazão de 14.000 m³/s (máxima vazão estudada pelo CEHPAR).

4.1 DESCRIÇÃO DO ARRANJO GERAL DA USINA

A UHE Salto Caxias está localizada no rio Iguaçu, aproximadamente a 95 km a jusante da UHE Salto Osório. As obras de construção tiveram início em 1995 e a primeira unidade entrou em operação quatro anos depois (1999).

A usina conta com quatro unidades geradoras do tipo Francis de 310 MW cada, perfazendo um total de 1.240 MW de potência instalada.

As estruturas que compõem o barramento são: barragem, vertedouro controlado, adufas de desvio e adufas de compensação, sendo que estas últimas foram executadas para possibilitar a descarga da vazão sanitária durante a fase de enchimento do reservatório.

A barragem foi executada com concreto compactado a rolo (CCR) e possui 1.100 m de comprimento, 67 m de altura máxima e coroamento na elevação 325,00 m.

O vertedouro é de concreto convencional controlado por 14 comportas tipo segmento de 16,50 m de largura por 20,00 m de altura, dimensionado para passar a cheia de 49.600 m³/s (CMP - cheia máxima provável).

O desvio de segunda fase foi realizado através de 15 adufas de desvio, executadas do lado direito do rio, sob o vertedouro. Cada passagem tem 4,50 m de largura e 10,00 m de altura. As adufas foram dimensionadas para escoar a vazão de 9.000 m³/s, correspondente ao tempo de recorrência (TR) de 10 anos.

Para permitir a passagem da vazão sanitária de 300 m³/s durante o enchimento do reservatório, foram previstas duas adufas de compensação, executadas junto à margem esquerda do rio. Ambas foram construídas com 2,40 m de largura e 3,50 m de altura.

O circuito de geração é composto por uma tomada de água convencional com quatro aberturas, com seus respectivos condutos forçados metálicos.

Mais detalhes sobre o arranjo geral da UHE Salto Caxias podem ser encontrados no documento “Relatório Final do Projeto de Engenharia e Estudos Ambientais” (COPEL, 2000).

4.2 ESTUDOS EM MODELO HIDRÁULICO REDUZIDO

Os resultados dos estudos em modelo hidráulico reduzido do desvio de segunda fase da UHE Salto Caxias estão consolidados no relatório “Estudos Hidráulicos em Modelo Reduzido do Aproveitamento Hidrelétrico de Salto Caxias” (CEHPAR, 1995).

Os estudos das adufas de desvio foram realizados em três grupos de testes:

- **Ensaio 1 (modelo geral – escala 1:100):** verificação do desempenho hidráulico das adufas de desvio considerando a máscara superior do emboque com forma circular e raio igual a 3,0 m (FIGURA 4.1).
- **Ensaio 2 (modelo seccional – escala 1:30):** verificação do desempenho hidráulico das adufas de desvio considerando a máscara superior do emboque com forma elíptica com semi-eixos de 5,0 m e 3,0 m (FIGURA 4.2).
- **Ensaio 3 (modelo seccional – escala 1:30):** verificação do desempenho hidráulico das adufas de desvio considerando a máscara superior do emboque com forma constituída de um trecho de 5,2 m de elipse com semi-eixos de 10,0 m e 4,0 m (FIGURA 4.3).

ENSAIO 1 (modelo geral):

Os primeiros estudos das adufas de desvio da UHE Salto Caxias foram desenvolvidos no modelo geral construído na escala geométrica de 1:100, no qual foram reproduzidas a barragem principal, as adufas de desvio e a ensecadeira de 2ª fase.

Nesses ensaios foram efetuados levantamentos das condições de aproximação das adufas, determinação da capacidade de descarga e determinação de pressões no teto, no fundo e nos pilares.

No Ensaio 1 foi reproduzida a geometria definida no Projeto Básico. As adufas de desvio foram inicialmente projetadas com a máscara do emboque formada por uma superfície circular definida por um raio de 3,0 m. A parte da barragem foi implantada de forma simplificada, sem a estrutura do vertedouro devido ao prazo estabelecido na ocasião para conclusão dos estudos. A FIGURA 4.1 apresenta a geometria da máscara do emboque adotada no Ensaio 1.

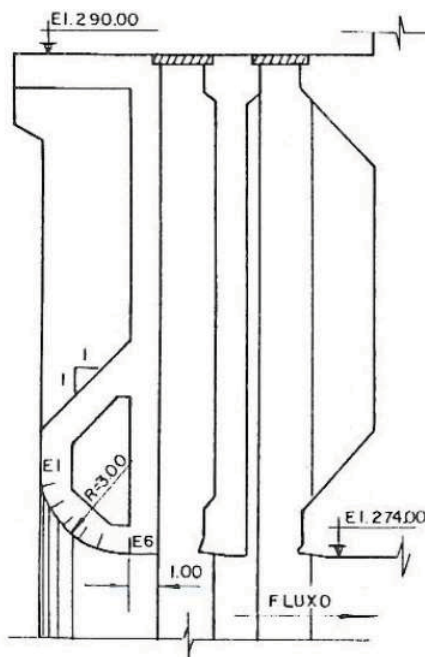


FIGURA 4.1 – MÁSCARA DO EMBOQUE – GEOMETRIA CIRCULAR – ENSAIO 1
 Fonte: (OLINGER, *et al.*, 1995).

A máscara do emboque da adufa central (n° 8) foi instrumentada com seis piezômetros convencionais ao longo do seu eixo. A verificação do desempenho hidráulico da estrutura e o estudo de pressões foram realizados para vazões de até 14.000 m³/s.

Os resultados desse grupo de testes mostraram que as pressões (transportadas a valores de protótipo) no emboque variaram de -10,60 a -16,60 metros de coluna de água (m.c.a) para a vazão de 14.000 m³/s, pressões que levariam a água à evaporação no protótipo. Portanto, ultrapassam o limite da pressão que se pode transpor diretamente ao protótipo.

Em função da constatação de pressões muito baixas e instabilidades na máscara superior do emboque, o que poderia conduzir à ocorrência da cavitação, modificou-se a máscara para uma forma elíptica com semi-eixos de 5,0 m e 3,0 m. Essa geometria foi estudada no Ensaio 2, descrito a seguir.

ENSAIO 2 (modelo seccional):

O grupo de testes do Ensaio 2 se caracterizou pela adoção de uma máscara do emboque com forma elíptica. Tradicionalmente, a forma elíptica é recomendada

para emboques de estruturas de pequeno comprimento com altas velocidades (USACE, 1980).

Como o modelo geral na escala de 1:100 pode apresentar efeitos de escala, o Ensaio 2 foi conduzido em uma escala maior. O modelo 2 foi construído na escala de 1:30, em um canal de alvenaria existente no CEHPAR, onde foi reproduzida uma passagem central ladeada por duas metades de adufa.

Nessa configuração, foi adotada uma nova forma para a máscara do emboque, constituída de uma elipse com semi-eixos medindo 5,0 m e 3,0 m.

A FIGURA 4.2 apresenta a geometria da máscara do emboque adotada no Ensaio 2.

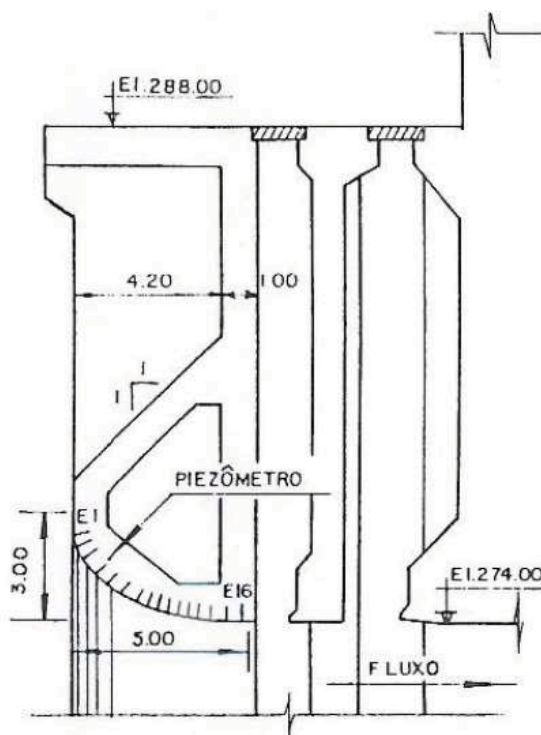


FIGURA 4.2 – MÁSCARA DO EMBOQUE – GEOMETRIA ELÍPTICA – ENSAIO 2

Fonte: (OLINGER, *et al.*, 1995).

Conforme descrito no relatório do modelo reduzido (CEHPAR, 1995), os resultados obtidos nos testes realizados para as mesmas condições de vazão do Ensaio 1, revelaram elevados valores de pressões negativas, da mesma ordem de grandeza que os obtidos anteriormente com a máscara circular. Fato que se justifica pela semelhança entre as formas das máscaras do emboque.

Um confronto entre a máscara circular do Ensaio 1 e a máscara elíptica do Ensaio 2 revela que não há grandes diferenças entre elas, e, portanto, não poderiam resultar em alterações significativas nos valores de pressão.

Os testes do Ensaio 2 registraram pressões mínimas de -12,58 m.c.a (valor de protótipo) para a vazão de 14.000 m³/s (Ensaio 1 = -16.60 m.c.a).

A curva elíptica recomendada na bibliografia (USACE, 1980) é definida pela Equação 4.1.

$$\frac{X^2}{D^2} + \frac{Y^2}{\left(\frac{2D}{3}\right)^2} = 1 \quad (4.1)$$

Onde:

X, Y = representam os semi-eixos da elipse (m);

D = diâmetro/altura da adufa (m).

Considerando o diâmetro das adufas de Salto Caxias igual a 10 m, a elipse adotada no Ensaio 2, de semi-eixos iguais a 5 m e 3 m, é definida pela Equação 4.2. Essa elipse se caracteriza como uma forma pior do que a recomendada pela Equação 4.1 por ser relativamente curta, aproximando-se de uma máscara circular.

$$\frac{X^2}{(0,5D)^2} + \frac{Y^2}{(0,3D)^2} = 1 \quad (4.2)$$

Em função dos resultados obtidos pelo CEHPAR para os Ensaio 1 e 2, uma forma elíptica com uma curva mais longa foi adotada para o grupo de testes do Ensaio 3, conforme descrito a seguir.

ENSAIO 3 (modelo seccional):

O Ensaio 3 testou um trecho de 5,2 m de curva elíptica com semi-eixos de 10 m e 4 m. Essa curva ficou limitada ao comprimento de 5,2 m a partir do paramento de montante, resultando nesta posição em uma tangente diferente de zero com relação ao teto da adufa com a horizontal (ângulo de 12° 20'43").

O estudo dessa alternativa no modelo parcial conduziu a valores de pressão significativamente melhores que os obtidos nas configurações anteriores (Ensaio 1 e Ensaio 2). A mínima pressão registrada no teto da adufa para a vazão de 14.000 m³/s foi de -7,45 m.c.a (valor de protótipo).

Os resultados de pressão obtidos no Ensaio 3 foram considerados como aceitáveis e essa configuração do emboque foi adotada para o projeto das adufas de desvio de Salto Caxias.

A FIGURA 4.3 apresenta a configuração da máscara do emboque implantada no Modelo 3.

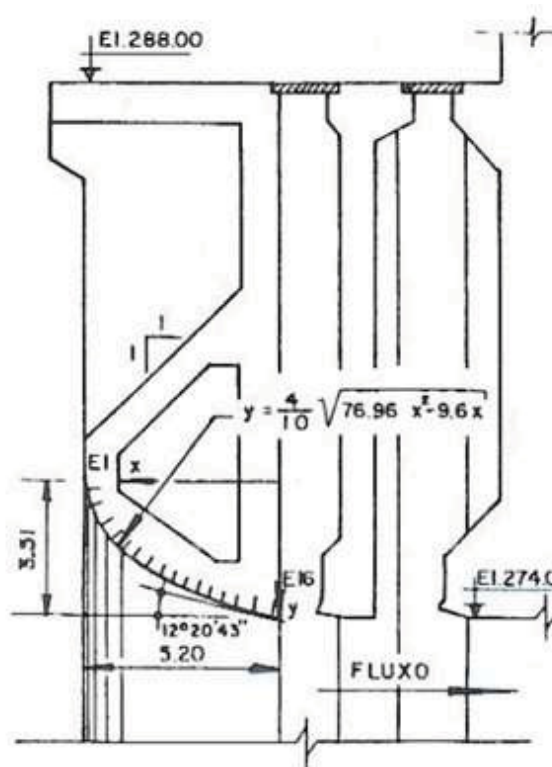


FIGURA 4.3 – MÁSCARA DO EMBOQUE – GEOMETRIA ELÍPTICA – ENSAIO 3
Fonte: (OLINGER, *et al.*, 1995).

4.3 MODELO NUMÉRICO

O modelo numérico adotado neste trabalho foi o FLOW3D®, desenvolvido pela companhia *Flow Science Inc* (FLOW SCIENCE, 2014). Este programa resolve numericamente as equações governantes que caracterizam o escoamento utilizando

os conceitos da Dinâmica dos Fluidos Computacional (*Computational Fluid Dynamics* - CFD).

O programa FLOW3D® é baseado no método dos volumes finitos para resolução das equações de Navier-Stokes e da continuidade, que constituem um modelo teórico representativo da dinâmica dos fluidos newtonianos. Essas equações são equações diferenciais de segunda ordem, não lineares, onde a solução numérica depende da aproximação dos termos que as compõe com expressões algébricas. Existem duas maneiras de se obter as equações aproximadas no método dos volumes finitos. A primeira é a realização de balanços da propriedade em questão nos volumes finitos, e a segunda é, partindo-se da equação diferencial em forma convectiva e integrá-la sobre o volume no espaço e no tempo (MALISKA, 1995).

A região que se pretende simular numericamente é discretizada mediante a definição de uma malha ortogonal de elementos, onde são aplicadas as equações mencionadas. O FLOW3D® permite modelar geometrias complexas devido à formulação “FAVOR – *Fractional Area/Volume Obstacle Representation Method*”. Nesse método a geometria é definida com base na parcela das células ocupadas pelo sólido. Desta forma, o programa exclui do cálculo as células que não contribuem para o fluxo (FLOW SCIENCE, 2014).

Um aspecto importante presente no modelo numérico utilizado é a capacidade deste em modelar escoamentos turbulentos através de vários modelos de turbulência. É possível selecionar o modelo que melhor representa as características envolvidas na análise do problema. São seis os modelos de turbulência disponíveis no FLOW3D®: *Prandtl Mixing-Length Model*, *One-Equation*, *Two-Equation* ($k - \epsilon$), ($k - \omega$), *Renormalized Group Model (RNG)* e *Large Eddy Simulation Model (LES)*.

Os itens a seguir descrevem as etapas mais relevantes do processo da modelagem numérica adotada para simular as adufas de desvio de Salto Caxias.

4.3.1 Geometria

Em modelos numéricos, a representação da geometria é um item importante, deve-se buscar o equilíbrio entre o detalhamento necessário e o tempo computacional disponível.

A rotina do programa FLOW3D® permite modelar fluxos tridimensionais de grande complexidade graças ao método “FAVOR” - *Fractional Area/Volume Obstacle*

Representation Method. Este método estabelece critérios para definir a geometria com base na parcela das células ocupadas pelo sólido, sendo possível modelar contornos complexos mesmo trabalhando com uma malha ortogonal (FLOW SCIENCE, 2014). Entretanto, é importante avaliar previamente a necessidade de cada detalhe da geometria, evitando reproduzir superfícies que não agregam informações aos resultados.

Assim como em outras estruturas hidráulicas, as adufas de desvio apresentam detalhes construtivos com baixa influência nos resultados. Por exemplo, quando se está buscando avaliar a capacidade de descarga de uma adufa, as ranhuras das comportas não representam um item de extrema relevância; é possível excluir as ranhuras, deixando a geometria da adufa mais simples, sem prejuízos nos resultados de capacidade de descarga. Esta simplificação da geometria evita a necessidade de se ter elementos muito pequenos nessa região, ganhando tempo de simulação. Por outro lado, se o foco do estudo for pressões nas ranhuras, a representação da ranhura no modelo matemático é essencial.

Como o objetivo é estudar numericamente as pressões no emboque das adufas de desvio de Salto Caxias, é importante que a representação da geometria no modelo matemático seja a mais fiel possível em relação ao implantado no modelo físico reduzido pelo laboratório do CEHPAR.

O modelo 3D da geometria das adufas foi elaborado mediante a utilização do *software* de desenho AUTOCAD, que é amplamente utilizado em projetos de obras civis. Para que seja possível a interpretação desta geometria pelo FLOW3D®, é necessário salvar o modelo elaborado no AUTOCAD em formato “stl” (estereolitografia).

Conforme descrito no Item 4.2, os Ensaios 2 e 3 foram realizados pelo laboratório no modelo seccional, onde foi reproduzida uma passagem central ladeada por duas metades de adufa. Da mesma forma, o modelo matemático reproduz os dois vãos implantados no modelo reduzido, garantindo a equivalência de geometrias. A FIGURA 4.4 apresenta a geometria adotada nas análises numéricas correspondentes aos testes realizados no modelo reduzido correspondente ao Ensaio 2.

A geometria do Ensaio 3 é similar à geometria apresentada na FIGURA 4.4, com exceção da forma da máscara do emboque, que é configurada por um trecho de elipse com semi-eixos maiores que a elipse do Ensaio 2 (ver FIGURA 4.3).

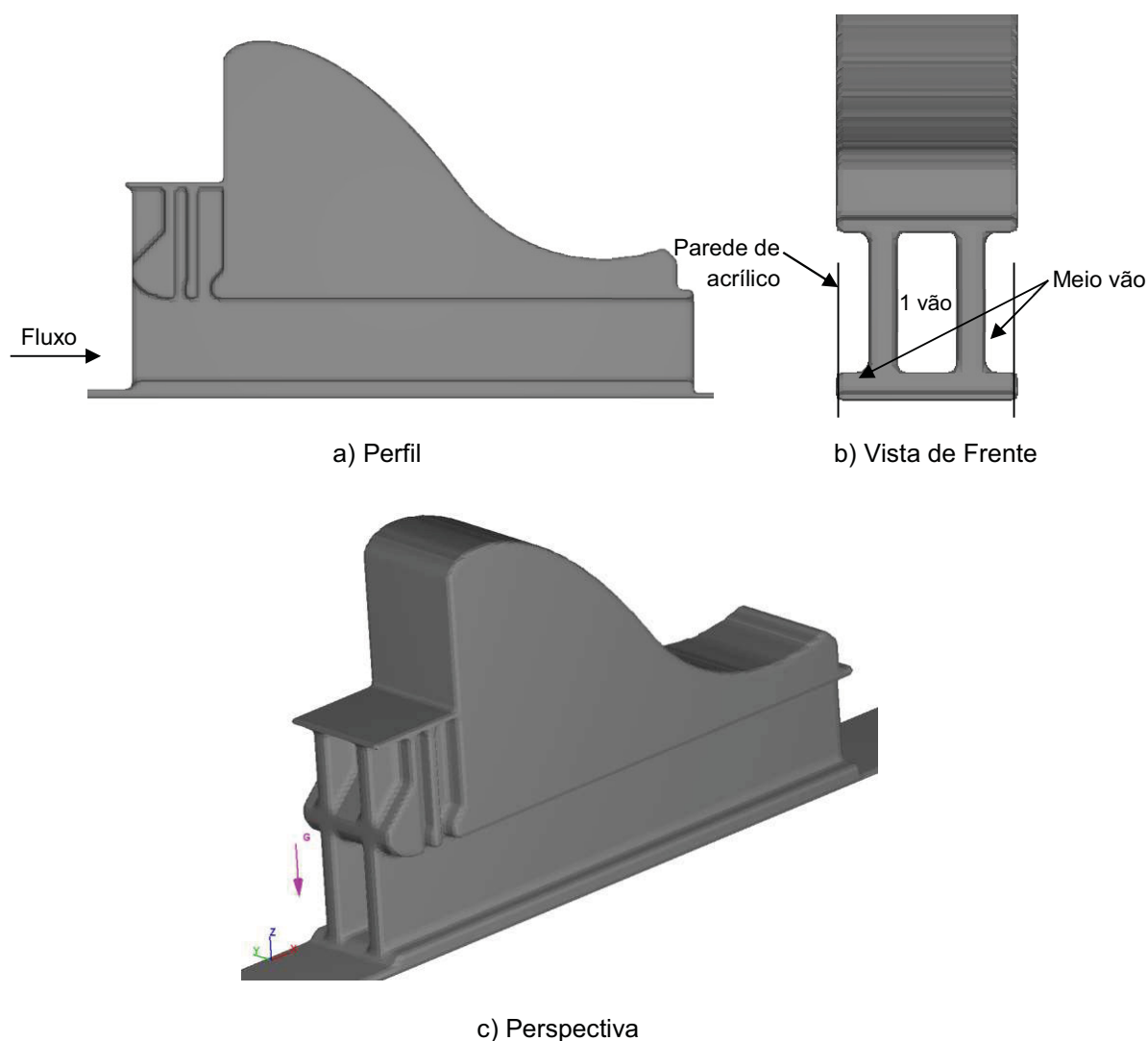


FIGURA 4.4 – GEOMETRIA DO MODELO MATEMÁTICO – ENSAIO 2

Os resultados de pressão são muito sensíveis à configuração da geometria, portanto, é necessário que a superfície seja bem representada. Em modelo reduzido, a máscara do emboque é executada em material acrílico, com muito cuidado, e normalmente é polida para evitar imperfeições.

Nas simulações numéricas, a qualidade da representação da geometria está associada ao grau de refinamento da malha de elementos. Para geometrias complexas pode ser necessário usar elementos muito pequenos, da ordem de milímetros, podendo resultar em um modelo muito “pesado” e que necessitará um tempo demasiado de simulação.

O esforço computacional ainda é um limitador nas análises numéricas. O tempo de simulação é proporcional ao número de elementos definidos pelo tamanho

da malha, ou seja, quanto maior o número de elementos, maior o tempo de simulação necessário para convergir o modelo.

A série de testes do Ensaio 1 foi realizada no modelo físico geral, na escala de 1:100, onde se representou os quinze vãos das adufas de desvio de Salto Caxias. No modelo matemático, fica inviável representar todos os vãos das adufas de desvio, assim como foi feito no modelo reduzido, pois seria necessário um esforço computacional muito grande para obtenção dos resultados (tempo de simulação).

Para se estudar a geometria do Ensaio 1 (emboque circular) no modelo matemático, adotou-se nessa pesquisa o mesmo conceito de modelo seccional definido pelo laboratório para as outras duas geometrias, ou seja, o modelo matemático reproduziu um vão central ladeado por duas metades de adufas.

Essa consideração permite avaliar o comportamento do fluxo de forma tridimensional, pois, se insere na simulação o efeito dos pilares e da aproximação do fluxo. Entretanto é uma simplificação da geometria ensaiada no modelo reduzido, cujos testes consideraram a implantação dos quinze vãos e a topografia de montante dessa estrutura. Para efeito de comparação, a FIGURA 4.5 apresenta as três configurações de máscaras do emboque das adufas de desvio da UHE Salto Caxias.

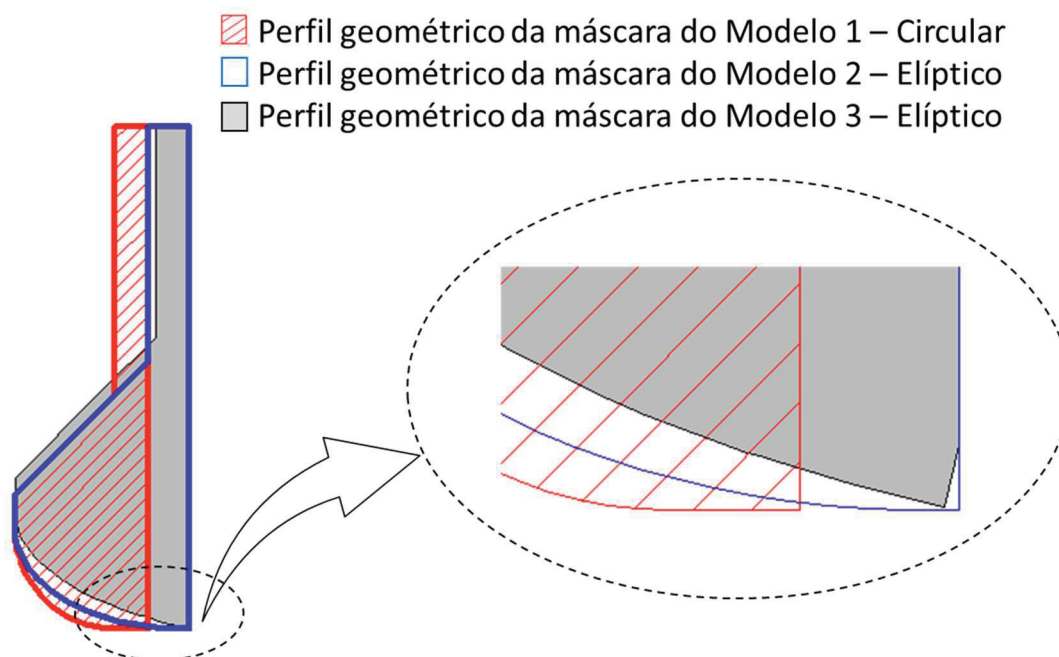


FIGURA 4.5 – MÁSCARAS DO EMBOQUE DA UHE SALTO CAXIAS ESTUDAS NA PRESENTE PESQUISA

Fonte: Autoria Própria.

4.3.2 Malha de Volumes Finitos

A definição da malha de elementos é tão importante quanto a representação da geometria e a imposição das condições de contorno da simulação. É a partir da malha que o programa matemático fará a interpretação da geometria que define os contornos sólidos.

O programa não tem um limite superior para a quantidade de elementos de cada simulação, entretanto, quanto mais elementos (malha mais densa), maior será o domínio de cálculo, afetando diretamente o esforço computacional e o tempo de simulação. Dessa forma, o grau de refinamento da malha depende da precisão desejada e do tempo disponível para se obter os resultados.

O FLOW3D® utiliza blocos de malhas ortogonais definidos em um sistema de coordenadas cartesianas ou cilíndricas, podendo ser adotado um ou outro, dependendo da natureza da geometria a ser estudada. É possível criar vários blocos de malhas circunscritos para refinamento diferenciado, permitindo aumentar a discretização nas regiões de maior interesse.

Dado que o enfoque do presente estudo está na máscara do emboque, a esta região foi imposta uma malha mais densa do que no restante do modelo. Na FIGURA 4.6, a cor azul claro representa a malha de elementos cúbicos de 0,5 m, a cor amarela elementos de 0,25 m, a cor vermelha elementos de 0,125 m e a cor azul mais escuro elementos de 0,0625 m. A FIGURA 4.7 apresenta um detalhe da malha no emboque.

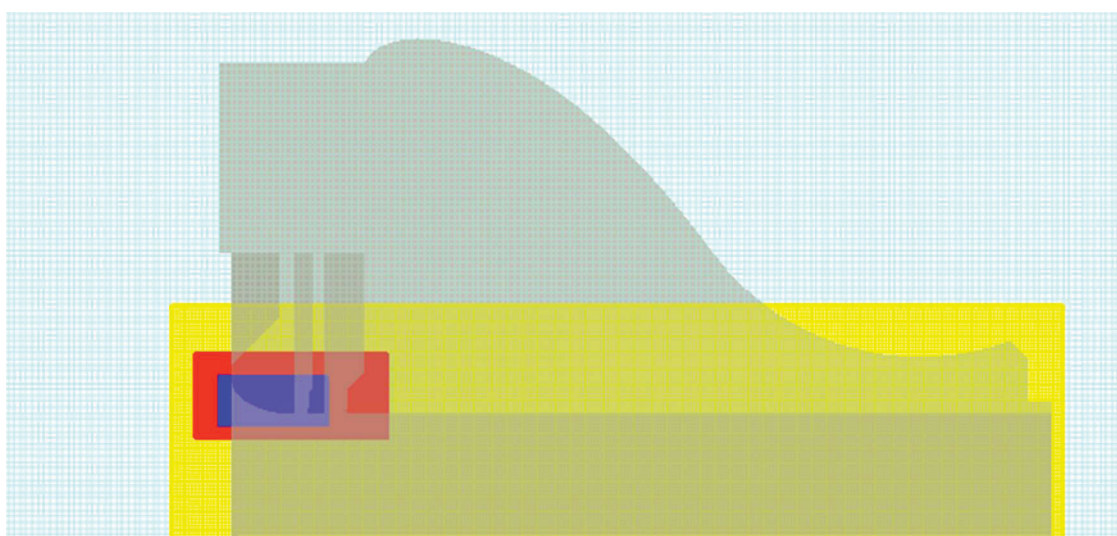


FIGURA 4.6 – MALHA DE ELEMENTOS ADOTADA NAS SIMULAÇÕES NUMÉRICAS

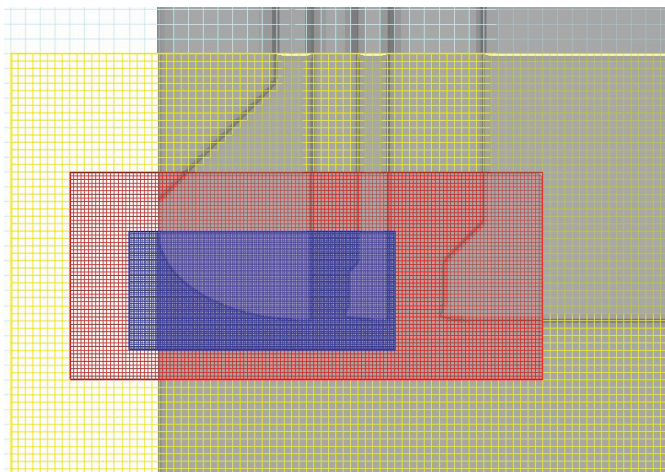


FIGURA 4.7 – DETALHE DA MALHA DE ELEMENTOS ADOTADA NAS SIMULAÇÕES NUMÉRICAS

As três geometrias simuladas no modelo matemático tiveram a mesma distribuição de malha apresentada na FIGURA 4.6

4.3.3 Definição das Condições de Contorno

A imposição das condições de contorno à simulação é o passo seguinte após a definição da geometria e da malha. São definidas nas faces dos blocos de malha, assim, cada bloco possui seis condições de contorno, duas em cada uma das direções cartesianas.

O FLOW3D® oferece dez tipos de condição de contorno diferentes. Nas simulações realizadas nesta pesquisa foram utilizadas apenas 3 condições de contorno distintas: Pressão, Simetria e *Outflow* (descarga livre).

Na extremidade de montante do modelo numérico, no sentido do fluxo principal (eixo x), foi imposta a condição de pressão de estagnação medida no modelo reduzido para os respectivos testes. Esta condição busca representar o reservatório formado a montante das adufas de desvio, onde o fluxo está estagnado e a pressão estipulada representa o plano de carga.

Para cada uma das três geometrias de emboque estudadas em modelo reduzido, foi obtida a sua respectiva curva de descarga. Os níveis de água obtidos no modelo reduzido e adotados como condição de contorno para cada uma das geometrias simuladas numericamente estão apresentados na TABELA 4.1. A tabela mostra apenas os níveis de água para a vazão de 14.000 m³/s, dado que as análises numéricas se concentraram no estudo desta vazão.

TABELA 4.1 – CURVA DE DESCARGA OBTIDA NO MODELO HIDRÁULICO REDUZIDO

Ensaio	Forma do Emboque	Modelo Reduzido	Vazão (m³/s)	Nível de Água (m)
1	Circular (raio = 3 m)	Geral Esc. 1:100	14.000	306,38
2	Elipse (semi-eixos = 5 m e 3 m)	Parcial Esc. 1:30	14.000	300,19
3	Elipse (semi-eixos = 10 m e 4 m)	Parcial Esc. 1:30	14.000	300,69

Na extremidade de jusante do modelo numérico, no sentido principal do fluxo (eixo x), se impôs a condição de contorno *outflow* (descarga livre). Esta condição permite que o fluxo saia do domínio sem interferir nas condições do fluxo a montante.

Em todas as demais direções (eixo y e eixo z) se impôs a condição de contorno de simetria, ou seja, não há escoamento no limite de simetria. Essa condição é normalmente utilizada para se definir um plano de simetria do escoamento, de modo a prever as mesmas condições do fluido nas regiões adjacentes.

4.3.4 Localização dos Pontos de Controle para Obtenção de Resultados

O modelo reduzido foi instrumentado com vários pontos de tomada de pressão (piezômetros), instalados na máscara do emboque (eixo e lateral) e no pilar. Da mesma forma, nas simulações numéricas é necessário definir locais para obtenção dos resultados. No programa utilizado nas simulações numéricas esses pontos de medição são chamados de *probes*.

Para permitir a comparação entre os resultados medidos no modelo reduzido com os obtidos nas análises numéricas, os pontos de medição do modelo matemático respeitaram a localização dos piezômetros instalados no modelo reduzido.

A precisão na localização dos pontos de medição inseridos no modelo matemático (*probes*) só foi possível porque no relatório do modelo reduzido foram apresentadas as coordenadas de cada um dos piezômetros instalados, e, portanto, a comparação entre os resultados é representativa.

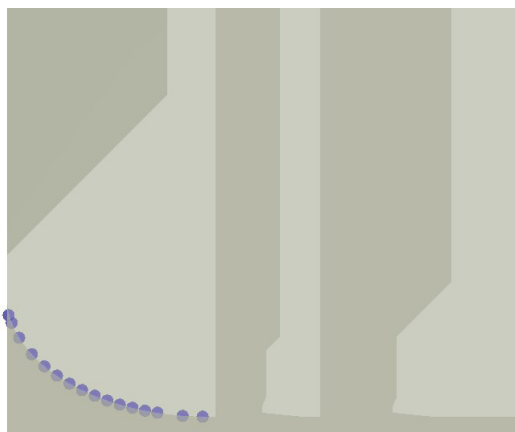
No modelo reduzido do Ensaio 1 foram instalados seis piezômetros na máscara do emboque. Já no modelo reduzido dos Ensaio 2 e 3, o laboratório instrumentou a máscara do emboque com dezesseis piezômetros. A FIGURA 4.8 mostra a localização dos pontos de medição (*probes*) no modelo matemático do Ensaio 1 (6 pontos) e Ensaio 2 e 3 (dezesseis pontos). A TABELA 4.2 apresenta as coordenadas de cada ponto de medição de pressão (local onde foram instalados os piezômetros no modelo reduzido).

TABELA 4.2 – COORDENADAS DOS PONTOS DE MEDIÇÃO (*PROBES*)

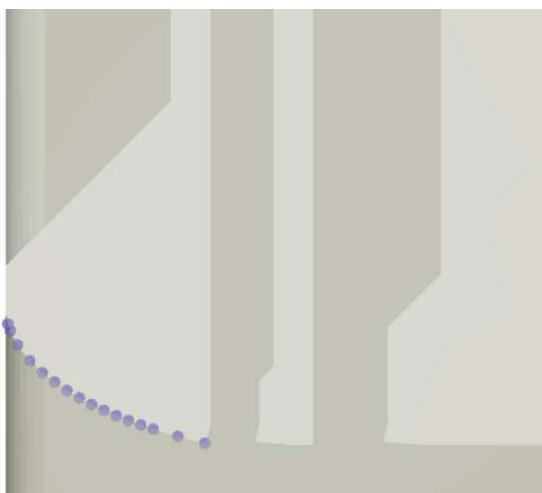
ENSAIO 1		ENSAIO 2		ENSAIO 3	
x	z	x	z	x	z
0,10	276,22	0,07	276,52	0,07	277,05
0,40	275,50	0,13	276,33	0,13	276,88
0,89	274,88	0,31	275,96	0,31	276,52
1,50	274,40	0,63	275,55	0,62	276,12
2,22	274,10	0,94	275,25	0,94	275,82
3,20	274,00	1,25	275,02	1,25	275,57
-	-	1,56	274,82	1,56	275,36
-	-	1,87	274,66	1,87	275,18
-	-	2,19	274,52	2,19	275,01
-	-	2,50	274,40	2,50	274,86
-	-	2,81	274,30	2,81	274,73
-	-	3,13	274,22	3,12	274,60
-	-	3,44	274,15	3,44	274,49
-	-	3,75	274,10	3,75	274,39
-	-	4,38	274,02	4,38	274,20
-	-	4,87	274,00	5,06	274,03



a) Ensaio 1



b) Ensaio 2



c) Ensaio 3

FIGURA 4.8 – LOCALIZAÇÃO DOS PONTOS PARA OBTENÇÃO DOS RESULTADOS NO MODELO NUMÉRICO (*PROBES*)

5 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos nas simulações numéricas das adufas de desvio da UHE Salto Caxias para as três configurações estudadas no modelo hidráulico reduzido.

As distribuições de pressões obtidas nas simulações numéricas são confrontadas com os resultados do modelo hidráulico reduzido, desenvolvido pelo Centro de Hidráulica e Hidrologia Professor Parigot de Souza, o qual revelou a existência de pressões negativas significativas na máscara superior do emboque das adufas de desvio.

5.1 ENSAIO 1 – MÁSCARA SUPERIOR DO EMBOQUE COM FORMA CIRCULAR DE RAIOS IGUAIS A 3 METROS

O Ensaio 1 corresponde aos testes realizados no modelo reduzido geral na escala de 1:100, onde foram implantados os quinze vãos das adufas de desvio da UHE Salto Caxias com a máscara do emboque circular.

Para ser fiel à configuração estudada no modelo reduzido, garantindo o máximo de representatividade da geometria no modelo numérico, seria necessário modelar numericamente os quinze vãos das adufas de desvio, contudo, devido ao grande esforço computacional exigido para essa configuração, decidiu-se que as simulações numéricas do Ensaio 1 seguiriam o mesmo padrão adotado para a configuração dos outros dois ensaios (Ensaio 2 e Ensaio 3). Desta forma, nas simulações numéricas do Ensaio 1 foram modelados apenas dois vãos de adufa, sendo, um vão central ladeado por duas metades, perfazendo dois vãos completos com a modelagem de um pilar central (ver FIGURA 4.4 – b).

Tanto no modelo reduzido quanto no modelo numérico foram observadas instabilidades do modelo e flutuações de pressões para essa configuração. No modelo reduzido essas instabilidades foram minimizadas impondo à máscara uma rugosidade de areia, provocando assim, a formação da camada limite turbulenta. No modelo numérico, adotou-se a rugosidade do concreto igual a 0,0006 m para todas as simulações numéricas das três configurações da máscara testadas (Ensaio 1, Ensaio 2 e Ensaio 3).

A mínima pressão registrada no modelo reduzido para a máscara do emboque circular foi de -8,40 m.c.a., contudo, como indicado no próprio relatório do modelo

reduzido (CEHPAR, 1995), houve uma certa dúvida quanto à validade desse resultado devido à insegurança existente sobre o efeito de escala no modelo.

A simulação numérica dessa configuração obteve resultados de pressão um pouco acima dos valores informados no relatório do modelo reduzido, para todas as seis posições da máscara avaliadas. O mínimo valor de pressão obtido na simulação numérica para a mesma condição de vazão foi de -5,1 m.c.a. contra o valor de -8,4 m.c.a observado no modelo reduzido. A TABELA 5.1 e a FIGURA 5.1 apresentam o confronto dos resultados de pressão obtidos na simulação numérica e os valores observados no modelo hidráulico reduzido.

TABELA 5.1 – ENSAIO 1 – DISTRIBUIÇÃO DE PRESSÃO NA MÁSCARA DO EMBOQUE

Tomada de Pressão			Modelo Reduzido		Simulação Numérica	
Posição	Distância (m)	Elevação (m)	Cota Piezométrica (m)	Pressão (m.c.a)	Cota Piezométrica (m)	Pressão (m.c.a)
E1	0,1	276,2	294,7	18,5	296,0	19,7
E2	0,4	275,5	287,5	12,0	290,0	14,1
E3	0,9	274,9	275,8	0,9	282,4	6,2
E4	1,5	274,4	269,7	-4,7	274,2	-1,0
E5	2,2	274,1	265,7	-8,4	270,2	-5,1
E6	3,2	274,0	271,2	-2,8	274,0	0,0

Considerando os resultados apresentados na TABELA 5.1, para a configuração da máscara do emboque do Ensaio 1 (circular), o parâmetro RMSE resultou em 3,3 m.c.a. Esse parâmetro mede a dispersão dos valores obtidos na simulação numérica em relação aos resultados medidos no modelo reduzido. Quanto menor esse valor (mais próximo de zero), menor a dispersão. O parâmetro RMSE é definido pela Equação 3.1.

Na FIGURA 5.1 estão representadas as linhas piezométricas (modelo reduzido *versus* simulação numérica). A FIGURA 5.2 apresenta, na forma gráfica, a distribuição de pressão tal como obtida na simulação numérica. Nessa figura, os valores de pressão estão apresentados em Pascal (Pa); isto porque a simulação foi realizada considerando o sistema internacional de unidades (1 Pa = 0,00010197 metro de coluna de água).

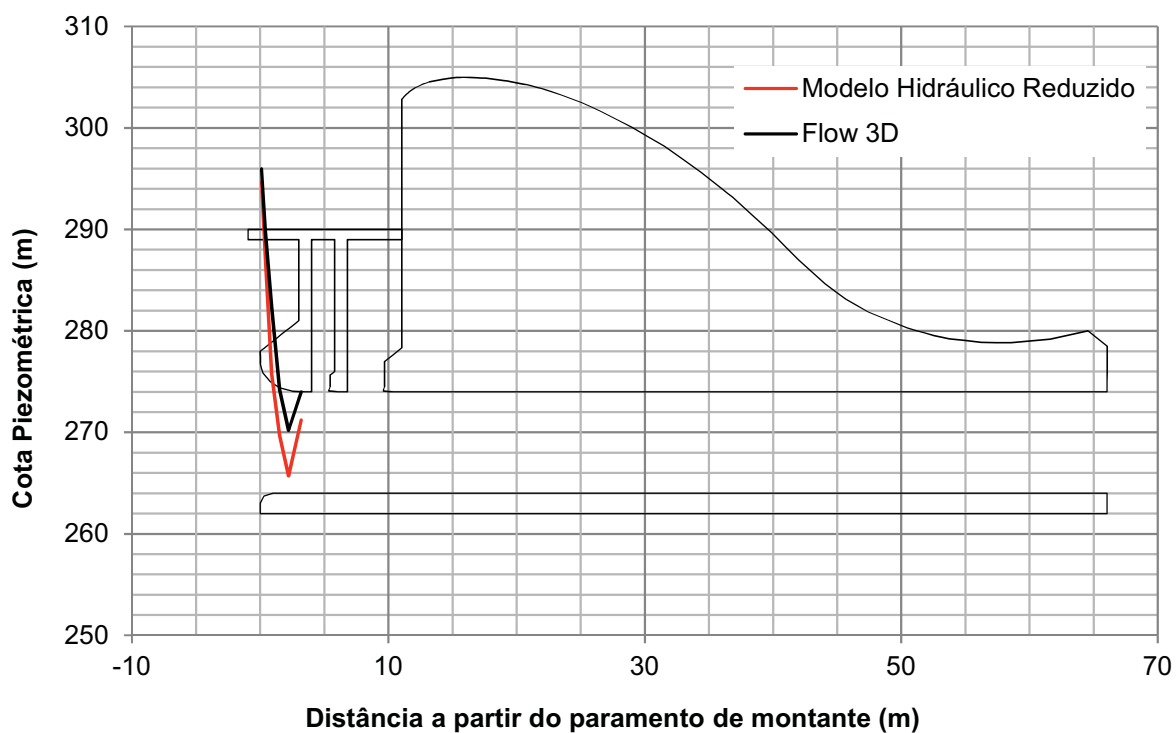


FIGURA 5.1 – ENSAIO 1 – REPRESENTAÇÃO DA LINHA PIEZOMÉTRICA NA MÁSCARA DO EMBOQUE

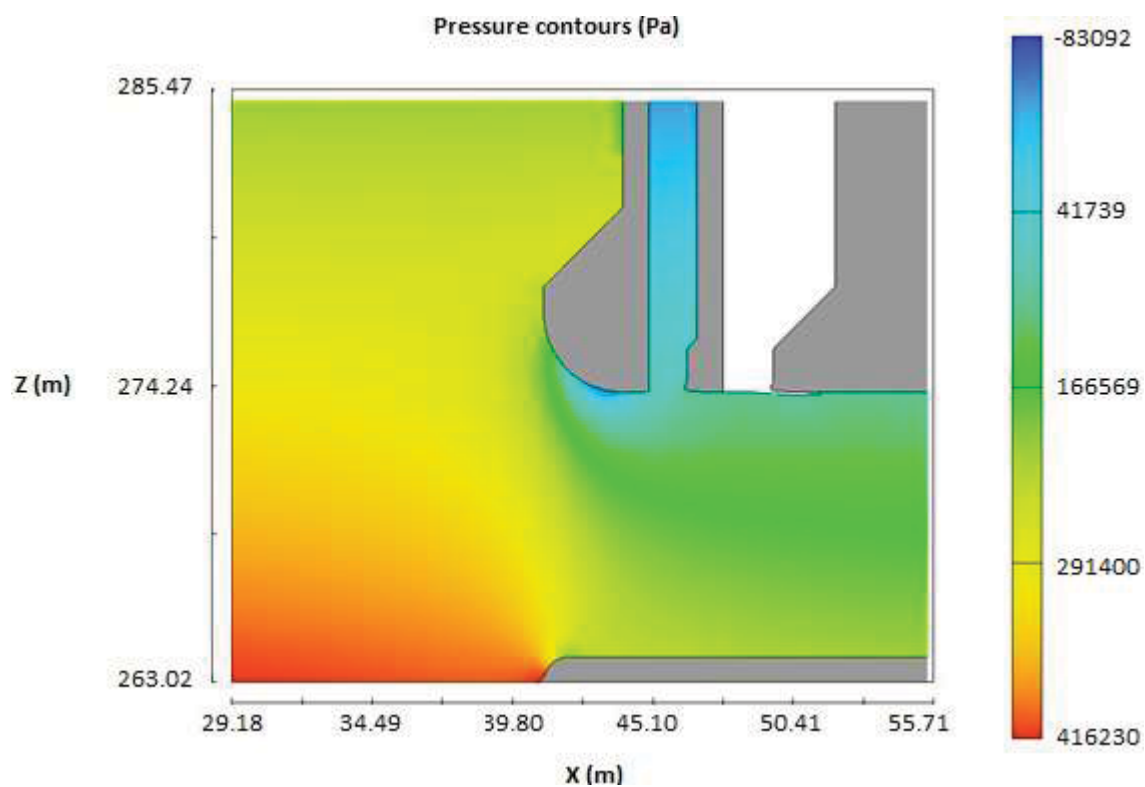


FIGURA 5.2 – ENSAIO 1 – DISTRIBUIÇÃO DE PRESSÕES AO LONGO DA ADUFA DE DESVIO

Além da verificação quanto à dispersão dos resultados da simulação numérica em relação aos valores observados no modelo reduzido, através do cálculo do parâmetro RMSE, efetuou-se também um confronto desses valores sob a forma do “coeficiente de queda de pressão” contra a relação L/D , onde L representa a distância entre o alinhamento do paramento de montante e a posição da tomada de pressão e D é a altura da adufa (10 metros). O coeficiente de queda de pressão (C) é um número adimensional definido pela Equação 2.16.

Como mostra a FIGURA 5.3, o valor mínimo do coeficiente de queda de pressão obtido a partir dos resultados do modelo reduzido é da ordem de 1,73 para L/D igual a 0,22, o que significa uma queda de pressão da ordem de $-1,73 V^2/2g$ a partir da superfície livre no reservatório. Para os resultados da simulação numérica, o coeficiente mínimo resultou em 1,59 (também na posição de L/D igual a 0,22), ou seja, a simulação numérica apresentou resultados mais favoráveis que o modelo reduzido em termos de pressões negativas. Entretanto, como dito anteriormente, durante as simulações numéricas com a configuração da máscara do Ensaio 1, foi observada certa instabilidade no modelo numérico, ocasionando flutuação de pressões, mesmo após o modelo ter convergido.

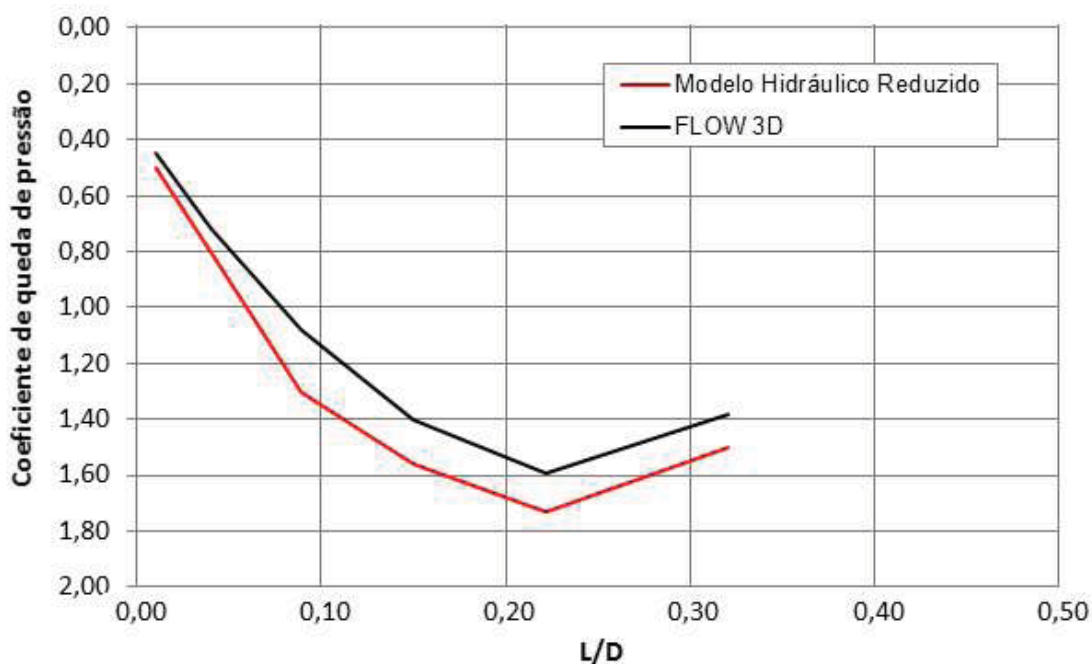


FIGURA 5.3 – ENSAIO 1 – COEFICIENTE DE QUEDA DE PRESSÃO

Com base na experiência adquirida durante as investigações numéricas utilizando a geometria da máscara do Ensaio 1, recomenda-se ter muita cautela na utilização dos resultados de simulações que apresentaram oscilações numéricas importantes durante o processo de cálculo. Vários foram os testes realizados na tentativa de se aproximar mais dos resultados do modelo reduzido e eliminar essas oscilações numéricas, contudo, acredita-se que pelo fato do emboque ser circular, há a necessidade de se ter elementos de malha muito pequenos. Um refino da malha ainda maior do que o já utilizado nas simulações numéricas dessa pesquisa é considerado inviável atualmente, devido ao grande esforço computacional que seria exigido (refletindo diretamente no tempo da simulação).

5.2 ENSAIO 2 – MÁSCARA SUPERIOR DO EMBOQUE COM FORMA ELÍPTICA DE SEMI-EIXOS IGUAIS A 5,0 E 3,0 METROS

Os estudos realizados no modelo reduzido para essa configuração da máscara do emboque indicaram a ocorrência de pressões muito baixas nessa região. Para a descarga da vazão de 14.000 m³/s a mínima pressão observada no modelo reduzido foi de -12,6 m.c.a.

A simulação numérica resultou em valores de pressão da mesma ordem de grandeza dos valores medidos no modelo reduzido. O mínimo valor obtido na simulação numérica para a mesma condição de vazão foi de -10,2 m.c.a., registrado na mesma posição indicada pelo laboratório, cerca de 3,44 metros a partir do emboque da estrutura (piezômetro E13).

A TABELA 5.2 e a FIGURA 5.4 apresentam o confronto dos resultados de pressão obtidos na simulação numérica e os valores medidos no modelo hidráulico reduzido. Na FIGURA 5.4 foram representadas as linhas piezométricas (modelo reduzido *versus* simulação numérica).

Considerando os resultados apresentados na TABELA 5.2 e configuração da máscara do emboque do Ensaio 2 (elipse) o parâmetro RMSE resultou em 2,0 m.c.a (ver Equação 3.1).

TABELA 5.2 – ENSAIO 2 – DISTRIBUIÇÃO DE PRESSÃO NA MÁSCARA DO EMBOQUE

Tomada de Pressão			Modelo Reduzido		Simulação Numérica	
Posição	Distância (m)	Elevação (m)	Cota Piezométrica (m)	Pressão (m.c.a)	Cota Piezométrica (m)	Pressão (m.c.a)
E1	0,07	276,5	286,6	10,1	285,2	8,7
E2	0,13	276,3	284,1	7,8	282,5	6,2
E3	0,31	276,0	280,0	4,0	278,9	2,9
E4	0,63	275,6	274,4	-1,2	274,3	-1,3
E5	0,94	275,3	271,7	-3,6	272,4	-2,9
E6	1,25	275,0	269,2	-5,8	269,9	-5,1
E7	1,56	274,8	265,8	-9,0	268,2	-6,6
E8	1,87	274,7	265,6	-9,1	266,9	-7,8
E9	2,19	274,5	266,7	-7,8	266,2	-8,4
E10	2,50	274,4	264,0	-10,4	264,8	-9,6
E11	2,81	274,3	264,8	-9,6	265,9	-8,4
E12	3,13	274,2	262,1	-12,1	265,6	-8,6
E13	3,44	274,2	261,6	-12,6	264,0	-10,2
E14	3,75	274,1	262,1	-12,0	266,4	-7,7
E15	4,38	274,0	264,8	-9,2	266,6	-7,4
E16	4,87	274,0	267,6	-6,4	270,2	-3,8

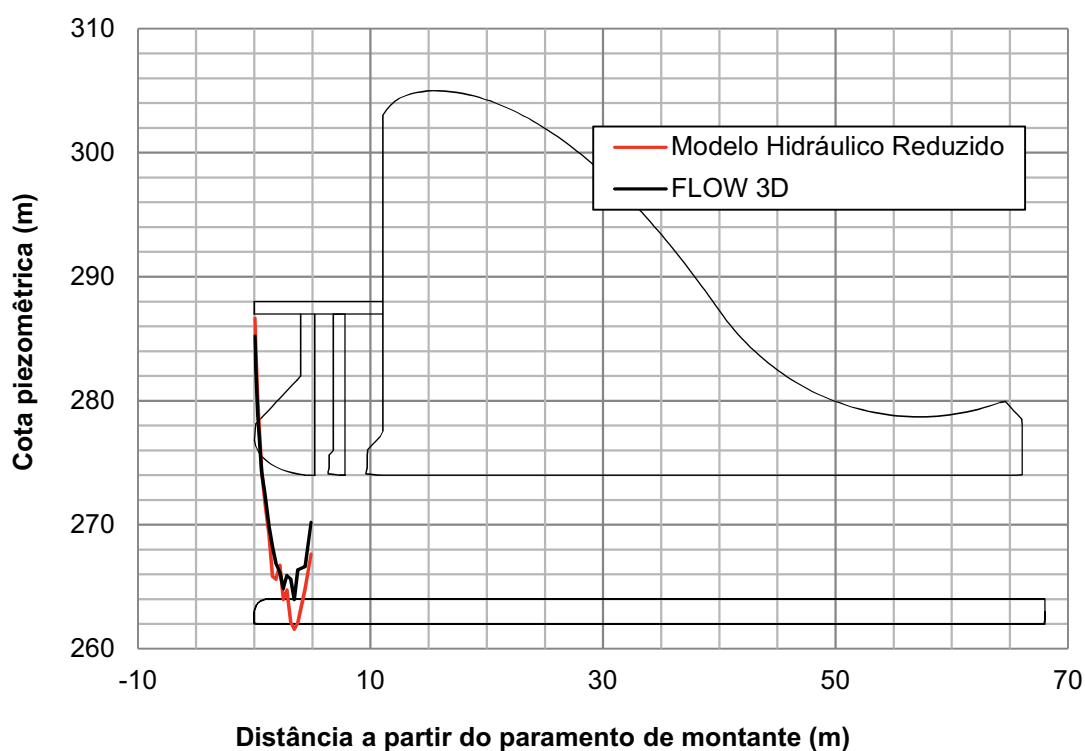


FIGURA 5.4 – ENSAIO 2 – REPRESENTAÇÃO DA LINHA PIEZOMÉTRICA NA MÁSCARA DO EMBOQUE

A FIGURA 5.5 apresenta na forma gráfica a distribuição de pressão tal como obtida na simulação numérica.

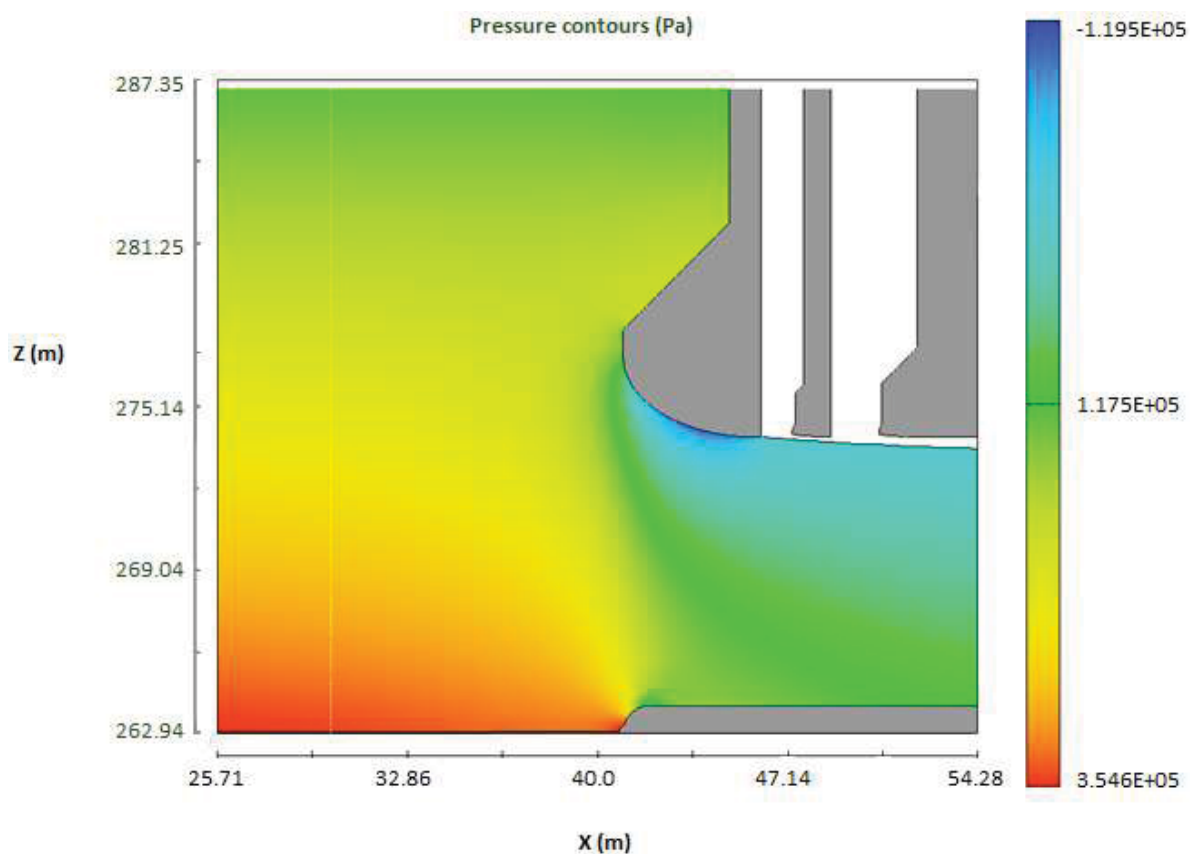


FIGURA 5.5 – ENSAIO 2 – DISTRIBUIÇÃO DE PRESSÕES AO LONGO DA ADUFA DE DESVIO

Para uma melhor análise dos resultados obtidos na simulação numérica, efetuou-se um confronto com os resultados do modelo reduzido sob a forma do “coeficiente de queda de pressão” contra a relação L/D , onde L representa a distância entre o alinhamento do paramento de montante e a posição da tomada de pressão e D é a altura da adufa (10 metros). O coeficiente de queda de pressão (C) é um número adimensional definido pela Equação 2.16.

Como mostra a FIGURA 5.6, o valor mínimo do coeficiente de queda de pressão obtido a partir dos resultados do modelo reduzido é da ordem de 1,65 para L/D igual a 0,34, o que significa uma queda de pressão da ordem de $-1,65 V^2/2g$ a partir da superfície livre no reservatório. Para os resultados da simulação numérica, o coeficiente mínimo resultou em 1,54, observado na mesma posição de L/D .

Segundo o *US Corps of Engineers* (USACE, 1974) o valor mínimo do coeficiente de queda de pressão para um perfil elíptico relativamente curto é da ordem

de 1,35 na posição L/D igual a 0,7 (ver FIGURA 2.21). O confronto dos resultados obtidos no modelo reduzido e na simulação numérica com os apresentados pelo *US Corps of Engineers*, mostra que a geometria elíptica definida pela máscara do emboque do Ensaio 2 é extremamente curta e que essa configuração é muito semelhante à geometria circular da máscara do Ensaio 1, fato que justifica os elevados valores de pressão negativa também observados no Ensaio 2.

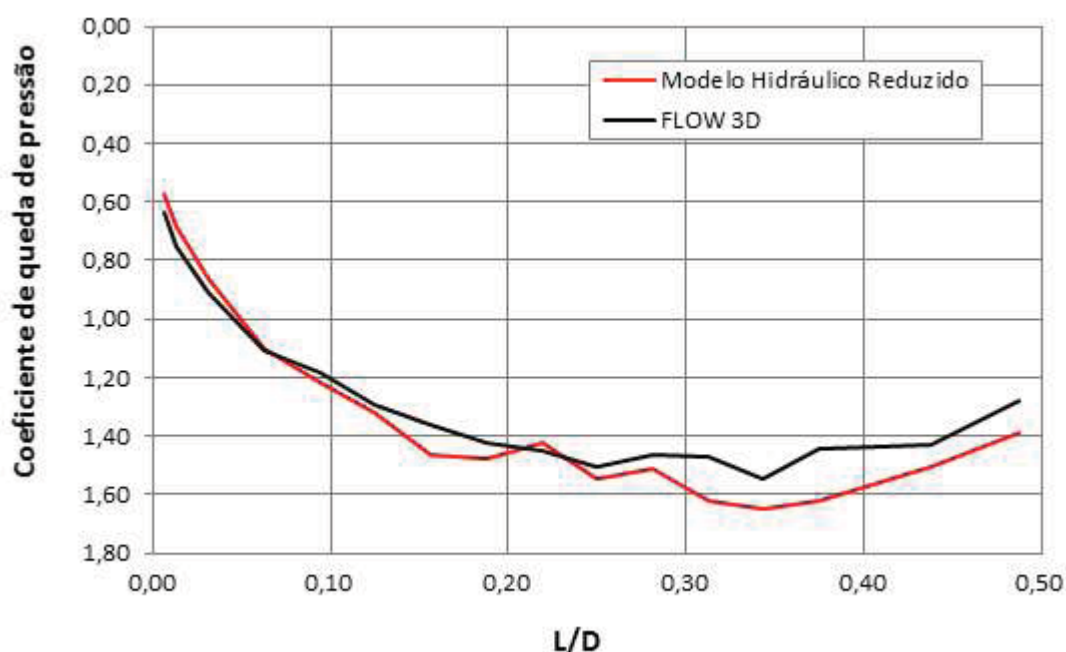


FIGURA 5.6 – ENSAIO 2 – COEFICIENTE DE QUEDA DE PRESSÃO

Para efeito de comparação, reproduz-se na FIGURA 5.7 a relação apresentada pelo *US Corps of Engineers* para um perfil elíptico relativamente curto (FIGURA 2.21) e os resultados do teste realizado no modelo reduzido e da simulação numérica.

A representação gráfica dos resultados permite identificar semelhanças entre a distribuição de pressões obtida no modelo reduzido e os valores encontrados na simulação numérica. Embora sejam observadas algumas diferenças, o modelo numérico computacional conduziu a resultados qualitativamente satisfatórios para a configuração da máscara do Ensaio 2, mostrando-se uma ferramenta útil na previsão de pressões na máscara do emboque.

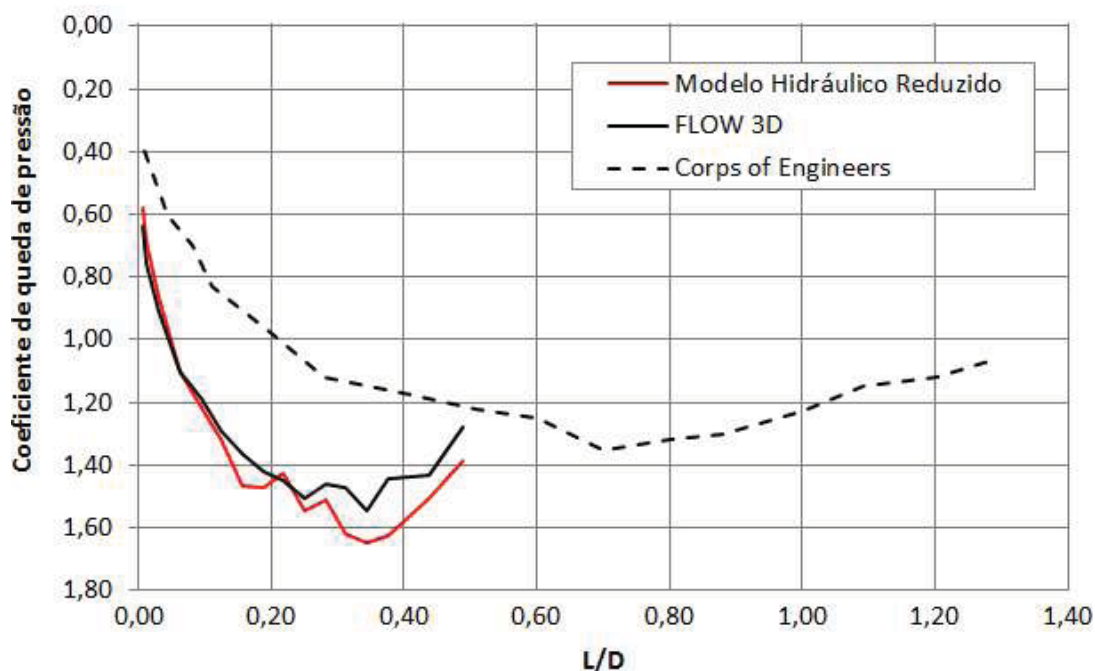


FIGURA 5.7 – ENSAIO 2 – RELAÇÃO OBTIDA PELO US CORPS OF ENGINEERS PARA O COEFICIENTE DE QUEDA DE PRESSÃO DE UM PERFIL ELÍPTICO RELATIVAMENTE CURTO

5.3 ENSAIO 3 – MÁSCARA SUPERIOR DO EMBOQUE COM FORMA CONSTITUÍDA DE UM TRECHO DE ELÍPSE DE SEMI-EIXOS IGUAIS A 10,0 E 4,0 METROS

Os estudos realizados no modelo reduzido para essa configuração, mostraram que a alteração da forma da máscara conduziu a uma melhora nas pressões observadas. A pressão mínima registrada para a descarga de 14.000 m³/s foi de -7,5 m.c.a, registrada no piezômetro E16, situado no final da máscara.

Para a mesma condição de vazão (14.000 m³/s), o valor mínimo obtido na simulação numérica foi de -14,0 m.c.a, registrado na mesma posição observada no modelo reduzido. Apesar de apresentar uma diferença importante em relação ao ponto de pressão mínima (ponto E16), a simulação numérica se mostrou bastante favorável na estimativa de pressão nos demais pontos da máscara, conforme mostra a TABELA 5.3 e a FIGURA 5.8. O parâmetro RMSE para essa configuração resultou em 1,9 m, indicando uma boa aproximação dos resultados obtidos na simulação numérica em relação aos resultados do modelo reduzido. Se o ponto E16 fosse excluído da análise, o parâmetro RMSE resultaria em 0,9 m.c.a., o que mostra a semelhança entre os resultados encontrados.

TABELA 5.3 – ENSAIO 3 – DISTRIBUIÇÃO DE PRESSÃO NA MÁSCARA DO EMBOQUE

Tomada de Pressão			Modelo Reduzido		Simulação Numérica	
Posição	Distância (m)	Elevação (m)	Cota Piezométrica (m)	Pressão (m.c.a)	Cota Piezométrica (m)	Pressão (m.c.a)
E1	0,07	277,1	287,4	10,4	286,1	9,1
E2	0,13	276,9	286,0	9,1	285,2	8,3
E3	0,31	276,5	284,8	8,3	282,6	6,1
E4	0,62	276,1	280,5	4,4	280,7	4,6
E5	0,94	275,8	278,2	2,4	278,3	2,5
E6	1,25	275,6	276,8	1,2	277,7	2,1
E7	1,56	275,4	275,2	-0,2	274,7	-0,7
E8	1,87	275,2	274,4	-0,8	274,1	-1,1
E9	2,19	275,0	272,9	-2,1	272,8	-2,2
E10	2,50	274,9	271,9	-3,0	272,7	-2,2
E11	2,81	274,7	271,4	-3,4	272,0	-2,8
E12	3,12	274,6	270,9	-3,7	270,3	-4,3
E13	3,44	274,5	270,5	-4,0	270,0	-4,5
E14	3,75	274,4	270,1	-4,3	269,0	-5,4
E15	4,38	274,2	269,3	-5,0	267,9	-6,3
E16	5,06	274,0	266,6	-7,5	260,1	-14,0

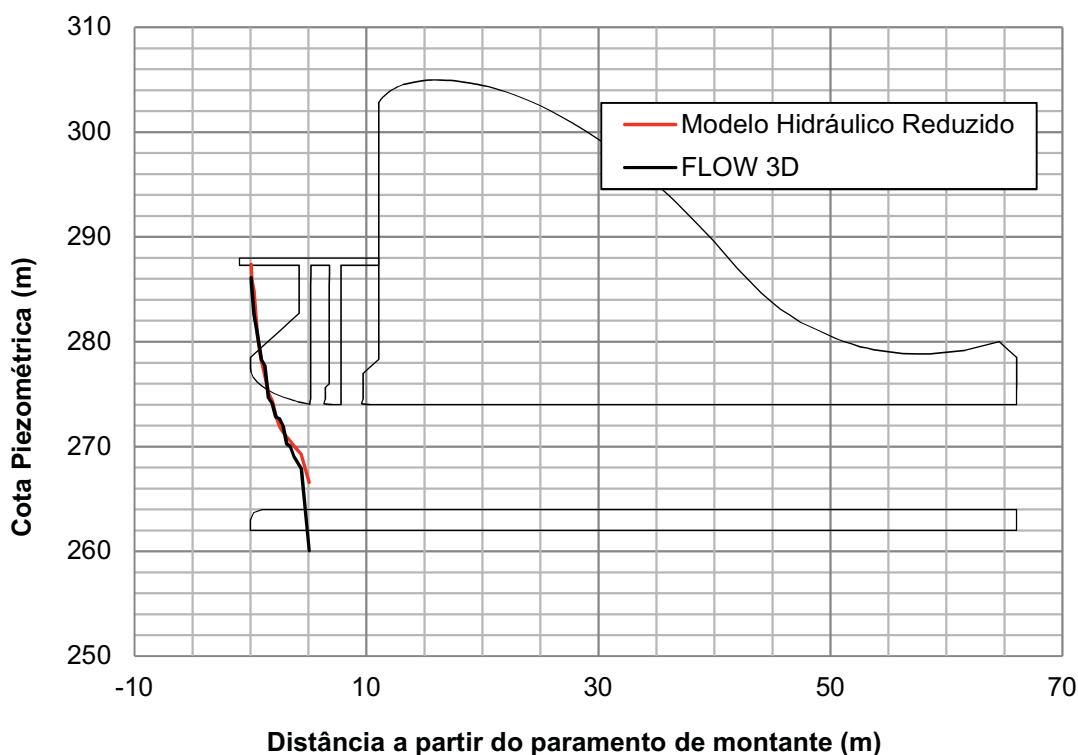


FIGURA 5.8 – ENSAIO 3 – REPRESENTAÇÃO DA LINHA PIEZOMÉTRICA NA MÁSCARA DO EMBOQUE

A Figura 5.9 apresenta na forma gráfica a distribuição de pressão tal como obtida na simulação numérica.

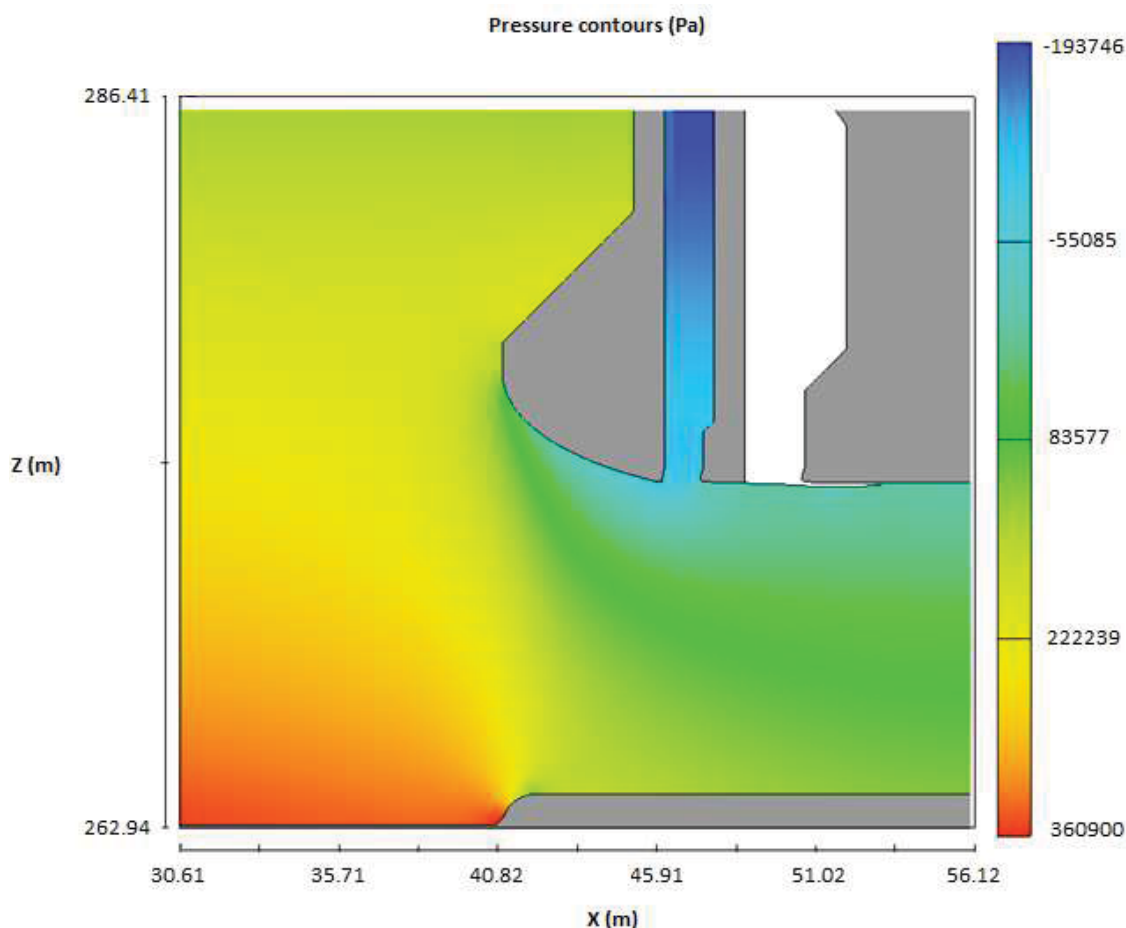


FIGURA 5.9 – ENSAIO 3 – DISTRIBUIÇÃO DE PRESSÕES AO LONGO DA ADUFA DE DESVIO

A FIGURA 5.10 mostra o confronto entre os resultados do modelo reduzido e da simulação numérica sob a forma do coeficiente de queda de pressão (C). O valor mínimo do coeficiente obtido a partir dos resultados do modelo reduzido é da ordem de 1,45 para L/D igual a 0,5. Considerando os resultados da simulação numérica, esse coeficiente resultou em 1,73, na mesma posição de L/D do modelo.

Comparando os valores dos coeficientes obtidos para essa configuração da máscara, com o valor definido pelo *US Corps of Engineers* (USACE, 1974) para um perfil elíptico relativamente curto, verifica-se que, embora haja uma melhora em termos de pressão mínima, esse perfil geométrico da máscara resulta em uma condição pior do que o definido para uma máscara elíptica relativamente curta, e, portanto, deve-se esperar pressões mais baixas do que os valores estimados pelo Corps, como de fato ocorreu.

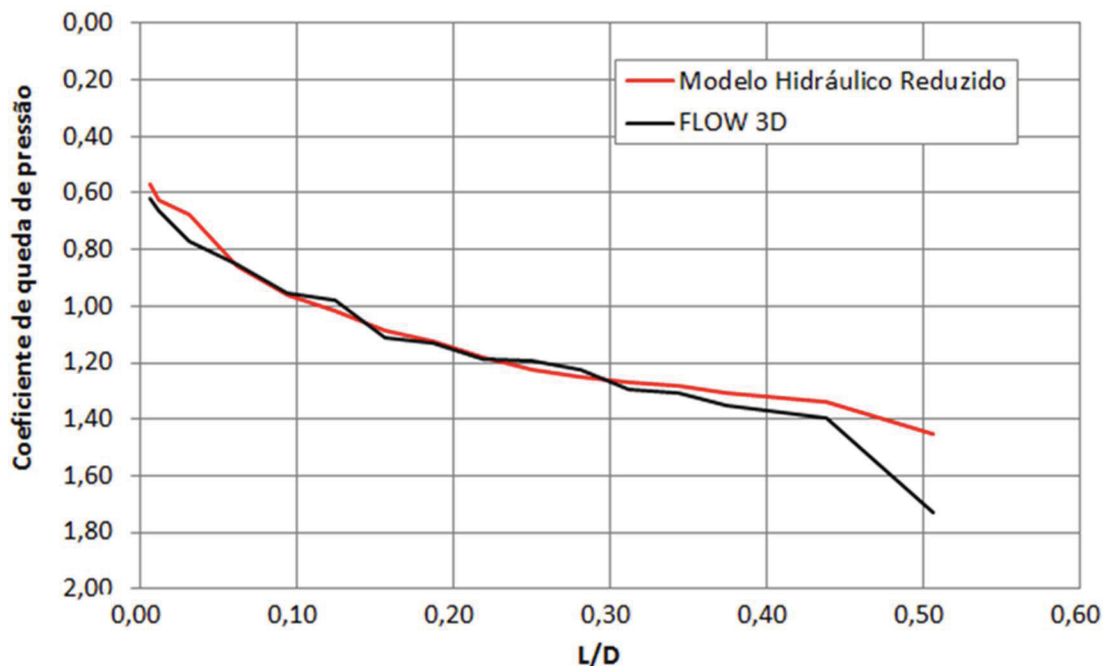


FIGURA 5.10 – ENSAIO 3 – COEFICIENTE DE QUEDA DE PRESSÃO

A FIGURA 5.11 apresenta a relação definida pelo *US Corps of Engineers* para um perfil elíptico relativamente curto e os resultados do teste realizado no modelo reduzido e na simulação numérica.

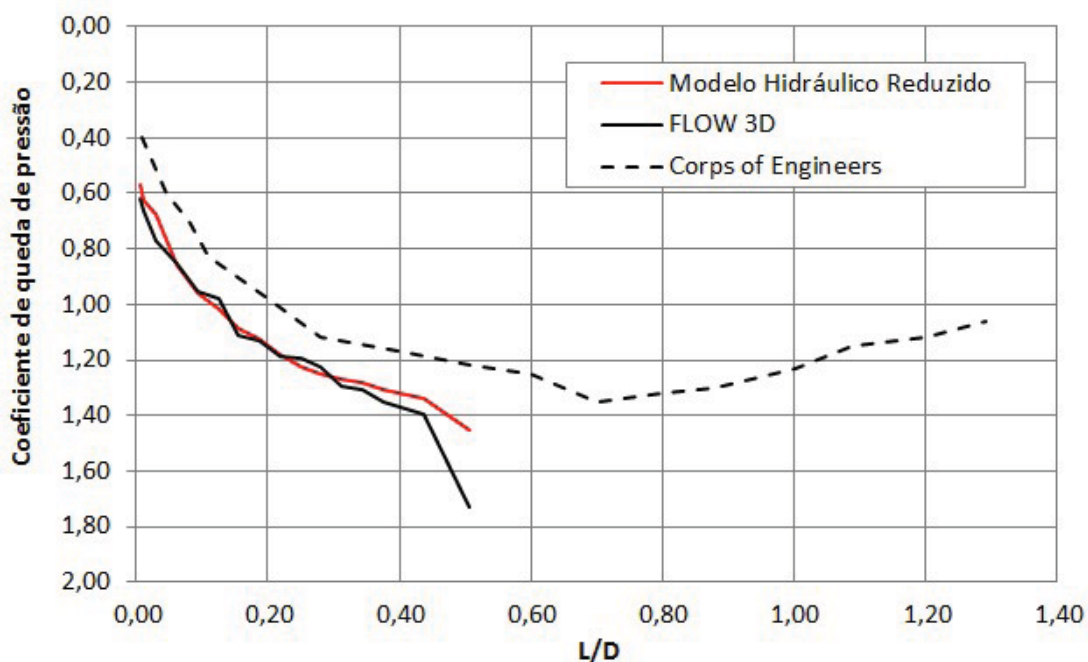


FIGURA 5.11 – ENSAIO 3 – RELAÇÃO OBTIDA PELO US CORPS OF ENGINEERS PARA O COEFICIENTE DE QUEDA DE PRESSÃO DE UM PERFIL ELÍPTICO RELATIVAMENTE CURTO

Como comentado, no caso do Ensaio 3, os resultados da simulação numérica estão próximos aos resultados do modelo reduzido. Embora seja observada uma diferença no ponto de pressão mínima, a ferramenta computacional utilizada mostrou que pode contribuir na fase de projeto de adufas de desvio, indicando a tendência da distribuição das pressões na máscara e a posição onde eventualmente ocorrerá a maior redução de pressão.

6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES PARA ESTUDOS FUTUROS

A pesquisa teve por objetivo avaliar o potencial de um modelo numérico tridimensional em reproduzir os valores de pressão no emboque de adufas de desvio observados no modelo reduzido. Dessa forma, foram realizadas simulações numéricas com três configurações distintas da máscara do emboque das adufas de desvio da UHE Salto Caxias, assim como realizado no modelo reduzido.

Os estudos em modelo físico reduzido foram conduzidos pelo laboratório do Centro de Hidráulica e Hidrologia Professor Parigot de Souza (CEHPAR), nas escalas geométricas de 1:100 (modelo geral) e 1:30 (modelo parcial). Os detalhes sobre esse estudo estão apresentados no relatório “Estudos Hidráulicos em Modelo Reduzido do Aproveitamento Hidrelétrico de Salto Caxias” (CEHPAR, 1995).

As simulações numéricas foram realizadas com o auxílio do programa computacional FLOW3D®, cuja licença comercial foi adquirida pela empresa Intertechne Consultores S.A. e disponibilizada para esta pesquisa.

Inicialmente, foram realizadas simulações numéricas considerando uma geometria mais simples, de uma adufa conceitual. Com essas simulações, houve a oportunidade de se enfrentar as primeiras dificuldades com o programa computacional com um grau de complexidade menor. Apesar de ser uma geometria mais simples, no caso da adufa conceitual, bidimensional, o conhecimento adquirido nessa fase da pesquisa foi muito importante, de modo que enriqueceu o desenvolvimento do estudo, somando prática experimental aos conceitos fundamentados na pesquisa.

Após esta primeira etapa, deram-se início às simulações numéricas das adufas de desvio da UHE Salto Caxias. Foram realizados testes para avaliar a influência de certos parâmetros do modelo numérico nos resultados das simulações, particularmente, quanto aos valores de pressão na máscara do emboque. Esses testes mostraram que a definição das condições de contorno e da malha são muito importantes, sendo necessária uma série de simulações para ajudar na avaliação dos resultados e na tomada de decisão.

Para encontrar a malha que melhor reproduziu a distribuição de pressões na máscara do emboque, foram feitos testes considerando inicialmente uma malha mais grosseira até chegar em uma malha que, ao mesmo tempo, apresentou resultados próximos ao modelo reduzido e um tempo de simulação aceitável.

As simulações para estudar a malha foram realizadas em série, isto é, a partir dos resultados de uma malha mais grosseira, foram realizadas novas simulações considerando um bloco de malha com elementos menores, circunscritos na malha anterior. Normalmente, esse refinamento é realizado repetidamente até o momento em que uma mudança na malha não produza modificações importantes nos resultados numéricos da simulação.

Embora os resultados obtidos na simulação numérica sejam considerados satisfatórios e semelhantes aos resultados do modelo reduzido, não foi possível chegar de fato ao limite que permitisse concluir que os resultados são independentes da malha adotada. A quantidade de iterações necessárias para produzir resultados numéricos similares aos observados no modelo reduzido resultou de sucessivas reduções do tamanho da malha, até o momento em que o parâmetro de aceite do tempo de processamento computacional fosse atingido. O esforço computacional ainda é um limitador dos estudos numéricos; desta forma, esse refinamento da malha foi sendo realizado até resultar em uma simulação que levasse no máximo oito dias para convergir para a solução, mesmo que ainda se observassem resultados relativamente diferentes entre simulações.

No âmbito de projetos, geralmente não se tem muito tempo disponível para solucionar problemas e pode-se dizer que, oito dias é um tempo considerado bastante longo para se obter os resultados esperados. Portanto, com base na experiência adquirida durante o desenvolvimento dessa pesquisa, recomenda-se que em estudos futuros as simulações numéricas sejam realizadas inicialmente em malhas com elementos maiores (menor densidade), e que a densidade da malha seja continuamente aumentada até que duas simulações consecutivas apresentem resultados numéricos similares, ou que o tempo de processamento computacional exceda um limite de tempo pré-definido.

Quanto à hipótese de escoamento, verificou-se que os efeitos tridimensionais referentes à aproximação do fluxo são importantes e que podem afetar na distribuição das pressões na máscara do emboque. As simulações que adotaram a hipótese bidimensional apresentaram resultados numéricos menos próximos aos valores observados em modelo reduzido quando comparadas com as simulações realizadas considerando um vão central ladeado por duas metades de adufas (hipótese tridimensional).

A simulação do escoamento considerando a hipótese bidimensional pode ser importante para se obter uma aproximação inicial dos resultados e para auxiliar no entendimento do escoamento sob as adufas de desvio. Nesse tipo de simulação, devido à simplificação da geometria e, conseqüentemente, do número de elementos da malha, o tempo de processamento é consideravelmente menor. A escolha entre uma simulação bidimensional ou tridimensional depende do tempo disponível para se obter resultados e do nível de precisão exigido no projeto. Dessa forma, sugere-se que os estudos numéricos sejam realizados, sempre que possível, com geometrias mais simples e adotando-se uma hipótese bidimensional. Com o avanço dos estudos, normalmente a exigência por resultados mais precisos e o tempo disponível para o processamento dos dados é maior. Nesse caso, deve-se então estudar o refinamento da malha e os efeitos tridimensionais.

Outro ponto importante a se observar é a influência da condição inicial imposta ao modelo numérico nos resultados da simulação. A condição inicial normalmente é determinada para que o modelo numérico possa atingir o mais rápido possível a condição de escoamento permanente e para evitar instabilidades numéricas. Para o caso das adufas de desvio da UHE Salto Caxias foi adotado como condição inicial o nível de água na entrada do modelo igual ao nível de água esperado no reservatório, deixando o interior da adufa vazio. Essa condição permitiu um escoamento adequado dentro da adufa de desvio, semelhante ao observado no modelo reduzido, em alguns casos.

Em linhas gerais, o presente estudo procurou mostrar que a forma da máscara do emboque é determinante na distribuição das pressões, e que, sobretudo, muito embora o modelo numérico computacional permita uma aproximação dos valores de pressões, a modelagem numérica não exclui a necessidade de se realizar investigações em modelo físico reduzido.

A experiência com a utilização do FLOW3D® mostrou que é possível utilizar essa ferramenta computacional para prever as pressões na máscara do emboque. Embora seja observada certa disparidade entre alguns valores, a utilização dos resultados numéricos na fase de projeto pode ser muito benéfica.

O uso de um aplicativo semelhante ao FLOW3D® permite estudar vários cenários, sem incorrer na necessidade de se executar repetidas mudanças no modelo físico reduzido, agilizando a decisão da equipe de projetos e contribuindo para a seleção de uma geometria final que deverá ser verificada em modelo físico reduzido.

Como exemplo, no caso das adufas de desvio de Salto Caxias foi necessário construir três modelos reduzidos para estudar a distribuição de pressões e definir uma geometria adequada para a máscara do emboque. Na possibilidade de se utilizar uma ferramenta computacional similar à apresentada nesta pesquisa, os custos e o prazo para a conclusão do estudo poderiam ter sido minimizados em função da execução de um único modelo físico reduzido.

Portanto, o FLOW3D® poderá ser utilizado como ferramenta de projeto em estudos futuros, auxiliando na previsão da distribuição das pressões na máscara do emboque e contribuindo para a definição de uma geometria adequada. Entretanto, recomenda-se ter muita cautela na utilização dos resultados obtidos a partir de simulações numéricas, pois, como apresentado no Capítulo 5, embora a maior parte dos resultados obtidos no FLOW3D® sejam aderentes aos valores observados em modelo reduzido, há certos pontos onde foram observadas diferenças importantes e que podem conduzir a uma interpretação equivocada.

Por fim, recomenda-se a continuidade dos estudos no sentido de se buscar resultados numéricos mais representativos, e sobretudo, o aprofundamento do conhecimento sobre os modelos matemáticos tridimensionais de escoamento turbulento. É notório que a modelagem numérica cada vez mais vem sendo utilizada para resolver questões de engenharia e por isso, incentiva-se a disseminação do conhecimento e o uso de modelos numéricos para solucionar problemas.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE RECURSOS HÍDRICOS – ABRH. **Métodos Numéricos em Recursos Hídricos**, 1989.

ANDERSON, D. J. **Computational Fluid Dynamics**. MC Graw-Hill, 1995.

COMITÊ BRASILEIRO DE BARRAGENS – CBDB. **Desvio de Grandes Rios Brasileiros**. Jaraguá do Sul, Santa Catarina, Brasil / Sul, 2009.

CENTRO DE HIDRÁULICA E HIDROLOGIA PROFESSOR PARIGOT DE SOUZA – CEHPAR. **Estudos Hidráulicos em Modelo Reduzido do Aproveitamento de Salto Caxias**, 1995.

COMMISSION INTERNATIONALE DES GRANDS BARRAGES. **River control during dam construction**. Paris: ICOLD. (ICOLD BULLETIN 48a), 1986.

CHOW, V. **Open Channel Hydraulics**. New York: McGraw-Hill, 1959.

COMPANHIA PARANAENSE DE ENERGIA – COPEL. **Usina Hidrelétrica de Salto Caxias - Relatório Final do Projeto de Engenharia e Estudos Ambientais**, 2000.

CORRADINI, C. **Desvio de Rio por Túneis - Metodologia e Cálculo Hidráulico**. São Carlos, São Paulo, 1984.

FERREIRA, V., LIMA, G., CORRÊA, L. **Simulação Computacional de Alguns Problemas em Dinâmica dos Fluidos**. (9 Brazilian Conference on Dynamics, Control and their Applications), 2010.

FILL, G. **Modelagem Hidrodinâmica 3D de escoamentos em Vertedouros**. 130 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental) – Departamento de Hidráulica e Saneamento, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2011.

FLOW SCIENCE. **FLOW 3D® v10.0 User manual**. 2014.

FOX, R. W., McDONALD, A. T. **Introdução a Mecânica dos Fluidos**. Tradução: Ricardo N. N. Koury e Geraldo A. C. França. Rio de Janeiro: LCT Editora, 2001.

HENDERSON, F. M. **Open Channel Flow**. New York: MacMillan, 1966.

HUANG, T. T. **Energy Losses in Pipe Expansions**. M. S. Thesis, University of Iowa, 1964.

KUNDU, P. K.; COHEN, I. M. **Fluid Mechanics**. 4th edição, London, 2008.

MALISKA, C. **Transferência de Calor e Mecânica dos Fluidos Computacional**. Rio de Janeiro, 1995.

MARTINS, F. **Dimensionamento Hidrológico e Hidráulico de Passagens Inferiores Rodoviárias para Águas Pluviais**. Dissertação apresentada à Faculdade de Ciências e Tecnologia a Universidade de Coimbra, 2000.

MARTINS, F., PINHEIRO, A., CARMO, J. **Passagens Hidráulicas. Em Dimensionamento Hidrológico e Hidráulico e Estimativa de Custo Assistidos por Computador** (Vol. 24 ed.), 2000.

MCDONOUGH, J. M. **Intruductory Lectures on Turbulence**. Departments of Mechanical Engineering and Mathematics University of Kentucky, 2007.

OLINGER, J. C., OTA, J. J., TOZZI, M. **Pressões no Emboque das Adufas de Desvio da U.H. de Salto Caxias**, 1995.

OTA, J., TOZZI, M. **Distribuição de Pressões em Emboques de Adufas**. Congresso Latino-americano de Hidráulica, pp. 369-378, 1994.

PETERS, H. **Conversion of Energy in Cross-Sectional Divergencies Under Different Conditions of Inflow**. Technical Memorandum, 1934.

PINHEIRO, A. **Obras de Desvio Provisório**. Instituto Superior Técnico, Departamento de Engenharia Civil e Arquitetura, 2002.

PINTO, N. L. de S. **Cavitação e Aeração de Fluxos de Alta Velocidade**. Centro de Hidráulica e Hidrologia Prof. Parigot de Souza, 1979.

UNITED STATES ARMY CORPS OF ENGINEERS – USACE. **Earth dam outlet works: Entrance with roof curve only - pressure-drop coefficients**: Hydraulic Design Criteria, Washington, 1974.

UNITED STATES ARMY CORPS OF ENGINEERS – USACE. **Hydraulics Design of Reservoir, Outlet Works**. Washington, 1980.

UNITED STATES BUREAU OF RECLAMATION – USBR. **Design of Small Dams.** Washington, 1970.

UNITED STATES NATIONAL BUREAU OF STANDARDS – USNBS. **Hydraulic Research in the United States, Including Contributions from Canadian Laboratories,** 1970.

WHITE, F. M. **Mecânica dos Fluidos.** Tradução: José Carlos C. Amorim, Nelson M. Filho e Waldir de Oliveira. Rio de Janeiro: McGraw-Hill Companies, 2002.