

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
INSTITUTO DE PESQUISAS HIDRÁULICAS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM RECURSOS HÍDRICOS E SANEAMENTO  
AMBIENTAL

**INFLUÊNCIA DE PARÂMETROS FÍSICOS NO  
DIMENSIONAMENTO DE CHAMINÉS DE EQUILÍBRIO SIMPLES  
DE USINAS HIDRELÉTRICAS**

*Eng<sup>a</sup> Civil Cristiane Collet Battiston*

Dissertação de Mestrado

Porto Alegre, 2005.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
INSTITUTO DE PESQUISAS HIDRÁULICAS

**INFLUÊNCIA DE PARÂMETROS FÍSICOS NO DIMENSIONAMENTO DE  
CHAMINÉS DE EQUILÍBRIO SIMPLES DE USINAS HIDRELÉTRICAS**

**ENG<sup>a</sup> CIVIL CRISTIANE COLLET BATTISTON**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental da Universidade Federal do Rio Grande do Sul como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental.

**Orientador: Prof. Dr. Marcelo Giulian Marques**

**Banca Examinadora**

Prof. José Carlos Cesar Amorim – Instituto Militar de Engenharia IME

Prof. Carlos Barreira Martinez – Universidade Federal de Minas Gerais UFMG

Prof. Luiz Augusto Magalhães Endres – Instituto de Pesquisas Hidráulicas IPH/UFRGS

Prof<sup>a</sup> Edith Beatriz Camaño Schettini – Instituto de Pesquisas Hidráulicas IPH/UFRGS

Porto Alegre, março de 2005.

*“Este é o meu mandamento:  
Amai-vos uns aos outros, como eu vos amo.”  
João 15,12*

## APRESENTAÇÃO

O presente trabalho é a dissertação da Engenheira Civil Cristiane Collet Battiston, aluna do Programa de Pós-graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental do Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

A referida dissertação foi desenvolvida com o apoio e parceria de FURNAS Centrais Elétricas S.A, através do projeto de pesquisa intitulado “Transientes Hidráulicos em Circuitos de Usinas Hidrelétricas” visando a sua utilização no dimensionamento e planejamento de Usinas Hidrelétricas, em atendimento às disposições da Lei nº 9.991, de 24 de julho de 2000. Contou, também, com a colaboração da CERTEL - Cooperativa de Eletrificação Teutônia e da CEEE – Companhia Estadual de Energia Elétrica –RS e com o auxílio do CNPq sob a orientação do Prof. Dr. Marcelo Giulian Marques.

A pesquisa trata de uma análise da influência de parâmetros físicos no dimensionamento de chaminés de equilíbrio simples em usinas hidrelétricas, sendo bastante discutido o parâmetro perda de carga em túneis, devido a sua relevância neste estudo e no projeto das usinas.

Este trabalho aborda a revisão bibliográfica realizada, a metodologia aplicada para o desenvolvimento da pesquisa, além dos resultados obtidos e das conclusões.

## AGRADECIMENTOS

A Salete Collet Battiston, Luiz Carlos Battiston, Maria Eduarda Collet Battiston e toda a minha família, pelo amor e por todo o apoio e incentivo que sempre me proporcionaram nas escolhas que fiz.

A FURNAS Centrais Elétricas S.A que, através do projeto de pesquisa Transientes Hidráulicos em Circuitos de Usinas Hidrelétricas, proporcionou, além das ferramentas, a base de dados necessária ao desenvolvimento desta dissertação, lembrando, principalmente, o nome da Eng<sup>a</sup> Alba Valéria Brandão Canellas.

A CERTEL, por permitir e colaborar com a coleta de dados na Usina Hidrelétrica de Salto, em especial ao Eng<sup>o</sup> Julio Salecker.

A CEEE, pela disponibilização de dados experimentais medidos na UHE Bugres, em especial ao Eng<sup>o</sup> Jorge Giulian Marques.

Ao Governo Federal que, através do órgão CNPq, concedeu a bolsa de estudos que financiou minhas atividades.

A Universidade Federal do Rio Grande do Sul e seu Instituto de Pesquisas Hidráulicas, os quais são responsáveis pelo curso de mestrado em que estudo.

Ao Prof. MSc. Alejandro B. Casalas, pelo apoio fornecido no início dos trabalhos.

Aos Professores Luiz Augusto Magalhães Endres e Edith Beatriz Camaño Schettini pelas sugestões e colaborações.

Aos Profissionais do Laboratório de Hidráulica Experimental de FURNAS, em especial ao Eng<sup>o</sup> Igor Afonso Fragoso, Bruna Dias de Souza Costa, Luis Fellipe Samary Moço e Ozeias Sarmiento dos Santos, pela cooperação e por toda a dedicação na realização dos ensaios no LAHE.

Aos Profissionais da UHE de Serra da Mesa e aos Engenheiros Ricardo Eifler e Alexandre Mahler, pela colaboração e empenho no desenvolvimento, na montagem do sistema e na aquisição dos dados da Usina de Serra da Mesa.

Aos Técnicos em Hidrologia Sérgio Nicolau Flores e Maximiliano Messa pelo auxílio em trabalhos de aquisição de dados.

Aos estagiários de Engenharia Civil Ângelo Prediger, Alexandre Mees Alves e Emanuele Gauer, pela colaboração no tratamento de dados.

A colega no projeto de pesquisa, Eng<sup>a</sup> Natalia Maria Baccardatz Simmari, pela colaboração.

Aos, tão importantes e inumeráveis, colegas e amigos, sempre presentes.

Ao Prof. Dr. Marcelo Giulian Marques, cuja orientação e incentivo foram fundamentais no desenvolvimento deste trabalho.

## SUMÁRIO

|  |             |
|--|-------------|
| <b>LISTA DE FIGURAS.....</b>   | <b>iii</b>  |
| <b>LISTA DE QUADROS .....</b>  | <b>ix</b>   |
| <b>LISTA DE SÍMBOLOS.....</b>  | <b>xi</b>   |
| <b>RESUMO .....</b>  | <b>xiii</b> |
| <b>ABSTRACT .....</b>  | <b>xiv</b>  |
| <b>1 INTRODUÇÃO .....</b>  | <b>1</b>    |
| <b>2 OBJETIVO.....</b>   | <b>2</b>    |
| <b>2.1 Objetivo Geral .....</b>  | <b>2</b>    |
| <b>2.2 Objetivos Específicos.....</b>  | <b>2</b>    |
| <b>3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>   | <b>3</b>    |
| <b>3.1 Usinas Hidrelétricas .....</b>  | <b>3</b>    |
| <b>3.2 Transientes Hidráulicos .....</b>   | <b>6</b>    |
| 3.2.1 Teoria da Coluna Rígida .....  | 7           |
| 3.2.2 Teoria da Coluna Elástica .....  | 9           |
| <b>3.3 Chaminés de Equilíbrio .....</b>  | <b>10</b>   |
| 3.3.1 Equações do Movimento.....   | 13          |
| 3.3.2 Solução da Oscilação em Massa em uma Chaminé de Equilíbrio pelo Método das<br>Diferenças Finitas ..... | 14          |
| 3.3.3 Necessidade da Instalação de Chaminé de Equilíbrio em uma Usina.....                                   | 14          |
| 3.3.4 Dimensionamento de Chaminés de Equilíbrio.....   | 15          |
| 3.3.4.1 Condição de Estabilidade de Thoma .....  | 16          |
| 3.3.4.2 Altura da Chaminé de Equilíbrio.....   | 19          |
| <b>3.4 Simulações Numéricas .....</b>  | <b>22</b>   |
| <b>3.5 Perda de carga linear em túneis.....</b>  | <b>25</b>   |
| <b>4 METODOLOGIA.....</b>  | <b>36</b>   |
| <b>4.1 Aquisição de dados.....</b>   | <b>36</b>   |
| 4.1.1 Usina Hidrelétrica de Serra da Mesa.....   | 37          |
| 4.1.2 Estrutura do LAHE .....  | 41          |
| 4.1.3 Usina Hidrelétrica de Salto Forqueta .....   | 45          |
| 4.1.4 UHE Bugres.....  | 48          |

|            |   |            |
|------------|---|------------|
| <b>4.2</b> | <b>Análise dos Dados Experimentais de Regimes Transientes.....</b>  | <b>49</b>  |
| <b>4.3</b> | <b>Estudo da Perda de Carga Linear em Túneis.....</b>   | <b>49</b>  |
| <b>4.4</b> | <b>Simulações Numéricas de Regimes Transientes .....</b>  | <b>52</b>  |
| 4.4.1      | Modelo CHAMINE .....  | 52         |
| 4.4.2      | Modelo ESTRANHE .....   | 54         |
| 4.4.3      | Organização das Simulações.....   | 57         |
| <b>5</b>   | <b>RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>   | <b>61</b>  |
| <b>5.1</b> | <b>Aquisição de Dados na Usina de Serra da Mesa.....</b>  | <b>61</b>  |
| 5.1.1      | Dados Diários .....   | 61         |
| 5.1.2      | Rejeições.....  | 62         |
| <b>5.2</b> | <b>Aquisição de Dados na Estrutura do LAHE.....</b>   | <b>68</b>  |
| <b>5.3</b> | <b>Perda de Carga .....</b>   | <b>73</b>  |
| 5.3.1      | Usina Hidrelétrica de Serra da Mesa.....  | 73         |
| 5.3.2      | Usina Hidrelétrica de Salto Forqueta .....  | 78         |
| 5.3.3      | Usina Hidrelétrica Bugres.....  | 82         |
| 5.3.4      | Estrutura do LAHE .....   | 85         |
| 5.3.5      | Comparação entre os resultados dos túneis estudados .....   | 89         |
| <b>5.4</b> | <b>Simulações Numéricas de Regimes Transientes .....</b>  | <b>91</b>  |
| 5.4.1      | Fase I - Simulação de regimes transientes ocorridos na Usina de Serra da Mesa.....  | 91         |
| 5.4.2      | Fase II - Simulações numéricas para análise da influência de parâmetros físicos nas oscilações em chaminés de equilíbrio..... | 100        |
| 5.4.2.1    | Geometria .....   | 100        |
| 5.4.2.1.1  | Área da Chaminé.....  | 101        |
| 5.4.2.1.2  | Comprimento do túnel de fuga.....   | 104        |
| 5.4.2.1.3  | Área do túnel de fuga: .....  | 107        |
| 5.4.2.2    | Perda de carga.....   | 110        |
| 5.4.2.3    | Vazão.....  | 113        |
| 5.4.2.4    | Nível de jusante .....  | 116        |
| 5.4.2.5    | Tempo de fechamento do distribuidor .....   | 120        |
| 5.4.3      | Fase III - Simulação numérica de situações usuais de projeto – aplicado à Usina Hidrelétrica de Serra da Mesa.....            | 123        |
| <b>6</b>   | <b>CONCLUSÕES .....</b>   | <b>129</b> |
|            | <b>RECOMENDAÇÕES .....</b>  | <b>133</b> |
|            | <b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>   | <b>134</b> |

## LISTA DE FIGURAS

|  |    |
|--|----|
| Figura 1 – Central em desvio.....  | 3  |
| Figura 2 – Oscilações de nível em uma câmara de equilíbrio durante um regime transitório .....                                 | 6  |
| Figura 3 – Esquema de um circuito hidráulico com conduto sob pressão. ....   | 8  |
| Figura 4 – Detalhe do elemento de fluido e as forças atuantes na Figura 3. ....  | 8  |
| Figura 5 - Chaminé de Equilíbrio entre os órgãos adutores de baixa e alta pressão. ....  | 10 |
| Figura 6 – Chaminé de equilíbrio imediatamente após os tubos de sucção. ....   | 11 |
| Figura 7 - Principais tipos de chaminé de equilíbrio .....   | 12 |
| Figura 8 – Desenho esquemático de uma central hidrelétrica com chaminé de equilíbrio a montante da casa de força. ....         | 13 |
| Figura 9 – Gráfico de $z_d$ em função de $k'$ .....  | 20 |
| Figura 10 – Gráfico de $z'_d$ em função de $k'$ .....  | 21 |
| Figura 11 – Oscilações amortecidas. ....   | 21 |
| Figura 12 – Verificação do método computacional com dados de Tanzmuhle NABER (1964). ....                                      | 23 |
| Figura 13 – Comparação dos métodos simples valor inicial e preditor-corretor com dados experimentais. ....                     | 24 |
| Figura 14 – Túnel seção ferradura, formas e exemplo.....   | 26 |
| Figura 15 - Relação entre vazão e perda de carga para (a) Túnel de Blåsjön, (b) Túnel de Nissaström e (c) Túnel de Tåsan ..... | 29 |
| Figura 16 – Coeficientes de atrito observados pelo U.S. ARMY CORPS OF ENGINEERS e curva ajustada . ....                        | 31 |
| Figura 17 - Valores de $f$ calculados por diferentes métodos, para o túnel da usina Chimay .....                               | 33 |
| Figura 18 – Valores de coeficiente de atrito para túnel com paredes lisas .....  | 34 |
| Figura 19 – Esquema de desenvolvimento de escoamento.....  | 34 |
| Figura 20 - Valores de coeficiente de atrito para túnel.....   | 35 |
| Figura 21 – Vista geral da Usina de Serra da Mesa.....   | 37 |
| Figura 22 – Desenho esquemático da usina de Serra da Mesa.....   | 38 |
| Figura 23 - Arranjo geral da usina de Serra da Mesa.....   | 38 |
| Figura 24 – Túnel de acesso da UHE de Serra da Mesa, similar ao túnel adutor.....  | 40 |
| Figura 25 – Tela do software de aquisição de dados. ....   | 41 |
| Figura 26 - Estrutura do LAHE. ....  | 42 |
| Figura 27 – Vista interna do túnel da estrutura do LAHE. ....  | 43 |
| Figura 28 - Posicionamento dos instrumentos de aquisição de dados – Planta. ....   | 44 |
| Figura 29 - Posicionamento dos instrumentos de aquisição de dados - Corte. ....  | 44 |



|   |    |
|---|----|
| Figura 30 – Usina Hidrelétrica de Salto Forqueta.....   | 46 |
| Figura 31 – Túnel escavado em rocha da Usina Hidrelétrica Salto Forqueta. ....  | 47 |
| Figura 32 – Foto da Usina Hidrelétrica Bugres.....  | 48 |
| Figura 33 – Curva de operação das turbinas da UHE de Serra da Mesa. ....  | 50 |
| Figura 34 – Curva de operação das turbinas da Usina de Salto Forqueta para queda líquida igual a 31,75 mca.....   | 51 |
| Figura 35 – Exemplo - Perda de carga entre dois reservatórios.....  | 51 |
| Figura 36 – Circuito estudado pelo modelo CHAMINE. ....   | 52 |
| Figura 37 – Telas de utilização do modelo CHAMINE. ....   | 53 |
| Figura 38 – Esquema de calculo do ESTRANHE.....   | 54 |
| Figura 39 – Esquema do sistema de operação do modelo ESTRANHE.....  | 55 |
| Figura 40 – Telas de utilização do modelo ESTRANHE-IPH. ....  | 56 |
| Figura 41 – Forma de mensuração do período. ....  | 58 |
| Figura 42 – Medições realizadas no dia 18/07/2004 na UHE de Serra da Mesa, (a) Aberturas dos distribuidores, (b) Potências geradas, (c) Nível d'água no reservatório, (d) Nível d'água na chaminé e canal de fuga. .... | 61 |
| Figura 43 – Comportamento das potências das três unidades geradoras.....  | 63 |
| Figura 44 - Comportamento das aberturas dos distribuidores das três turbinas durante a rejeição. ....   | 63 |
| Figura 45 – Comportamento da abertura do distribuidor da unidade 2 no momento da rejeição. ....   | 64 |
| Figura 46 – Comportamento do nível d'água na chaminé de equilíbrio com a rejeição de carga da unidade de geração 2. ....  | 64 |
| Figura 47 - Comportamento do nível d'água no canal de fuga com a rejeição de carga da unidade de geração 2. ....  | 65 |
| Figura 48 – Comparação entre os dados de nível d'água na chaminé e abertura do distribuidor da unidade geradora 3.....  | 66 |
| Figura 49 – Tela do sistema de controle da usina.....   | 67 |
| Figura 50 – Comportamento do nível d'água na chaminé de equilíbrio durante a rejeição de carga de 4 de julho de 1999. ....  | 67 |
| Figura 51 – Nível d'água na chaminé para um ensaio de fechamento total.....   | 69 |
| Figura 52 – Nível d'água no canal de fuga para um ensaio de fechamento total.....   | 69 |
| Figura 53 – Comparação entre os ensaios 175 (100% - 0%) e 176 (75% - 0%).....   | 70 |
| Figura 54 – Comportamento das amplitudes em ensaios de fechamento. ....   | 70 |
| Figura 55 – Comportamento dos períodos em ensaios de fechamento.....  | 71 |
| Figura 56 – Comparação entre os ensaios 85 (0% - 100%) e 86 (0% - 75%).....   | 71 |

|   |    |
|---|----|
| Figura 57 – Comportamento das amplitudes em ensaios de abertura.....  | 72 |
| Figura 58 – Comportamento dos períodos em ensaios de abertura. ....   | 72 |
| Figura 59 – Perda de carga total versus vazão – Serra da Mesa. ....   | 73 |
| Figura 60 – Ajuste de curva de potência aos dados de perda de carga linear – Serra da Mesa.....   | 75 |
| Figura 61 – Coeficiente de atrito: ajuste de uma curva de potência – Serra da Mesa.....   | 75 |
| Figura 62 – Comparação entre os coeficientes de atrito teóricos e os experimentais – Serra da Mesa. ....                                    | 76 |
| Figura 63 – Comparação entre os coeficientes de atrito de U.S. ARMY CORPS OF ENGINEERS e os experimentais – Serra da Mesa. ....             | 77 |
| Figura 64 – Comparação entre os coeficientes de atrito experimentais e o Diagrama de Moody – Serra da Mesa.....                             | 78 |
| Figura 65 – Perda de carga total versus vazão – Salto Forqueta. ....  | 79 |
| Figura 66 – Ajuste de curva de potência aos dados de perda de carga linear – Salto Forqueta. ....   | 79 |
| Figura 67 – Coeficiente de atrito versus número de Reynolds – Salto Forqueta. ....  | 80 |
| Figura 68 – Comparação entre os coeficientes de atrito experimentais e teóricos sugeridos por PENNINGTON (1998) – Salto Forqueta. ....      | 81 |
| Figura 69 – Comparação entre os coeficientes de atrito experimentais e o Diagrama de Moody – Salto Forqueta.....                            | 81 |
| Figura 70 – Perda de carga total versus vazão – Bugres.....   | 82 |
| Figura 71 – Ajuste de curva de potência aos dados de perda de carga linear – Bugres. ....   | 83 |
| Figura 72 – Coeficiente de atrito versus número de Reynolds – Bugres. ....  | 83 |
| Figura 73 – Comparação entre os coeficientes de atrito experimentais e o Diagrama de Moody – Bugres.....                                    | 84 |
| Figura 74 – Detalhe da comparação entre os coeficientes de atrito experimentais e o Diagrama de Moody – Bugres.....                         | 84 |
| Figura 75 – Perda de carga total versus vazão – Estrutura do LAHE. ....   | 85 |
| Figura 76 – Perda de carga linear versus vazão – Estrutura do LAHE. ....  | 86 |
| Figura 77 – Tipo de escoamento – Estrutura do LAHE. ....  | 86 |
| Figura 78 – Coeficiente de atrito versus número de Reynolds – Estrutura do LAHE. ....   | 87 |
| Figura 79 – Comparação entre os coeficientes de atrito do túnel da Estrutura do LAHE e os encontrados no trabalho de LIU & ZHU (2000). .... | 88 |
| Figura 80 – Comparação entre os coeficientes de atrito experimentais e o Diagrama de Moody – Estrutura do LAHE.....                         | 88 |
| Figura 81 – Ajuste de duas equações aos dados do coeficiente de atrito da Estrutura do LAHE.....  | 89 |

|   |     |
|---|-----|
| Figura 82 – Comparação entre os resultados obtidos para o coeficiente de atrito.....  | 90  |
| Figura 83 – Comparação dos resultados do programa ESTRANHE-IPH com os dados experimentais da UHE de Serra da Mesa. ....   | 92  |
| Figura 84 – Detalhe da comparação dos resultados do programa ESTRANHE-IPH com os dados experimentais da UHE de Serra da Mesa. ....  | 93  |
| Figura 85 – Comparação dos resultados do programa ESTRANHE e ESTRANHE-IPH com os dados experimentais da UHE de Serra da Mesa. ....  | 93  |
| Figura 86 – Comparação dos resultados do programa CHAMINE-IPH com os dados experimentais da UHE de Serra da Mesa. ....  | 94  |
| Figura 87 – Detalhe da comparação dos resultados do programa CHAMINE-IPH com os dados experimentais da UHE de Serra da Mesa. ....   | 95  |
| Figura 88 – Comparação dos resultados do programa CHAMINE e CHAMINE-IPH com os dados experimentais da UHE de Serra da Mesa.....   | 95  |
| Figura 89 – Comparação dos resultados dos programas CHAMINE-IPH e ESTRANHE-IPH com os dados experimentais da UHE de Serra da Mesa.....  | 96  |
| Figura 90 – Comparação do comportamento do nível d'água no canal de fuga entre a rejeição de carga do dia 1º de outubro de 2004 em Serra da Mesa e um ensaio similar na estrutura do LAHE. .... | 97  |
| Figura 91 – Comparação dos resultados do programa ESTRANHE e ESTRANHE-IPH com os dados experimentais da UHE de Serra da Mesa.....   | 98  |
| Figura 92 – Comparação dos resultados do programa CHAMINE-IPH e CHAMINE com os dados experimentais da UHE de Serra da Mesa.....   | 99  |
| Figura 93 – Comportamento da oscilação de nível na chaminé de equilíbrio variando sua área.....   | 102 |
| Figura 94 – Comportamento das amplitudes das oscilações de nível na chaminé de equilíbrio segundo a variação de sua área.....   | 103 |
| Figura 95 – Comportamento dos períodos das oscilações de nível na chaminé de equilíbrio considerando a variação da área da mesma.....   | 103 |
| Figura 96 – Comportamento do fator de amortecimento considerando a variação da área da chaminé. ....  | 103 |
| Figura 97 – Comportamento da oscilação de nível na chaminé de equilíbrio variando o comprimento do túnel de fuga.. ....   | 105 |
| Figura 98 – Comportamento das amplitudes das oscilações de nível na chaminé de equilíbrio segundo a variação do comprimento do túnel de fuga. ....  | 106 |
| Figura 99 – Comportamento dos períodos das oscilações de nível na chaminé de equilíbrio considerando a variação do comprimento do túnel de fuga. ....   | 106 |

|  |     |
|--|-----|
| Figura 100 – Comportamento do fator de amortecimento das oscilações de nível na chaminé de equilíbrio considerando a variação do comprimento do túnel de fuga.....   | 106 |
| Figura 101 – Comportamento da oscilação de nível na chaminé de equilíbrio variando a área do túnel de fuga.....  | 108 |
| Figura 102 – Comportamento das amplitudes das oscilações de nível na chaminé de equilíbrio segundo a variação da área do túnel de fuga.....                          | 109 |
| Figura 103 – Comportamento dos períodos das oscilações de nível na chaminé de equilíbrio considerando a variação da área do túnel.....                               | 109 |
| Figura 104 – Comportamento do fator de amortecimento das oscilações de nível na chaminé de equilíbrio considerando a variação da área do túnel.....                  | 109 |
| Figura 105 – Comportamento da oscilação de nível na chaminé de equilíbrio variando os coeficientes de perda de carga.....  | 111 |
| Figura 106 – Comportamento dos períodos e amplitudes das oscilações de nível na chaminé de equilíbrio considerando a variação dos coeficiente de perda de carga..... | 112 |
| Figura 107 – Comportamento do fator de amortecimento das oscilações de nível na chaminé de equilíbrio considerando a variação dos coeficiente de perda de carga..... | 112 |
| Figura 108 – Comportamento da oscilação de nível na chaminé de equilíbrio variando a vazão.....  | 114 |
| Figura 109 – Comportamento das amplitudes das oscilações de nível na chaminé de equilíbrio considerando a variação da vazão.....                                     | 115 |
| Figura 110 – Comportamento dos períodos das oscilações de nível na chaminé de equilíbrio considerando a variação da vazão.....                                       | 115 |
| Figura 111 – Comportamento dos períodos das oscilações de nível na chaminé de equilíbrio considerando a variação da vazão.....                                       | 116 |
| Figura 112 – Níveis d’água no canal de fuga aplicados nas simulações Padrão e CF5.....   | 117 |
| Figura 113 – Comportamento da oscilação de nível na chaminé de equilíbrio variando o nível no canal de fuga.....   | 118 |
| Figura 114 – Comportamento das amplitudes das oscilações de nível na chaminé de equilíbrio segundo o nível no canal de fuga.....                                     | 119 |
| Figura 115 – Comportamento do fator de amortecimento das oscilações de nível na chaminé de equilíbrio variando o nível no canal de fuga.....                         | 119 |
| Figura 116 – Comportamento da oscilação de nível na chaminé de equilíbrio variando o tempo de manobra.....   | 121 |
| Figura 117 – Comportamento das amplitudes das oscilações de nível na chaminé de equilíbrio para as simulações que variam o tempo de fechamento do distribuidor.....  | 122 |

|   |     |
|---|-----|
| Figura 118 – Comportamento dos períodos das oscilações de nível na chaminé de equilíbrio para as simulações que variam o tempo de fechamento do distribuidor. ....              | 122 |
| Figura 119 – Comportamento do fator de amortecimento das oscilações de nível na chaminé de equilíbrio para as simulações que variam o tempo de fechamento do distribuidor. .... | 123 |
| Figura 120 – Comparação das oscilações de nível na chaminé de equilíbrio para as Simulações 1a e 1b. ....   | 125 |
| Figura 121 – Comparação das oscilações de nível na chaminé de equilíbrio para as Simulações 2a e 2b. ....   | 126 |
| Figura 122 – Comparação das oscilações de nível na chaminé de equilíbrio para as Simulações 3a e 3b. ....   | 127 |

## LISTA DE QUADROS

|   |     |
|---|-----|
| Quadro 1 - Características dos túneis utilizados no estudo de RAHM (1958). ....                       | 28  |
| Quadro 2 – Aquisição de dados nas estruturas.....   | 36  |
| Quadro 3 –Amplitude e período das três primeiras oscilações da rejeição de 1° de outubro de 2004..... | 65  |
| Quadro 4 – Amplitude e período das três primeiras oscilações da rejeição de 4 de julho de 1999.....   | 68  |
| Quadro 5 – Coeficientes de perda de carga localizada adotados. ....                                   | 74  |
| Quadro 6 - Dados de entrada no programa ESTRANHE-IPH.....   | 92  |
| Quadro 7 - Dados de entrada no programa ESTRANHE.....   | 92  |
| Quadro 8 - Dados de entrada no programa CHAMINE-IPH.....  | 94  |
| Quadro 9 - Dados de entrada no programa CHAMINE.....  | 94  |
| Quadro 10 - Dados de entrada no programa ESTRANHE-IPH.....  | 97  |
| Quadro 11 - Dados de entrada no programa ESTRANHE.....  | 97  |
| Quadro 12 - Dados de entrada no programa CHAMINE-IPH.....   | 98  |
| Quadro 13 - Dados de entrada no programa CHAMINE.....   | 98  |
| Quadro 14 - Características da simulação padrão.....  | 100 |
| Quadro 15 - Áreas aplicadas à chaminé de equilíbrio nas simulações.....                               | 101 |
| Quadro 16 - Dados característicos das oscilações, para variação de área da chaminé. ....              | 101 |
| Quadro 17 - Comprimentos aplicados ao túnel de fuga nas simulações.....                               | 104 |
| Quadro 18 - Dados característicos das oscilações, para variação do comprimento do túnel de fuga.....  | 105 |
| Quadro 19 - Áreas aplicadas ao túnel de fuga nas simulações.....                                      | 107 |
| Quadro 20 - Dados característicos das oscilações, para variação da área do túnel de fuga.....         | 108 |
| Quadro 21 – Coeficientes de perda de carga aplicados nas simulações.....                              | 110 |
| Quadro 22 - Dados característicos das oscilações, para variação do comprimento do túnel de fuga.....  | 112 |
| Quadro 23 - Vazões aplicadas nas simulações.....  | 113 |
| Quadro 24 - Dados característicos das oscilações, para variação da vazão.....                         | 115 |
| Quadro 25 - Níveis aplicados nas simulações para o canal de fuga.....                                 | 116 |
| Quadro 26 - Dados característicos das oscilações, para variação de nível no canal de fuga.....        | 117 |
| Quadro 27 - Tempos de fechamento do distribuidor considerados nas simulações.....                     | 120 |

|   |     |
|---|-----|
| Quadro 28 - Dados característicos das oscilações, para variação do tempo de fechamento do distribuidor. ....                                      | 122 |
| Quadro 29 – Características das simulações de situações de projeto – Nível inicial no canal de fuga igual a 333,75m – Rejeição de 1275MW .....    | 124 |
| Quadro 30 – Características das simulações de situações de projeto – Nível inicial no canal de fuga igual a 342,23 m – Rejeição de 1200 MW. ....  | 126 |
| Quadro 31 – Características das simulações de situações de projeto – Nível inicial no canal de fuga igual a 349,79 m. – Rejeição de 1325 MW. .... | 127 |

## LISTA DE SÍMBOLOS

### Letras minúsculas:

- $a$  = celeridade da onda ( $LT^{-1}$ )
- $e$  = rugosidade (L)
- $e_s$  = espessura das paredes (L)
- $dy$  = infinitesimal de posição (L)
- $dt$  = infinitesimal de tempo (T)
- $f$  = coeficiente de atrito
- $g$  = aceleração da gravidade ( $LT^{-2}$ )
- $h$  = perda de carga (L)
- $k$  = coeficiente de perda de carga
- $k'$  = rugosidade hidráulica equivalente (L)
- $k_s$  = diâmetro equivalente do grão de areia, experiência de Nikuradse (L)
- $l$  = comprimento (L)
- $n$  = coeficiente de Manning
- $p$  = pressão ( $ML^{-1}T^{-2}$ )
- $t$  = tempo (T)
- $t_m$  = rugosidade normal (L)
- $t_n$  = rugosidade natural (L)
- $x$  = posição, sentido horizontal (L)
- $y$  = posição, sentido vertical (L)
- $z$  = coeficiente (função da perda de carga relativa)

### Letras maiúsculas

- $A$  = área ( $L^2$ )
- $C$  = razão potência/rendimento
- $C'$  = coeficiente que leva em consideração as condições de vinculação da canalização
- $D$  = diâmetro (L)
- $D_m$  = diâmetro equivalente médio (L)
- $D_n$  = diâmetro equivalente nominal (L)
- $D_h$  = diâmetro hidráulico (L)
- $E$  = módulo de elasticidade do material do conduto
- $F$  = variável auxiliar
- $H$  = altura de coluna d'água, carga hidráulica (L)
- $J$  = perda de carga unitária



$K$  = módulo de compressibilidade do fluido  
 $L$  = comprimento (L)  
 $Na$  = nível d'água (L)  
 $P$  = potência ( $ML^2T^{-3}$ )  
 $Q$  = vazão ( $L^3T^{-1}$ )  
 $Re$  = número de Reynolds  
 $R_h$  = raio hidráulico (L)  
 $V$  = velocidade ( $LT^{-1}$ )  
 $W$  = peso ( $MLT^{-2}$ )  
 $Y$  = cota (L)  
 $T$  = período (T)  
 $Z$  = cota (L)

### Letras gregas

$\phi$  = coeficiente de perda de carga total  
 $\gamma$  = peso específico ( $ML^{-1}T^{-1}$ )  
 $\rho$  = massa específica ( $ML^{-3}$ )  
 $\tau$  = tensão cisalhante ( $ML^{-1}T^{-2}$ )  
 $\Delta t$  = intervalo finito de tempo (T)  
 $\Delta y$  = intervalo finito de posição (L)  
 $\eta$  = rendimento  
 $\delta$  = rugosidade relativa (L)  
 $\alpha$  = ângulo  
 $\pi$  = constante pi = 3,1416....

## RESUMO

Tendo em vista que as chaminés de equilíbrio são estruturas importantes na proteção dos circuitos hidráulicos das usinas hidrelétricas contra os fenômenos transientes que ocorrem rotineiramente durante sua operação, realizou-se uma investigação sobre a influência dos parâmetros físicos no desempenho e conseqüentemente no dimensionamento de chaminés de equilíbrio simples localizadas a jusante das turbinas, caso aplicado a Usina Hidrelétrica de Serra da Mesa.

Os parâmetros estudados foram: área da chaminé, comprimento e área do túnel de fuga, perda de carga, vazão, nível no canal de fuga e tempo de manobra.

Foram coletados dados na Usina Hidrelétrica de Serra da Mesa e em uma estrutura laboratorial existente no LAHE, ambas pertencentes a FURNAS Centrais Elétricas S.A, referentes a situações de regimes permanentes (operação normal) e de regimes transientes. Estes dados foram utilizados na determinação da perda de carga linear nos túneis e das características das oscilações em suas chaminés de equilíbrio.

Para o estudo da perda de carga linear em túneis, também foram feitas medições, em regime permanente, na Usina Hidrelétrica de Salto Forqueta – CERTEL - Cooperativa de Eletrificação Teutônia, e utilizados os dados da Usina Hidrelétrica Bugres fornecidos pela CEEE – Companhia Estadual de Energia Elétrica –RS. Com estes dados foram estabelecidas relações entre o coeficiente de atrito e o número de Reynolds para cada estrutura e realizada a sua comparação com valores teóricos.

Verificou-se, através da comparação com dados experimentais que os quatro modelos numéricos disponíveis estavam aptos à aplicação na seqüência da pesquisa, porém, elegeu-se o modelo CHAMINE-IPH devido a sua maior versatilidade e simplicidade de uso. Com a análise dos resultados das simulações numéricas realizadas foi possível a identificação da influência dos parâmetros físicos no comportamento do nível d'água em chaminés de equilíbrio simples durante regimes transientes.

Constatou-se que para a reprodução numérica de fenômenos transitórios em chaminés de equilíbrio a jusante das turbinas, é fundamental a consideração da oscilação do nível no canal de fuga e dos coeficientes de perda de carga adequados.

**Palavras-chave:** chaminé de equilíbrio, coeficiente de atrito, regime transiente.

## ABSTRACT

Considering the importance of surge tanks structures for the protection of hydro power plants circuits against transient flows that usually happen during their operation, it was accomplished an investigation of the physical parameters influence on the performance and on the scheme of the simple surge tanks situated down the turbines, case applied on Serra da Mesa Power Plant.

The studied parameters were: surge tank area, tailrace length and area, head losses, discharge, down reservoir level and shunting time.

It was collected data in Serra da Mesa Power Plant and in a laboratorial structure existent in the LAHE, both belonging to FURNAS Centrais Elétricas S.A. This data were relative to the permanent state, being used in the head loss in tunnels investigation, and to the transient state, being used in a study about the behavior of the water level in simple surge tanks.

For the head loss research, some measurements were also made during the permanent flow in Salto Forqueta Power Plant - CERTEL - Cooperativa de Eletrificação Teutônia, and the data provided by CEEE - Companhia Estadual de Energia Elétrica RS were used at Bugres Power Plant. It was possible to establish a relation between the friction factor and the Reynolds number for each structure and a comparison between the experimental and the theoretical friction factor.

It was checked through confrontation with experimental data, that the four available numerical models could be applied in this research sequence, however, it was elected for this investigation the CHAMINE-IPH model, due to its major versatility and simplicity of use. With the analysis of the simulation results it was possible to identify the physical parameters influence on the water level behavior in a simple surge tank during a transient flow.

It's primordial, to the numerical reproduction of the transient flows in a surge chamber situated down the turbines, the consideration of the down reservoir level oscillation and the adequate head losses coefficients.

**Key-words:** surge tank, friction factor, transient flow.

## 1 INTRODUÇÃO

As chaminés de equilíbrio são estruturas importantes na proteção dos circuitos hidráulicos de usinas hidrelétricas contra os fenômenos transitórios que nela ocorrem rotineiramente. Pesquisas sobre o funcionamento das chaminés de equilíbrio devem ser desenvolvidas visando otimizar o seu dimensionamento trazendo, assim, benefícios tanto econômicos quanto operacionais para as usinas hidrelétricas.

O conhecimento das principais características de funcionamento das chaminés de equilíbrio, amplitude, período e amortecimento das oscilações de nível, permite o dimensionamento seguro destas estruturas, tanto para a geração elétrica quanto para a integridade física das usinas.

Este conhecimento pode ser obtido através da determinação dos fatores que influenciam no comportamento do nível d'água em uma chaminé de equilíbrio durante um regime transiente, e qual a sua influência sobre ele.

Os parâmetros analisados neste trabalho foram: área da chaminé de equilíbrio, área e comprimento do túnel de fuga, vazões, nível de jusante, perda de carga e tempo de manobra. A influência destes parâmetros na operação das chaminés de equilíbrio simples e a jusante das turbinas foi estudada através de simulações numéricas no modelo CHAMINE-IPH, o qual simula regimes transientes em chaminés com estas características. Nestas simulações realizou-se a variação de um parâmetro por vez a fim de identificar as alterações provocadas no comportamento do nível na chaminé.

Atenção especial foi dada ao parâmetro perda de carga linear em túneis, devido à sua relevância neste estudo e no dimensionamento de usinas hidrelétricas. Assim, foram determinadas as curvas de perda de carga linear para os túneis de quatro estruturas: Usina Hidrelétrica de Serra da Mesa (FURNAS Centrais Elétricas S.A.), Usina Hidrelétrica de Salto Forqueta (CERTEL - Cooperativa de Eletrificação Teutônia), Usina Hidrelétrica Bugres (CEEE - Companhia Estadual de Energia Elétrica - RS) e estrutural laboratorial existente no LAHE/FURNAS.

A construção de chaminés de equilíbrio demanda um considerável investimento. Assim, espera-se com esta pesquisa contribuir para um maior conhecimento sobre os fatores que influenciam no funcionamento das chaminés de equilíbrio e, conseqüentemente, em seu dimensionamento, para que as suas dimensões venham a ser as mais adequadas às reais solicitações dos sistemas, a operação seja melhor controlada e a manutenção mais seguramente planejada.

## **2 OBJETIVO**

### **2.1 Objetivo Geral**

Avaliar a influência dos parâmetros físicos no dimensionamento de chaminés de equilíbrio simples a jusante das turbinas em usinas hidrelétricas, caso aplicado à Usina Hidrelétrica de Serra da Mesa.

### **2.2 Objetivos Específicos**

Pode-se definir, dentro deste estudo, os seguintes objetivos específicos:

- adquirir dados experimentais em laboratório e protótipo;
- determinar os coeficientes de atrito em túneis baseando-se nas informações disponíveis na literatura corrente e nos valores obtidos em laboratório e protótipo;
- simular numericamente situações reais e comparar os resultados com dados experimentais, buscando a validação dos programas disponíveis;
- realizar simulações numéricas variando os diferentes parâmetros físicos, a fim de verificar efeitos e influência de cada um no comportamento do nível d'água na chaminé de equilíbrio durante um regime transiente;
- comparar resultados de simulações de possíveis situações de projeto aplicando parâmetros teóricos e parâmetros reais, a fim de verificar a sua influência no dimensionamento de chaminés.

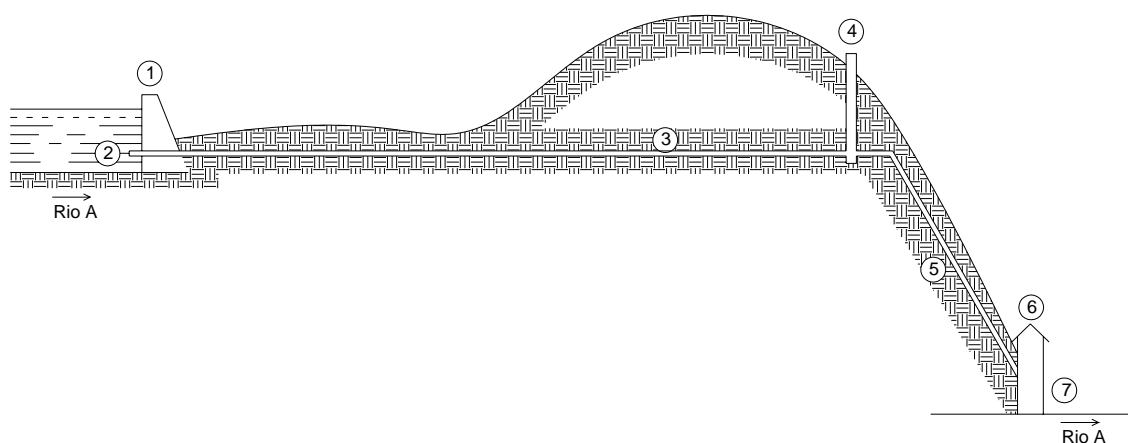
### 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1 Usinas Hidrelétricas

No início do desenvolvimento da geração hidrelétrica, construíam-se pequenas centrais de produção de energia e, devido às limitações dos sistemas de transmissão, os consumidores instalavam-se nas proximidades destas centrais para que recebessem diretamente a energia. A transmissão de energia por longas distâncias tornou-se técnica e economicamente viável no início do século XX, com a instalação de um equipamento de corrente alternada, fato que impulsionou a construção de grandes usinas hidrelétricas no mundo.

No Brasil, devido as suas grandes dimensões e potencial hídrico, tem-se gerado a maior parte da energia elétrica por usinas hidrelétricas.

A Figura 1 apresenta os principais componentes de uma central hidrelétrica, tipo desvio, sendo cada um deles constituído por um conjunto de obras e instalações.



**Figura 1** – Central em desvio (ZULCY *et al.*, 1983)

(1) *Barragem*: estrutura construída transversalmente ao curso d'água podendo ter três finalidades:

- a) a elevação do nível das águas a fim de proporcionar um desnível para gerar uma queda;
- b) a criação de um reservatório capaz de regularizar o deflúvio; ou
- c) o levantamento do nível d'água para possibilitar a entrada da água em um canal, túnel ou tubulação que a conduza para a casa de força (usinas de derivação).

(2) *Tomada d'água*: estrutura de captação e condução da água do reservatório até os órgãos adutores e daí às turbinas. Possui dispositivos para impedir a entrada de corpos flutuantes e fechar a entrada d'água quando for necessário.

(3) *Órgão adutor de baixa pressão*: construção que liga a tomada d'água à chaminé de equilíbrio ou câmara de carga. Essa ligação pode ser efetuada por:

- a) canais ou túneis com lâmina d'água livre;
- b) tubulações;
- c) túneis.

(4) *Chaminé de equilíbrio*: estrutura hidráulica constituída, basicamente, por construções verticais com as formas mais variadas. Suas funções são aliviar o excesso de pressões causado pelo golpe de aríete e proporcionar suprimentos de água capazes de reduzir depressões.

A chaminé de equilíbrio, tendo papel fundamental na proteção do sistema elétrico e hidráulico da usina contra as variações de pressão e velocidades do regime transitório, será melhor discutida, posteriormente, em item específico.

(5) *Órgão adutor de alta pressão*: construção que liga a chaminé de equilíbrio ou a tomada d'água às turbinas. Esta tubulação está sujeita a pressões internas crescentes, de cima para baixo, até que seja alcançada a altura de queda estática da usina, acrescida do eventual golpe de aríete.

(6) *Casa de força*: é o local de instalação das turbinas hidráulicas, geradores elétricos, reguladores, painéis e outros equipamentos do sistema elétrico da geração.

(7) *Restituição da água ao leito do rio*: obra construída com a finalidade de devolver a água turbinada ao leito natural do rio. Existem casos onde a restituição é praticamente direta e casos onde se faz necessária a construção de canais ou galerias de restituição.

Outros dois componentes de uma central hidrelétrica, não apresentados na Figura 1, são o vertedouro e a descarga de fundo:

*Vertedouro*: dispositivo que permite a passagem direta de água para jusante da barragem, sendo necessário para descarregar as cheias e evitar que a barragem seja danificada.

*Descarga de fundo*: abertura (ou conjunto de aberturas) em forma de galeria ou de túnel, fechada por comporta ou por válvula, localizada altimetricamente próxima ao fundo do rio, que atravessa ou circunda uma barragem. Ela pode ou não existir e suas finalidades são:

- a) esvaziar o reservatório quando for necessário;

- b) evacuar os sólidos decantados no reservatório;
- c) liberar água durante a parada completa das turbinas;
- d) escoar total ou parcialmente as águas de enchente;
- e) desviar o rio durante a construção da barragem.

A geração da energia hidrelétrica se dá pelo aproveitamento da diferença de energia potencial existente entre o nível d'água de montante e jusante das turbinas. Sendo a água do reservatório a montante conduzida por tubulações para jusante a energia potencial da queda é transformada em energia cinética e de pressão, que por sua vez promove a rotação da turbina e junto com ela o gerador. Atualmente são usados dois tipos de turbinas hidráulicas, as de reação (tipo Francis e de hélices), onde o trabalho mecânico é obtido pela transformação da energia cinética e de pressão da água em escoamento através das partes girantes, e as turbinas de ação (tipo Pelton), que transformam somente a energia cinética da água em trabalho mecânico (SCHREIBER, 1977 e ZULCY *et al.*, 1983).

A energia elétrica produzida pelo gerador é proporcional ao produto da vazão turbinada pela altura de queda d'água. Em geral são usados geradores síncronos, porque os sistemas de potência devem operar com frequência fixa. Para controlar a potência elétrica do conjunto, são usados reguladores:

- a) de tensão, que controlam a tensão nos terminais do gerador;
- b) de velocidade, que controlam a frequência, através da variação de potência, atuando no sistema de distribuição da turbina.

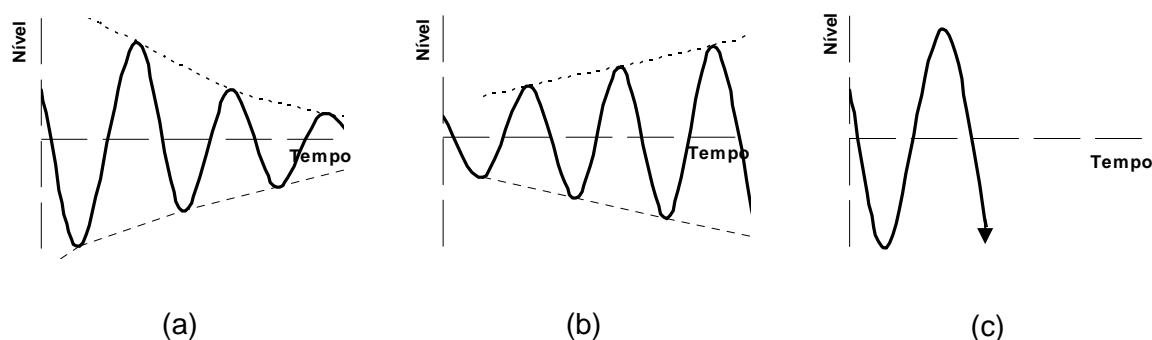
Durante o funcionamento das turbinas, a massa d'água aduzida tem uma velocidade e, conseqüentemente, uma inércia de movimento. Quando as turbinas são totalmente fechadas, ou seja, quando ocorre uma *rejeição de carga*, a "velocidade" da massa d'água se transforma em um aumento de pressão, nos órgãos adutores, que se propaga em forma de uma onda de pressão com grande velocidade para montante, até o ponto onde a tubulação adutora encontra uma bacia com nível d'água livre, sendo então refletida a onda no sentido contrário, percorrendo o sistema para jusante, diminuindo a pressão.

No caso contrário, quando as turbinas, depois de uma parada ou depois da operação com carga reduzida, são abertas, a massa d'água deve ser acelerada por meio de uma diminuição de pressão na entrada das turbinas e ao longo do sistema adutor, que produz uma depressão na tubulação. A propagação da onda dessa diminuição de pressão d'água obedece às mesmas leis (SCHREIBER, 1977).



Quando as turbinas abrem ou fecham parcialmente, as ondas de pressão geradas no circuito hidráulico da usina devem ser amortecidas rapidamente pelo sistema. Ocorre que estas variações de pressão alteram a queda disponível nas turbinas e, conseqüentemente, a descarga necessária para a geração de uma potência constante, fazendo com que os reguladores entrem em operação, abrindo e fechando as palhetas das turbinas até que as oscilações praticamente desapareçam. Além das inconveniências dessas movimentações prolongadas do mecanismo das turbinas (que podem causar desgaste prematuro), a variação alternada da vazão turbinada influencia nas oscilações de nível nas câmaras de equilíbrio, podendo amplificá-las ou mesmo permitir a entrada de ar no sistema, devido à sobreposição de efeitos, levando o sistema ao colapso.

Na Figura 2 (a) pode-se verificar a situação normal e desejada, onde as oscilações na câmara de equilíbrio são amortecidas, enquanto na Figura 2 (b) as oscilações são amplificadas e na (c) ocorre a entrada de ar no sistema, situações não desejáveis nas centrais hidrelétricas.



**Figura 2** – Oscilações de nível em uma câmara de equilíbrio durante um regime transitório (SCHREIBER, 1977).

### 3.2 Transientes Hidráulicos

Os sistemas hidráulicos constituídos de tubulação com água sob pressão podem sofrer alterações nas condições de escoamento caracterizadas pela variação de pressão e de velocidade de escoamento do fluido em função do tempo, ocasionando regimes variados. Chama-se transiente ou transitório hidráulico, o regime variado que ocorre durante a passagem de um regime permanente para outro regime permanente. Assim, qualquer alteração no movimento ou paralisação eventual de um elemento do sistema dá origem aos chamados fenômenos transitórios (SANTOS & CASTRO, 2004).

A gama de problemas de engenharia ligados ao fenômeno de transientes hidráulicos tem sido consideravelmente grande nos últimos anos. O que contribui para

isto é a construção de grandes hidrelétricas com complexos sistemas de condutos forçados, onde reguladores sensíveis de turbinas e dispositivos para a estabilidade do sistema hidráulico tornam-se cada vez mais importantes.

Nas análises do fenômeno transiente em um conduto sob pressão, a compressibilidade do fluido e a elasticidade das paredes do conduto devem ser levadas em consideração e aplica-se então a teoria da coluna elástica. Porém, em casos onde existe uma superfície livre para oscilar, estes parâmetros podem ser desprezados e aplica-se então a teoria da coluna rígida, a qual estuda a oscilação em massa (MAESTRI, 1985).

### 3.2.1 Teoria da Coluna Rígida

Esta teoria baseia-se nas seguintes hipóteses simplificativas (MENÉNDEZ, 1985):

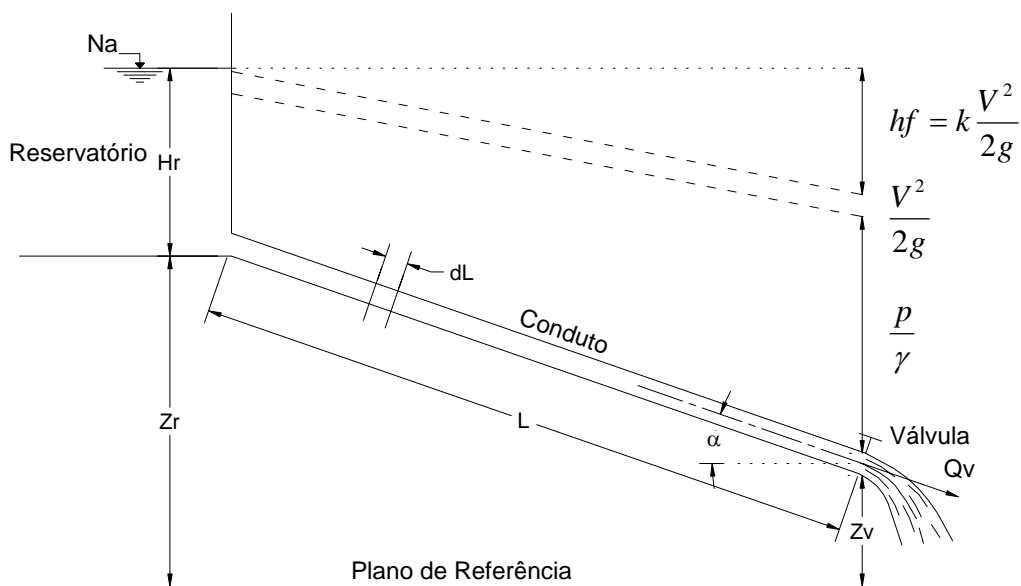
- a) fluido incompressível;
- b) condutos com paredes inelásticas;
- c) meio contínuo;
- d) escoamento unidimensional;
- e) pressão mínima maior que a pressão de vapor do fluido;
- f) perdas de carga e potencial de velocidade negligenciáveis.

Aplicando-se a equação da conservação da quantidade de movimento a um elemento isolado de fluido ( $dL$ ) em um conduto forçado, conforme Figuras 3 e 4, tem-se (MENÉNDEZ, 1985 e MAESTRI, 1985):

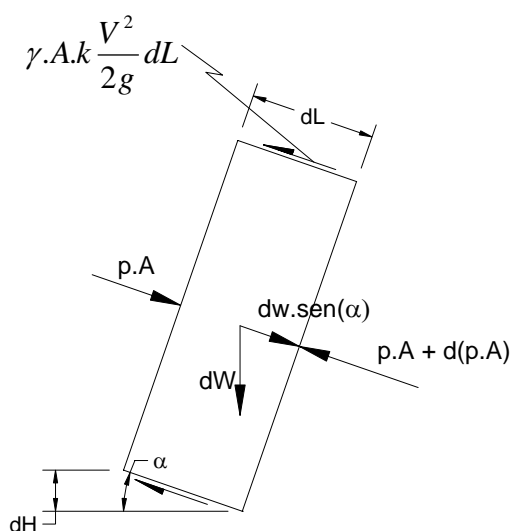
$$pA - (p + dp).A + dW \cdot \text{sen}(\alpha) \pm \gamma \cdot A \frac{kV^2}{2gL} dL = \frac{\gamma}{g} \cdot A \cdot dL \frac{dV}{dt}$$

onde:

- $p$  = pressão;
- $A$  = área do conduto forçado;
- $\alpha$  = ângulo entre o conduto e o plano de referência;
- $\gamma$  = peso específico do fluido;
- $k$  = coeficiente de atrito;
- $V$  = velocidade;
- $g$  = aceleração da gravidade;
- $L$  = comprimento do conduto.



**Figura 3** – Esquema de um circuito hidráulico com conduto sob pressão.



**Figura 4** – Detalhe do elemento de fluido e as forças atuantes na Figura 3.

Sendo  $dW$  o peso do elemento dado por  $\gamma.A.dL$  e  $\text{sen}(\alpha) = dH/dL$ , e dividindo por  $\gamma.A$ , chega-se a:

$$-\frac{dp}{\gamma} + dH \pm \frac{kV^2}{2gL} dL = \frac{dL}{g} \frac{dV}{dt} \quad (1)$$

O sinal do termo de perda de carga deve indicar que ela é sempre contrária ao sentido do escoamento.

Utilizam-se, então, para a solução de problemas de oscilação em massa, a Equação (1) e a equação da conservação de massa.

### 3.2.2 Teoria da Coluna Elástica

Na teoria da coluna elástica leva-se em consideração a capacidade do fluido e do conduto em armazenar energia pela compressibilidade do fluido e elasticidade das paredes. Encontra-se, então, um modelo mais complexo e com número menor de hipóteses restritivas (CASALAS, 2003).

Isolando-se novamente um elemento de fluido em um conduto sobpressão, similar ao da Figura 2, e aplicando-se a ele a equação da quantidade de movimento e a equação da continuidade, deduz-se as Equações (2) e (3) (CHAUDHRY, 1979 e WYLIE & STREETER, 1993).

$$\frac{\partial V}{\partial t} + V \frac{\partial V}{\partial x} + g \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{fV|V|}{2D} = 0 \quad \text{Quantidade de movimento} \quad (2)$$

$$\frac{\partial H}{\partial t} + V \frac{\partial H}{\partial x} - V \operatorname{sen}(\alpha) + \frac{a^2}{g} \frac{\partial V}{\partial x} = 0 \quad \text{Continuidade} \quad (3)$$

onde:

$t$  = tempo;

$x$  = posição;

$V$  = velocidade do escoamento;

$|V|$  = módulo da velocidade do escoamento;

$H$  = carga hidráulica;

$g$  = aceleração da gravidade;

$f$  = coeficiente de atrito de Darcy-Weisbach;

$D$  = diâmetro do conduto;

$a$  = celeridade da onda de pressão da pela Equação (4)

$$a = \sqrt{\frac{K/\rho}{1 + C' \frac{D K}{e_s E}}} \quad (4)$$

onde  $C'$  é um coeficiente que leva em consideração as condições de vinculação da canalização (Parmakian<sup>1</sup>, 1955 .*apud* STREETER e LAI, 1962 e HALLIWELL, 1963),  $K$  é

---

<sup>1</sup> PARMAKIAN, J. *Waterhammer analysis*. New York: Prentice-Hall, Inc., 1955. 15p.

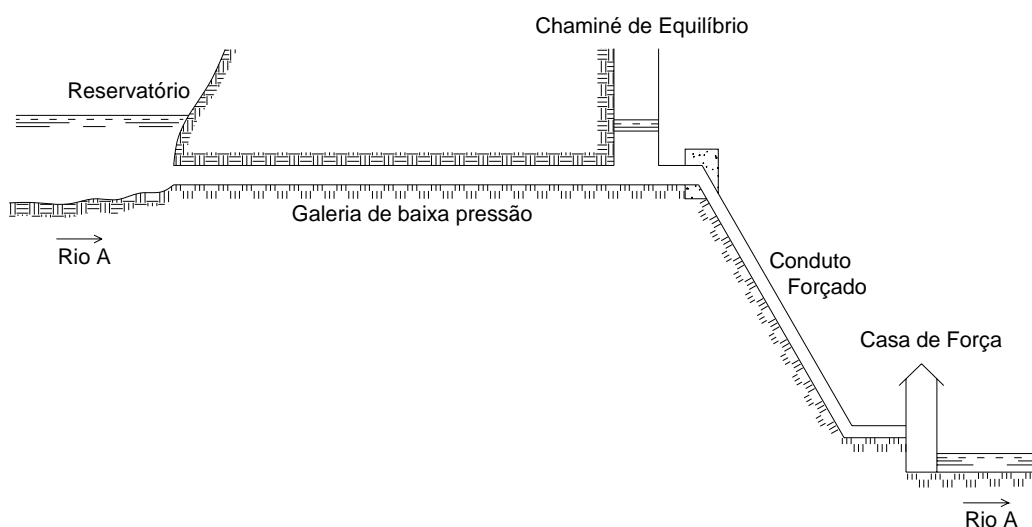
o módulo de compressibilidade do fluido,  $\rho$  é a massa específica,  $e_s$  é a espessura das paredes e  $E$  é o módulo de elasticidade do material do conduto.

### 3.3 Chaminés de Equilíbrio

As chaminés de equilíbrio são estruturas na forma de reservatórios com superfície livre, construídas em pontos estratégicos de circuitos hidráulicos sujeitos ao regime transiente, com a finalidade de reduzir os efeitos do regime transitório ocasionado por manobras intencionais ou não.

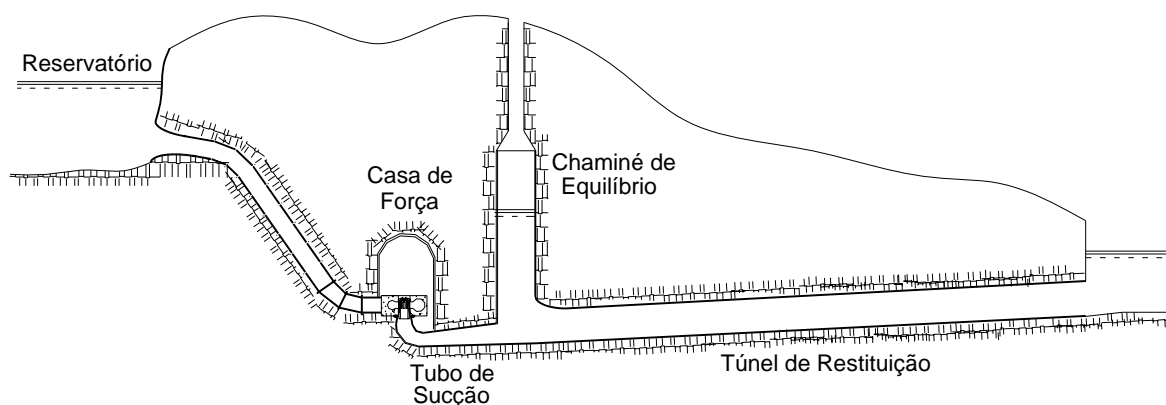
A posição da chaminé de equilíbrio é determinada a partir das características de cada sistema.

Em usinas hidrelétricas, caso os órgãos adutores possuam comprimento muito elevado, como em uma central de desvio, onde um túnel ou tubulação de adução é ligado a um conduto forçado de alta pressão, é comum a instalação de uma chaminé de equilíbrio na junção entre os dois, como no caso da Figura 5. Isto se justifica por dois motivos: o primeiro é o de amenizar os efeitos do golpe de aríete, pois a intensidade das sobrepressões geradas pelo fechamento das turbinas é diretamente proporcional à velocidade do escoamento e ao comprimento do conduto. Como a redução na velocidade do escoamento esbarra em fatores econômicos, pois exigiria tubulações de maiores diâmetros e, conseqüentemente, com paredes mais espessas, surge a necessidade de fazer com que o comprimento do conduto seja o menor possível. A segunda tarefa da chaminé é fornecer às turbinas, no caso de um aumento rápido da descarga, o volume d'água necessário até que a massa d'água no conduto adutor seja suficientemente acelerada para equilibrar o sistema. (ZULCY *et al.*, 1999 e SCHREIBER, 1977)



**Figura 5** - Chaminé de Equilíbrio entre os órgãos adutores de baixa e alta pressão.

Em centrais hidrelétricas que possuem a casa de força dentro de cavernas e o túnel de restituição fica sob pressão, a chaminé de equilíbrio é construída imediatamente a jusante dos tubos de sucção, como na Figura 6. Nos casos de abertura das turbinas, a chaminé atua amenizando os efeitos da sobrepressão gerada no tubo de sucção, e nos casos de fechamento, quando se produz uma queda de pressão no tubo de sucção, ela atua na forma de um reservatório alimentando o túnel de restituição, evitando, assim, que a estrutura mecânica da turbina seja afetadas pela subpressão.



**Figura 6** – Chaminé de equilíbrio imediatamente após os tubos de sucção.

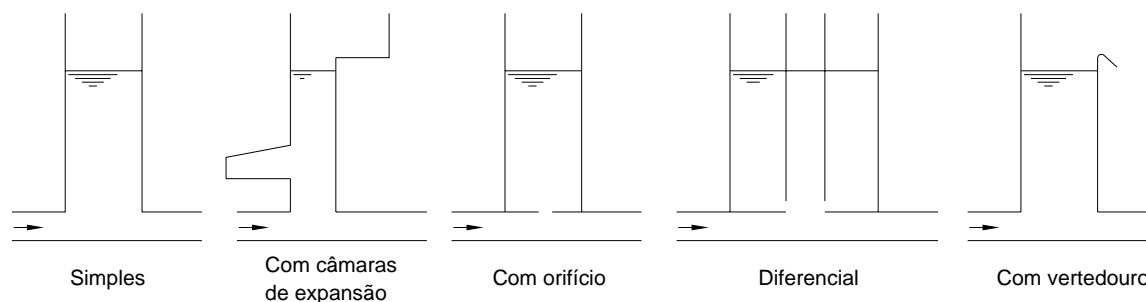
Provocado o regime transiente neste tipo de usina, o nível d'água passa a oscilar entre a chaminé e o canal de fuga perdendo carga, durante o percurso, junto às paredes do túnel por efeito viscoso, o que diminui gradativamente a amplitude das oscilações até que estas praticamente desapareçam.

As chaminés de equilíbrio são constituídas, basicamente, por construções verticais e várias podem ser as suas configurações.

A forma mais simples é a cilíndrica ou de seção constante. Algumas outras formas foram desenvolvidas buscando reduzir o seu volume total, diminuir a amplitude das oscilações e acelerar o seu amortecimento. As principais formas alternativas são (SCHREIBER, 1977, MAESTRI, 1985 e WYLIE & STREETER, 1993):

- chaminés com câmaras de expansão;
- chaminés com orifício;
- chaminés diferenciais;
- chaminés com vertedouro,

como mostra a Figura 7:



**Figura 7** - Principais tipos de chaminé de equilíbrio (SCHREIBER, 1977 e MAESTRI, 1985).

Contudo, as chaminés simples ainda possuem um grande campo de aplicação, como em usinas de pequena descarga, onde podem representar a solução mais econômica, devido à simplicidade de construção, e um amortecimento satisfatório. Para o caso de usinas com grandes vazões e diversas tubulações compartilhando a mesma chaminé, as vantagens da forma simples estão relacionadas à facilidade de instalação de elementos e equipamentos hidráulicos.

As chaminés com câmaras de expansão são soluções típicas de usinas com alta queda e com níveis d'água constantes ou pouco variáveis no reservatório. O amortecimento de pequenas oscilações é garantido pelas menores seções e o amortecimento das grandes oscilações pela interferência dos alargamentos.

As chaminés com estrangulamento possuem um orifício simples ou diferencial entre a chaminé e o túnel de baixa pressão. São indicadas para casos de usinas com pequenas quedas, onde qualquer outro tipo de chaminé, conduziria, pelas condições de estabilidade, a volumes excessivos (Stucky<sup>2</sup>, 1958 *apud* MAESTRI, 1985).

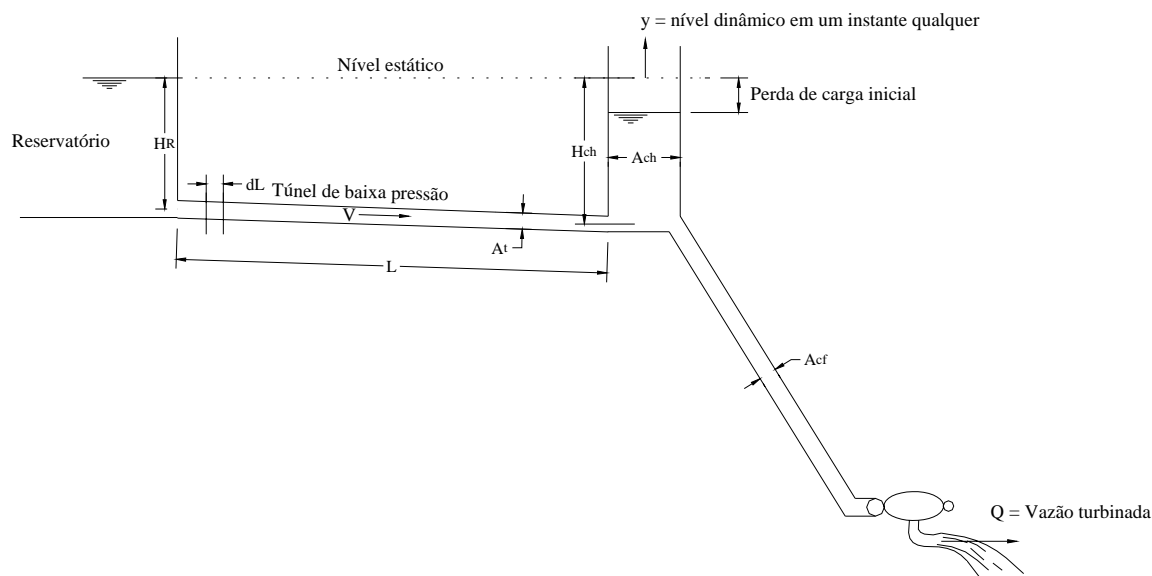
Na chaminé do tipo diferencial, a resistência do estrangulamento é dimensionada para o aumento de carga, sendo que o poço central funciona como uma válvula de segurança para o caso de rejeição de carga. O grande inconveniente deste tipo de chaminé é a complexidade de sua construção.

As chaminés com vertedouro têm aplicação limitada. No momento da ocorrência de um regime transiente a ascensão do nível d'água da chaminé é contida na cota da crista do vertedouro, que faz o seu descarte. Esta água descartada pode vir a fazer falta na seqüência da oscilação, quando a redução do nível vier a solicitar o abastecimento do sistema pela água da chaminé. Assim, este tipo de chaminé vem, normalmente, associado a outros tipos, sendo o vertedouro uma garantia para situações de emergência ou acidentes.

<sup>2</sup> STUCKY, A. *Chambres d'équilibre*. 3ed. Lausanne, Sciences & Technique, 1958. 182p.

### 3.3.1 Equações do Movimento

O movimento em uma chaminé de equilíbrio segue os princípios da teoria da coluna rígida. Aplicando-se a Equação (1) no túnel de baixa pressão da Figura 8, obtém-se (MAESTRI, 1985):



**Figura 8** – Desenho esquemático de uma central hidrelétrica com chaminé de equilíbrio a montante da casa de força.

$$\frac{1}{g} \frac{dV}{dt} \int_0^L dL = - \int_{H_R}^{H_{ch}+y} \frac{1}{\gamma} dp + \int_{H_R}^{H_{ch}} dH \pm \frac{kV^2}{2gL} \int_0^L dL$$

que resolvida entre seus limites fica:

$$\frac{L}{g} \frac{dV}{dt} + y \pm \frac{kV^2}{2g} = 0 \quad (5)$$

Em complemento à Equação (5), para que conhecida uma variação de vazão seja obtida a variação de nível na chaminé, utiliza-se a equação da continuidade:

$$Q_t = Q_{ch} + Q_{cf}$$

ou seja, a vazão no túnel é igual à vazão que passa pelo conduto forçado mais a vazão que entra na chaminé. Substituindo a vazão no túnel em função da velocidade, e a vazão na chaminé em função da variação de nível, tem-se:

$$VA_t = V_{ch} A_{ch} + Q_{cf}$$

ou:

$$VA_t = \frac{dy}{dt} A_{ch} + Q_{cf} \quad (6)$$



As Equações (5) e (6), que regem o movimento em uma chaminé de equilíbrio na ocorrência de um transiente, além das hipóteses da teoria da coluna rígida, possuem as seguintes simplificações (MAESTRI, 1985):

- a) o efeito da energia cinética está incluído na energia piezométrica, ou seja:

$$H_R = \frac{p_R}{\gamma} + \frac{V^2}{2g}$$

- b) o efeito da variação da quantidade de movimento da massa da água na chaminé é desprezada em relação à massa d'água nos túneis.

### 3.3.2 Solução da Oscilação em Massa em uma Chaminé de Equilíbrio pelo Método das Diferenças Finitas

Este método baseia-se na resolução passo a passo das equações da continuidade e conservação da quantidade de movimento, transformando as equações diferenciais em termos de diferenças finitas. Isto é, um operador diferencial é aproximado a um operador numérico, no caso, os infinitesimais  $dt$  e  $dy$ , são transformados em intervalos finitos  $\Delta t$  e  $\Delta y$ . Se  $y$  é função do tempo, usando a série de Taylor,

$\frac{dy}{dt} + O(\Delta t)^2 = \frac{\Delta y}{\Delta t}$ , sendo  $O(\Delta t)^2$  o erro de segunda ordem introduzido.

Então, as equações (5) e (6), em termos de diferenças finitas ficam (MAESTRI, 1985):

$$\frac{L}{g} \frac{\Delta V}{\Delta t} + y \pm \frac{kV^2}{2g} = 0 \quad (7)$$

$$VA_t = \frac{\Delta y}{\Delta t} A_{ch} + Q_{cf} \quad (8)$$

### 3.3.3 Necessidade da Instalação de Chaminé de Equilíbrio em uma Usina

De acordo com ELETROBRÁS (1999), a indicação inicial para que não haja necessidade da instalação de uma chaminé de equilíbrio é obtida a partir da seguinte relação:

$$\frac{L_{cf}}{H_b} \leq 5, \quad (9)$$

onde:

$L_{cf}$  comprimento do conduto forçado (m);

$H_b$  queda bruta (m).

Assim, se  $L_{cf} > 5H_b$ , tem-se uma indicação inicial de que uma chaminé de equilíbrio poderá ser necessária.

A verificação dessa necessidade deverá ser feita pelo critério da constante de aceleração do escoamento no conduto forçado, como apresentado a seguir:

$$t_h = \frac{V_{cf} L_{cf}}{gH_b}, \quad (10)$$

onde:

$t_h$  tempo de aceleração do escoamento no conduto forçado (s);

$V_{cf}$  velocidade do escoamento no conduto forçado (m/s);

$g$  aceleração da gravidade = 9,81 m/s<sup>2</sup>.

Para  $t_h < 3,0$  s, não há necessidade de instalação da chaminé. Para valores entre 3,0s e 6,0s a instalação é desejável, mas não obrigatória. Para  $t_h > 6,0$  s, é obrigatória a instalação da chaminé.

### 3.3.4 Dimensionamento de Chaminés de Equilíbrio

Uma chaminé de equilíbrio bem dimensionada atende as características de manter as amplitudes das oscilações de nível sempre dentro da chaminé, e amortecer rapidamente estas oscilações (SCHREIBER, 1977).

Com as oscilações de nível d'água na chaminé de equilíbrio, muda a queda disponível nas turbinas e, conseqüentemente, a descarga necessária para a geração de uma potência constante. Em conseqüência disso, os reguladores das turbinas abrem e fecham alternadamente até as oscilações praticamente desaparecerem. Além da inconveniência dessas movimentações prolongadas dos distribuidores, a variação alternada da vazão engolida pelas turbinas influencia nas oscilações. Caso a chaminé não consiga amortecer as oscilações de forma a estabilizar o sistema, diz-se que a chaminé não é hidraulicamente estável (exemplos Figura 2 (b) e (c)).

As instabilidades das chaminés podem ser de pequena amplitude, as quais são geradas por pequenas oscilações aleatórias, e de grande amplitude, sendo estas produzidas por mudanças significativas no regime de funcionamento da usina.

Os trabalhos sobre pequenas oscilações de Thoma<sup>3</sup>, 1910 e Jaeger<sup>4</sup>, 1960 *apud* YE *et. al.* (1992), mostraram que, tendo-se um regulador automático de turbina sob

---

<sup>3</sup> THOMA, D. *Zur theorie des wasserschlosses bei selbsttätig geregelten turbineanlagen*, Oldenburg, München, Germany, 1910.

<sup>4</sup> JAEGER, C. *A review of surge tank stability criteria*, J. Basic Engrg., ASME, 1960, 82(4), pp. 765-783.

condição isolada de carga, a chaminé de equilíbrio será hidráulicamente estável somente se a sua área da seção horizontal exceder a um certo valor mínimo. Este valor é geralmente chamado de *Área de Thoma* ( $A_{Th}$ ), a qual é função de parâmetros do conduto e da vazão. Se a condição não é satisfeita, o resultado será a instabilidade. De acordo com Jaeger<sup>5</sup>, 1954 *apud* YE *et. al.* (1992), a validade da fórmula de Thoma foi conferida, em um modelo, por Bonnard e Gardel.

No Brasil, a Eletrobrás indica em seus manuais (ELETROBRÁS, 1999) de centrais hidrelétricas que a área interna mínima da seção horizontal das chaminés de equilíbrio não deve ser inferior à área de Thoma.

### 3.3.4.1 Condição de Estabilidade de Thoma

Na prática, os reguladores do distribuidor das turbinas não mantêm vazões constantes, mas sim potências constantes, isto leva a:

$$Q(H + y) = Q_0 H_0 = \frac{P}{\eta \cdot w} = C \quad (11)$$

ou seja, a razão potência ( $P$ ) / rendimento ( $\eta \cdot w$ ) é igual à vazão multiplicada pela queda líquida em qualquer instante, sendo que os termos com índice 0 representam uma situação inicial e o termo  $Q(H+y)$  uma situação provocada por uma perturbação.  $H$  é a queda bruta e  $y$  é a variação em torno do nível do reservatório.

Diferenciando as Equações (8) e (11), assumindo potência e rendimento da turbina e área da chaminé como constantes, desenvolvendo e substituindo a Equação (7), chega-se a (JAEGER, 1977):

$$\begin{aligned} \frac{L}{g} \frac{A_{ch}}{A_t} \frac{d^2 y}{dt^2} - \frac{LC}{g A_t (H + y)^2} \frac{dy}{dt} + y + \frac{FC^2}{A_t^2 (H + y)^2} \\ + \frac{FA_{ch}^2}{A_t^2} \left( \frac{dy}{dt} \right)^2 + \frac{2CFA_{ch}^2}{A_t^2 (H + y)} \frac{dy}{dt} = 0 \end{aligned}$$

sendo:  $F = \frac{k}{2g}$ . Reorganizando, tem-se:

$$\begin{aligned} \frac{d^2 y}{dt^2} + \frac{gFA_{ch}}{A_t L} \left( \frac{dy}{dt} \right)^2 + \frac{dy}{dt} \left[ \frac{2gFC}{A_t L(H + y)} - \frac{C}{A_{ch}(H + y)^2} \right] \\ + \frac{gA_t}{LA_{ch}} y = - \frac{C^2 Fg}{LA_t A_{ch} (H + y)^2} \end{aligned} \quad (12)$$

---

<sup>5</sup> JAEGER, C. *Present trends in surge tank design*, Proc. Inst. Mech. Eng., London, 1954, 168(2), pp. 12-15.

O eixo em torno do qual as oscilações ocorrem pode ser encontrado substituindo a condição de equilíbrio, daí  $y = y_0 = \text{constante}$  e  $\frac{dy}{dt} = 0$ ,  $\frac{d^2y}{dt^2} = 0$ , levando à

Equação (12), esta se reduz a:

$$A_t^2 y_0 (H + y_0)^2 + FC^2 = 0 \quad (13)$$

ou

$$C = A_t (H + y_0) \sqrt{\frac{y_0}{-F}} = 0 \quad (14)$$

ou

$$y_0 = \frac{FC^2}{A_t^2 (H + y_0)^2} = -\frac{FQ_0^2}{A_t^2} = -FV_0^2 \quad (15)$$

Continuando a análise de (12), é conveniente mover o eixo horizontal para  $y_0 = -FV_0^2$ , então  $y = y_0 + s$  para eliminar termos. Considerando (15) e expandindo a série:

$$\frac{1}{(H + y_0 + s)^2} = (H + y_0)^{-2} - 2(H + y_0)^{-3}s + 3(H + y_0)^{-4}s^2 - \dots$$

obtem-se:

$$\begin{aligned} \frac{d^2s}{dt^2} + \frac{gFA_{ch}}{A_t L} \left( \frac{ds}{dt} \right)^2 + \frac{ds}{dt} \left[ \frac{2gFC}{A_t L(H + y_0 + s)} - \frac{C}{A_{ch}(H + y_0 + s)^2} \right] \\ + \left[ \frac{gA_t}{LA_{ch}} - \frac{C^2 Fg}{LA_t A_{ch}(H + y_0)^2} \left( \frac{2}{H + y_0} - \frac{3s}{(H + y_0)^2} + \dots \right) \right] s = 0 \end{aligned} \quad (16)$$

Para oscilações de pequenas amplitudes, os termos contendo  $(ds/dt)^2$  e  $s^2$  podem ser desprezados, e a Equação (16) pode ser simplificada como:

$$\begin{aligned} \frac{d^2s}{dt^2} + \left[ \frac{2gFC}{A_t L(H + y_0)} - \frac{C}{A_{ch}(H + y_0)^2} \right] \frac{ds}{dt} \\ + \frac{gA_t}{LA_{ch}} \frac{(H + 3y_0)}{(H + y_0)} s = 0 \end{aligned} \quad (17)$$

que tem a forma:

$$\frac{d^2s}{dt^2} + 2a \frac{ds}{dt} + bs = 0$$

ou seja, uma equação diferencial de segunda ordem cuja solução depende das raízes da equação de segundo grau:  $r^2 + 2ar + b = 0$

Para que as oscilações sejam progressivamente amortecidas, a constante  $a$  deve ser maior que zero, e isto leva a:

$$\frac{2gFC}{A_t L(H + y_0)} \geq \frac{C}{A_{ch}(H + y_0)^2}$$

ou

$$A_{ch_{\min}} \geq \frac{V_0^2}{2g} \cdot \frac{LA_t}{FV_0^2(H - FV_0^2)} = A_{Th} \quad (18)$$

Esta é a condição de Thoma para a estabilidade das chaminés de equilíbrio com oscilações de pequenas amplitudes. A Inequação (18) pode ser representada por:

$$A_{ch} = \varphi \cdot A_{Th} \quad (19)$$

sendo que  $\varphi$  é um fator sempre maior do que 1.

Um estudo mais aprofundado sobre estabilidade em chaminés de equilíbrio pode ser encontrado em JAEGER (1977).

Na prática, é freqüente que diversas unidades geradoras compartilhem a mesma chaminé de equilíbrio em uma hidroelétrica. Cada unidade é comunicada diretamente com a chaminé através de tubulações individuais e a estabilidade hidráulica da chaminé compartilhada depende de todos os reguladores de turbina envolvidos.

YE *et al.* (1992), estudaram a condição de estabilidade para chaminés compartilhadas por mais de uma unidade geradora em usinas hidrelétricas.

Para o caso de uma chaminé a jusante de duas turbinas assumidas como idênticas, operando com a mesma potência desenvolvida, YE *et al.* (1992) encontraram a seguinte equação de área transversal, para garantir a estabilidade hidráulica da chaminé;

$$A_{ch} = A_{Th} \left( 1 - \frac{3(1 - K1)}{2} \right) \quad (20)$$

sendo, neste caso:

$$A_{Th} = \frac{LA_t}{2g\phi(H - h_{w0} - 3h_{m0})} \quad (21)$$

onde:

$L$  = comprimento do túnel de fuga (m);

$A_t$  = área da seção transversal do túnel de fuga (m<sup>2</sup>);

$H$  = queda bruta (m);

$\phi$  = coeficiente total de perda de carga no túnel de fuga;

$h_{w0}$  = perda de carga total no túnel de fuga ( $\alpha V_0^2$ ) (m);

$h_{m0}$  = perda de carga na tubulação desde o reservatório superior até a chaminé (m);

$Q_0$  = vazão turbinada (m<sup>3</sup>/s), e

$$K1 = \frac{P_{10}}{\Sigma P_0 - P_{20}}, \text{ sendo } \Sigma P_0 = \text{potência inicial total, } P_{10} = \text{potência inicial da}$$

unidade 1 e  $P_{20}$  = potência inicial da unidade 2.

### 3.3.4.2 Altura da Chaminé de Equilíbrio

Em ELETROBRÁS (1985 e 1999 - manual de dimensionamento de centrais hidrelétricas) encontra-se a indicação de que a altura da chaminé de equilíbrio ( $H_c$ ) seja determinada desprezando-se as perdas no sistema adutor, pois, esta seria a condição mais crítica.

Pode-se calcular a elevação ( $Y_e$ ) do nível d'água estático máximo e a depressão ( $Y_d$ ) do nível d'água estático mínimo pela Equação (22):

$$Y_e = Y_d = V \sqrt{\frac{A_{ta} L}{g A_{ch}}} \quad (22)$$

onde:

$L$  = comprimento do conduto adutor (m);

$V$  = velocidade (m/s);

$A_{ta}$  = área interna da seção transversal da tubulação adutora ( $m^2$ );

$A_{ch}$  = área interna da chaminé de equilíbrio ( $m^2$ ).

Considerando-se as perdas no sistema adutor  $Y_E = z_e Y_e$ , onde:

$$z_e = 1 - \frac{2}{3}k + \frac{1}{9}k^2 \text{ e } k = \frac{h_{ta}}{Y_e} = \text{perda de carga relativa}$$

$h_{ta}$  perda de carga no sistema adutor, entre a tomada d'água e a chaminé (m), com a perda de carga por atrito na tubulação ( $h_a$ ) calculada para paredes lisas:  $k_a = 0,32$  (Scobey) ou  $k_a = 100$  (Strickler).

Para o cálculo da depressão  $Y_D$ , faz-se necessário verificar qual o caso mais desfavorável entre as seguintes situações:

1) Depressão consecutiva à elevação máxima, decorrente do fechamento total (100%) da turbina;

2) Depressão decorrente da abertura parcial de 50% a 100% da turbina.

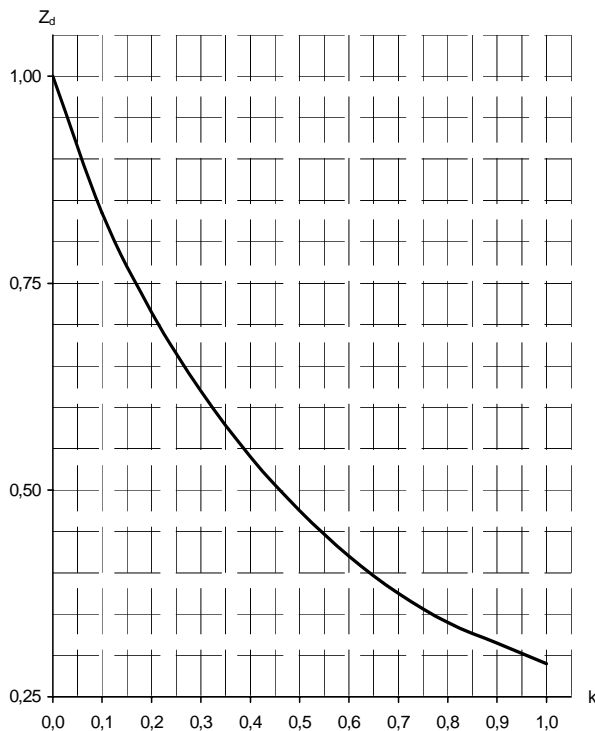
- Para a primeira verificação, procede-se como descrito a seguir.

Calcula-se  $Y_D = z_d Y_d$ .

O valor do coeficiente  $z_d$  é obtido do gráfico da Figura 9, entrando-se com o parâmetro:

$$k' = \frac{h'_{ta}}{Y_d} = \frac{h'_{ta}}{Y_e},$$

onde  $h'_{ta}$  é a perda de carga no sistema adutor, entre a tomada d'água e a chaminé (m), sendo a perda de carga por atrito na tubulação ( $h'_a$ ) calculada para paredes ásperas:  $k_a = 0,40$  (Scobey) ou  $k_a = 80$  (Strickler).



**Figura 9** – Gráfico de  $z_d$  em função de  $k'$  (ELETROBRÁS, 1999).

- Para a segunda verificação, procede-se de maneira análoga.

$$\text{Calcula-se } Y'_D = z'_d Y_d$$

O valor do coeficiente  $z'_d$  pode ser obtido do gráfico da Figura 10, entrando-se com o parâmetro  $k'$ .

Determina-se a altura da chaminé de equilíbrio por meio da seguinte expressão:

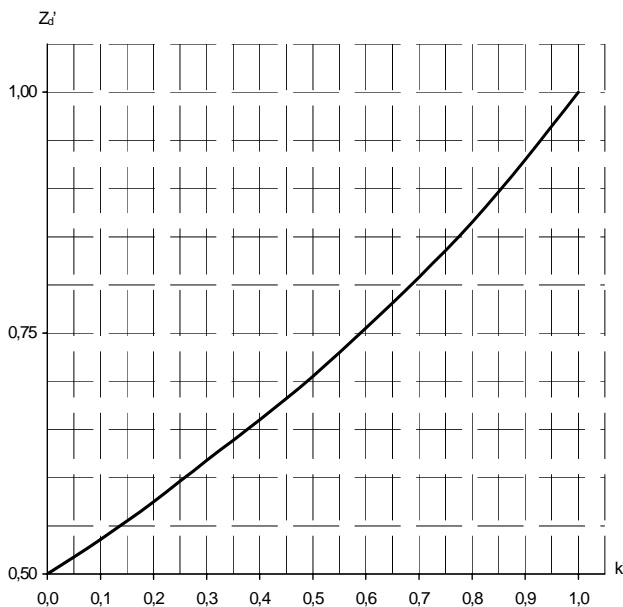
$$H_c = Y_E + y_E + (Y_D \text{ ou } Y'_D) + y_D + Y_R, \quad (23)$$

onde:

$y_E$  e  $y_D \cong 1,0\text{m}$  = acréscimo na altura da elevação e da depressão, por segurança;

$Y_R$  = depressão máxima do nível d'água do reservatório.

A amplitude da oscilação seria dada por  $Y_E + Y_D$ .



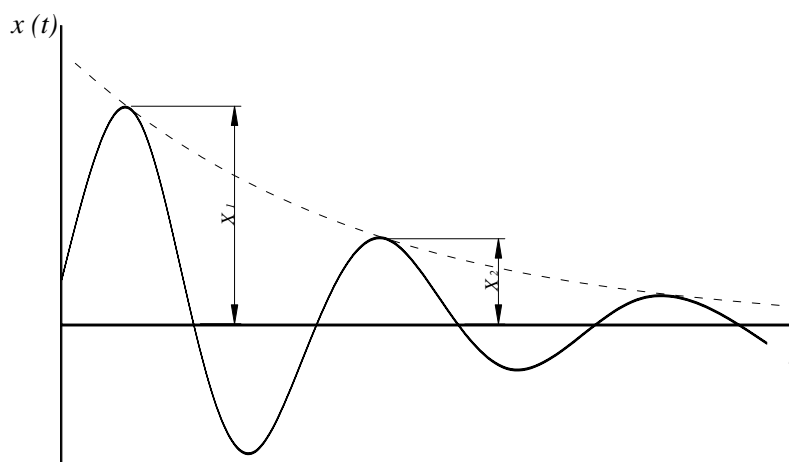
**Figura 10** – Gráfico de  $z'_d$  em função de  $k'$  (ELETROBRÁS, 1999).

Os projetos das chaminés de equilíbrio podem utilizar simulações numéricas como ferramentas durante o dimensionamento. Nestes casos, sendo a chaminé hidráulicamente estável, a primeira oscilação tem importância fundamental na determinação da altura da chaminé, pois seria esta a de maior amplitude.

O período das oscilações de nível em uma chaminé de equilíbrio pode ser estimado pela equação:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{A_{ch}L}{gA_{ta}}} \quad (24)$$

Para a análise do amortecimento das oscilações, calcula-se o fator de amortecimento observando-se a Figura 11. (MEIROVITCH, 2001)



**Figura 11** – Oscilações amortecidas.



O decremento logarítmico é dado por:

$$\delta = \ln \frac{X_1}{X_2} \quad (25)$$

e o fator de amortecimento ( $\zeta$ ) pode ser obtido da Equação (26)

$$\zeta = \frac{\delta}{\sqrt{(2\pi)^2 + \delta^2}} \quad (26)$$

Onde:

- $\zeta = 0$  retrata o movimento de oscilações harmônicas.
- $0 < \zeta < 1$  representa o movimento de oscilações que diminuem gradualmente de amplitude, sendo que quanto mais próximo de 1 está  $\zeta$ , maior é o amortecimento.
- $\zeta = 1$  corresponde ao amortecimento crítico e o movimento descreve um decaimento aperiódico.
- $\zeta > 1$  simboliza o amortecimento completo sendo o movimento caracterizado pelo decaimento aperiódico.

### 3.4 Simulações Numéricas

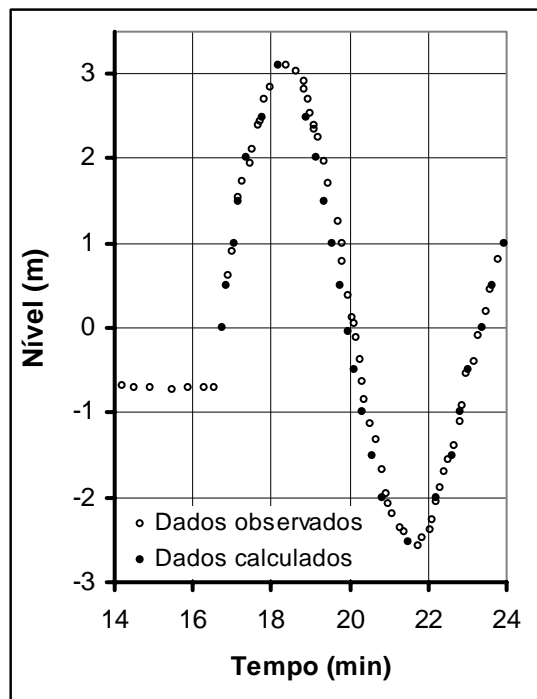
A representação dos fenômenos físicos através de equações é sem dúvida uma ferramenta muito importante para o desenvolvimento de projetos de engenharia. Isto possibilita que sejam realizadas simulações numéricas de situações extremas e, assim, que as estruturas venham a ser otimizadas.

Uma das maiores solicitações a que é exposto o circuito hidráulico de uma usina hidrelétrica é o fenômeno do transiente hidráulico. Seu equacionamento já é bem desenvolvido, e sua simulação numérica também já bem pesquisada, apresentando bons resultados.

STREETER *et al.* (1962), com um trabalho precursor, fizeram uma análise teórica do golpe de aríete com a inclusão das perdas hidráulicas por atrito levando a um grupo de equações diferenciais parciais não lineares. Um modelo numérico foi elaborado com as equações transformadas pelo método das características, e seus resultados foram comparados com dados experimentais.

A previsão do comportamento das pressões no trecho submetido ao golpe de aríete foi bem sucedida. Quanto às oscilações em tanques, os resultados numéricos não conseguiram representar com tanta fidelidade o desenvolvimento apresentado pelos dados experimentais, possuindo menores períodos e amortecimento mais lento.

GILL & ASCE (1974), simularam numericamente as oscilações de nível em chaminés de equilíbrio e obtiveram bons resultados quando comparados com dados experimentais, como visualiza-se na Figura 12.



**Figura 12** – Verificação do método computacional com dados de Tanzmuhle NABER (1964). (Adaptado de GILL & ASCE, 1974)

FRANCE (1978), simulou as oscilações transientes em uma chaminé de equilíbrio através de dois métodos e os comparou com resultados experimentais. O primeiro método usado por este autor foi de um valor simples inicial, e o segundo foi o método do preditor-corretor. As equações diferenciais, dinâmica e da continuidade, foram colocadas na forma de diferenças finitas e integradas passo-a-passo.

No primeiro método, todas as variáveis são levadas como elas ocorrem no início do intervalo de tempo. Iniciando a integração com os valores de  $V$  e  $H$  do regime permanente, a equação dinâmica torna-se:

$$\Delta V = \frac{-\Delta t}{L/g} (H \pm kV^n) \quad (27)$$

e a equação da continuidade, substituindo a velocidade do escoamento, fica:

$$\Delta H = \frac{(VA_{cf} - Q)}{A_{CH}} \Delta t \quad (28)$$

onde  $V$  é a velocidade do escoamento no conduto forçado,  $L$  e  $A_{cf}$  são, respectivamente, comprimento e área do conduto forçado,  $A_{CH}$  é a área da chaminé de equilíbrio,  $Q$  é a vazão turbinada e  $H$  é a diferença entre o nível do reservatório e o nível da chaminé.

Na técnica do preditor-corretor a aproximação é praticamente a mesma. Resolvendo as Equações (27) e (28) tomam-se estes resultados como valores preditos  $\Delta V_p$  e  $\Delta H_p$ , e no final do intervalo de tempo finito a primeira predição dos valores de  $V$  e  $H$  são:

$$V_p = V + \Delta V_p$$

$$H_p = H + \Delta H_p$$

estes valores são, então, corrigidos:

$$\Delta V_c = \frac{-\Delta t \left( H \pm kV^n + H_p \pm kV_p^n \right)}{\frac{L}{g} \cdot 2} \quad (29)$$

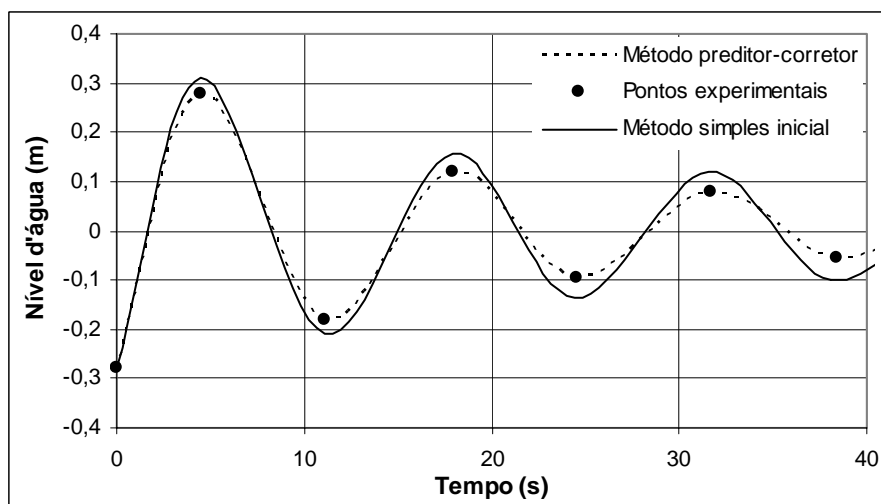
$$\Delta H_c = \frac{\Delta t}{A_{CH}} \left( \frac{(V + V_p) A_{cf}}{2} - Q \right) \quad (30)$$

Os valores corrigidos e utilizados seriam então:

$$V_c = V_p + \Delta V_c \quad (31)$$

$$H_c = H_p + \Delta H_c \quad (32)$$

A comparação com dados experimentais confirma o melhor ajuste do método preditor-corretor, como mostra a Figura 13.



**Figura 13** – Comparação dos métodos simples valor inicial e preditor-corretor com dados experimentais. (Adaptado de FRANCE, 1978)

MENÉNDEZ (1985), desenvolveu um modelo matemático para o estudo de transientes hidráulicos em condutos fechados. Na discretização do espaço das equações

diferenciais não lineares do movimento transitório, utilizou-se o método dos elementos finitos com elementos isoparamétricos lineares. Para a integração no tempo, empregou-se a técnica das diferenças finitas.

O programa desenvolvido em linguagem BASIC, por MENÉNDEZ (1985), tem a capacidade de prever pressões, velocidades e deformações com razoável exatidão quando comparado com soluções analíticas. A autora indica como vantagem da utilização do método dos elementos finitos, a possibilidade de aplicação de intervalos de tempo maiores que no método das características, produzindo-se a mesma precisão.

### **3.5 Perda de carga linear em túneis**

Durante o projeto de uma usina hidrelétrica, o cálculo das perdas de carga deve levar a valores o mais próximo possível dos reais.

Associada a todo o circuito hidráulico, a super ou subestimação da perda de carga pode levar à consideração de uma queda útil respectivamente menor ou maior do que a real. Isto pode levar à implantação de turbinas sub ou superdimensionadas que operam fora de seu ponto ótimo de funcionamento.

Quando as atenções são voltadas ao regime transiente, a perda de carga possui importância fundamental na diminuição das oscilações, devido ao seu efeito amortecedor. Para situações onde a perda de carga é subestimada, as chaminés de equilíbrio apresentarão altura superior à necessária, representando um desperdício econômico. Por outro lado a superestimativa das perdas pode levar ao dimensionamento de chaminés com altura reduzida, o que pode vir a apresentar conseqüências indesejadas durante a ocorrência de um fenômeno transitório de grandes proporções.

De acordo com SCHREIBER (1977), os valores dos coeficientes de perda de carga no sistema hidráulico devem ser escolhidos com muita cautela pelo projetista. Sua seleção deve estar baseada em experiências feitas em obras existentes, ou nos dados indicados na literatura, embora, às vezes, eles diverjam razoavelmente entre si. Ainda que sejam feitas considerações de perda de carga exatas, as mesmas podem mudar no decorrer do tempo de funcionamento da usina, devido a incrustações nas paredes, ou à sua maior rugosidade causada pela eventual agressividade da água.

O estudo das perdas de carga localizadas é tema bem desenvolvido, e os parâmetros para sua determinação já encontram-se bastante divulgados em manuais de projetos de centrais hidrelétricas, como ELETROBRÁS (1999), em bibliografias específicas sobre usinas, como SCHREIBER (1977), ZULCY (1999) e GULLIVER & ARNDT (1991), em livros específicos sobre perdas de carga como IDELCHIK (1996) e U.S. ARMY CORPS OF ENGINEERS (1973) e, de uma forma mais geral, em manuais de hidráulica.

As perdas de carga lineares para condutos de seções transversais circulares, com rugosidade homogênea, também já apresentam um estudo bastante aprofundado. A maneira de avaliar o coeficiente de atrito para escoamentos sob pressão nestes condutos é eficientemente definida através das formulações de Darcy-Weisbach em conjunto com a equação de Colebrook-White.

Através da análise comparativa de dados experimentais do escoamento em condutos forçados de seções circulares e não-circulares, hidraulicamente lisas, SILVA & SILVA (1997), verificaram a nítida influência do tipo da seção nos valores do coeficiente de atrito em regime turbulento liso. Assim, as equações para tubos de seção transversal circular não podem ser utilizadas sem restrições em condutos de seções não circulares, já que nestes existe o efeito das correntes de circulação e tensão de cisalhamento não uniforme ao longo das paredes do tubo, que modificam a estrutura do escoamento.

Os túneis escavados em rocha podem apresentar diversos formatos, porém a forma mais empregada é a seção ferradura (Figura 14), pois é considerada como sendo a melhor adaptada aos métodos de construção e a que promove a melhor distribuição das tensões internas da rocha. (RAHM, 1958)



**Figura 14** – Túnel seção ferradura, formas e exemplo.

No projeto de um túnel para a condução de água, a resistência hidráulica é um de muitos fatores que precisam ser conhecidos. Segundo autores como RAHM (1958), REINIUS (1970) e PENNINGTON (1998), é comum a utilização da Equação (33), conhecida como *fórmula universal de perda de carga* ou *equação de Darcy-Weisbach*, para o cálculo da perda de carga linear:

$$h_f = f \frac{L V^2}{D 2g} \quad (33)$$

sendo:

$h_f$  = perda de carga linear;

$f$  = coeficiente de atrito de Darcy-Weisbach;

- $L$  = comprimento do túnel;
- $V$  = velocidade média do escoamento;
- $g$  = aceleração da gravidade;
- $D$  = diâmetro do conduto.

Esta equação, obtida para tubos de seção circular, também é válida para condutos com outras geometrias de seção transversal (SCHIOZER, 1996).

Segundo SCHIOZER (1996) e PORTO (2001), o escoamento num tubo reto com seção circular implica um perfil de velocidade bidimensional para o qual há uma simetria axial. Na maioria dos condutos que não tenham seção circular ou não sejam retangulares de largura infinita, mesmo que retos, aparecem escoamentos secundários, o que origina perfis de velocidade tridimensionais, de modo que a tensão cisalhante tende a ser menor nos cantos que a média em todo o perímetro.

No tratamento analítico de seções não circulares, admite-se que a tensão tangencial média ao longo do perímetro molhado da seção varie de modo similar aos condutos circulares, onde ela se distribui uniformemente no perímetro e coincide com o valor médio da Equação (34) (PORTO, 2001):

$$\tau_o = \gamma R_h J, \quad (34)$$

onde:

- $\tau_o$  = tensão média de cisalhamento;
- $\gamma$  = peso específico do fluido;
- $R_h$  = raio hidráulico;
- $J$  = perda de carga unitária.

No cálculo de um conduto de seção qualquer, pode-se determinar um diâmetro hidráulico de uma seção que tenha a mesma perda de carga da seção considerada. Este diâmetro hidráulico é igual a quatro vezes o raio hidráulico que, por sua vez, é igual à razão entre a área da seção transversal e o perímetro molhado da mesma. Esta aproximação geométrica é tão mais válida quanto mais o valor do raio hidráulico da seção se aproximar da relação  $D/4$  do seu círculo circunscrito (PORTO, 2001).

A fórmula universal de perda de carga pode então ser reescrita, utilizando o conceito de diâmetro hidráulico ( $D_h$ ), como a Equação (35):

$$h_f = f \frac{L}{D_h} \frac{V^2}{2g}. \quad (35)$$

O coeficiente de atrito ( $f$ ) é adimensional, depende da forma do conduto no que diz respeito às seções longitudinal e transversal, depende da rugosidade das paredes

internas e das propriedades do escoamento e do fluido, expressas através do número de Reynolds ( $Re$ ) (SCHIOZER, 1996).

Para túneis escavados em rocha, alguns estudos foram realizados buscando a determinação do coeficiente de atrito.

RHAM (1958) realizou, na Suécia, um estudo sobre a perda de carga linear em túneis escavados em rocha, escolhendo treze túneis com escoamento sob pressão. No Quadro 1 encontram-se algumas características destes túneis que fazem parte de circuitos hidráulicos de usinas hidrelétricas.

**Quadro 1** - Características dos túneis utilizados no estudo de RAHM (1958).

| Túnel              | Comp. (m) | Área (m <sup>2</sup> ) | Diâm. Hid. (m) | Tipo de Rocha                         | $f$   |
|--------------------|-----------|------------------------|----------------|---------------------------------------|-------|
| Alfta (A)          | 3025      | 33,8                   | 6,16           | Granito-gnaiss                        | 0,086 |
| Blåsjön (B)        | 5620      | 57,1                   | 8,16           | Gnaiss-mica-xisto                     | 0,047 |
| Dönje (D)          | 4700      | 141,3                  | 12,84          | Gnaiss                                | 0,7   |
| Harsprånget (H)    | 2430      | 204,0                  | 15,4           | Granito                               | 0,052 |
| Järpströmmen (J)   | 4520      | 114,3                  | 11,52          | Ardósia siluriana                     | 0,048 |
| Krokströmmen (K)   | 2196      | 101,6                  | 10,88          | Granito                               | 0,048 |
| Nissaström (N)     | 1465      | 36,6                   | 6,52           | Granito-gnaiss                        | 0,101 |
| Porjus I (PI)      | 1194      | 57,4                   | 8,63           | Granito-gnaiss                        | 0,073 |
| Porjus II (PII)    | 1032      | 61,5                   | 8,64           | Granito-gnaiss                        | 0,055 |
| Selsfors (Se)      | 629       | 80,5                   | 9,68           | Ardósia negra com intrusão de granito | 0,114 |
| Sillre (Si)        | 1829      | 6,6                    | 2,84           | Gnaiss                                | 0,102 |
| Sunnerstaholm (Su) | 330       | 35,9                   | 6,48           | Granito-gnaiss                        | 0,104 |
| Tåsan (T)          | 6698      | 17,2                   | 4,48           | Gnaiss                                | 0,081 |

Obs: Os túneis das hidrelétricas de Dönje e Nissaström estão providos de grossos arcos de reforço, os quais se estendem sobre uma considerável parte do comprimento do túnel. A base do túnel da usina de Blåsjön é asfaltada.

As perdas de carga foram determinadas pela medição da diferença de nível d'água entre os extremos de montante e jusante dos túneis e as vazões, de forma gráfica, pelo diagrama de operação das turbinas.

Através de seus dados, RAHM (1958) encontrou uma relação que mostra que a perda de carga é proporcional ao quadrado da vazão (Figura 15), o que implica que todas as suas observações, que estão dentro da faixa de operação das usinas, foram em escoamento turbulento hidraulicamente rugoso, sendo desta forma  $f$  independente do número de Reynolds ( $Re$ ) e dependente somente da rugosidade das paredes ( $e$ ).

Os escoamentos se dividem em laminar, transicional e turbulento. O escoamento turbulento, em especial, pode ser separado em três tipos: (PORTO, 2001)

*Escoamento turbulento hidraulicamente liso* – situação em que as rugosidades das paredes da tubulação são completamente cobertas pela *subcamada limite laminar* (camada delgada de fluido, adjacente à parede, na qual a flutuação da velocidade não atinge os mesmos valores que nas regiões distantes da parede). Neste caso

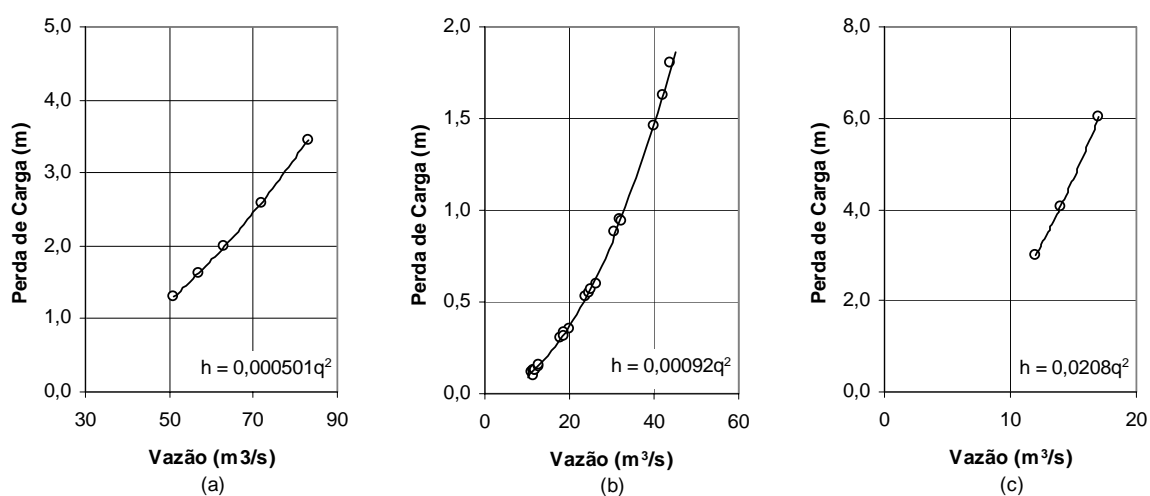
$$\frac{Re\sqrt{f}}{D/e} < 14,14 \text{ e o coeficiente de atrito uma função do número de Reynolds.}$$

*Escoamento turbulento hidraulicamente rugoso* – Situação em que as asperezas da parede afloram a subcamada limite laminar. Neste caso  $\frac{Re\sqrt{f}}{D/e} > 198$  e o coeficiente da atrito uma função do diâmetro e da rugosidade do conduto.

*Escoamento turbulento hidraulicamente misto ou de transição* – Condição intermediária, em que as asperezas maiores transpassam a subcamada limite laminar.

Neste caso  $14,14 \leq \frac{Re\sqrt{f}}{D/e} \leq 198$  e o coeficiente da atrito uma função do número de Reynolds e do diâmetro e rugosidade do conduto.

Para determinação da rugosidade, RAHM (1958) sugeriu um método que necessita da discretização das áreas ao longo do túnel (sugerindo aproximadamente 5m de distância entre as medições). Aplica-se sobre os valores de área medidos uma distribuição estatística do tipo normal de onde são determinadas áreas hipotéticas de seção transversal com 99% e 1% de frequência cumulativa.



**Figura 15** - Relação entre vazão e perda de carga para (a) Túnel de Blåsjön, (b) Túnel de Nissaström e (c) Túnel de Tåsan (Adaptado de RAHM, 1958).



A determinação de uma rugosidade relativa ( $\delta$ ) é feita pela Equação:

$$\delta = \frac{A_{99\%} - A_{1\%}}{A_{1\%}} 100\% . \quad (36)$$

A relação entre esta rugosidade relativa ( $\delta$ ) e a rugosidade equivalente absoluta ( $k$ ) pode ser representada através da Equação:

$$\delta^{-0,5} = 0,105 \cdot \log \frac{15}{k/R_h} \quad (37)$$

onde:

$A$  = área;

$R_h$  = raio hidráulico.

A Equação 38 foi sugerida por RAHM (1958) para o cálculo do coeficiente de atrito, estando ela baseada em seu estudo experimental que utilizou a fórmula universal de perda de carga e o conceito de diâmetro hidráulico.

$$f = 2,75 \cdot 10^{-3} \cdot \delta \quad (38)$$

A Equação (39) é indicada pelo U.S. ARMY CORPS OF ENGINEERS (1973) para a determinação do coeficiente de atrito, e a comparação de dados experimentais com a curva ajustada é mostrada na Figura 16.

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 2 \log \left( \frac{Dm}{k} \right) + 1,14 , \quad (39)$$

onde  $Dm$  é o diâmetro equivalente da área média e  $k$  é a rugosidade das paredes.

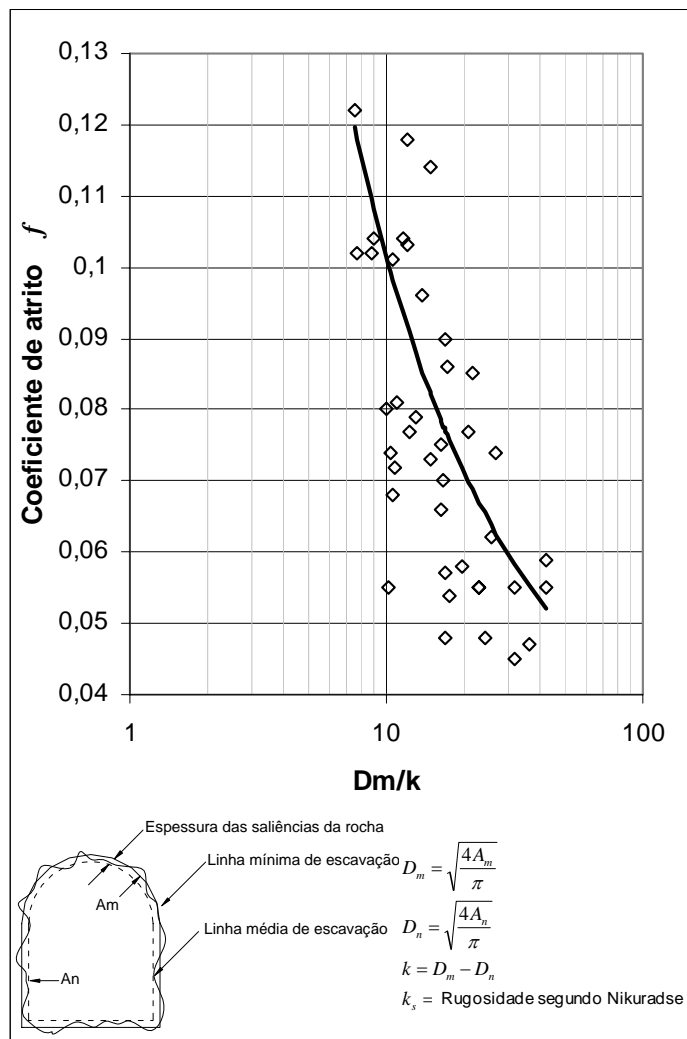
Pode-se utilizar também a fórmula de Manning que é relacionada com a equação de Darcy-Weisbach para condutos fechados escoando cheios, pela Equação (40) (PENNINGTON,1998).

$$n = \left( \frac{D}{4} \right)^{1/6} \sqrt{\frac{f}{8g}} \quad (40)$$

PENNINGTON (1998) recomenda alguns valores do coeficiente  $n$  de Manning para túneis escavados em rocha:

- túnel revestido com concreto projetado  $n = 0,0119 \pm 0,0009$
- túnel sem revestimento escavado em arenito  $n = 0,0154 \pm 0,0010$
- túnel sem revestimento escavado em granito  $n = 0,0157 \pm 0,0008$ .

sendo  $n$  representado em unidades do Sistema Internacional de Unidades.



**Figura 16** – Coeficientes de atrito observados pelo U.S. ARMY CORPS OF ENGINEERS e curva ajustada (Adaptado de U.S. ARMY CORPS OF ENGINEERS, 1973).

Outros métodos para determinação do coeficiente de atrito em túneis não revestidos são apresentados por GARNAYAK (2001), e descritos a seguir.

#### Método de Colebrook

Neste método a rugosidade normal  $t_m$  de um túnel não revestido é definida como a metade da diferença entre o diâmetro hidráulico médio e o diâmetro hidráulico da área com 1% de frequência cumulativa de ocorrência.  $t_m$  é igual à rugosidade absoluta  $k$  da superfície. O valor do coeficiente de perda de carga linear é calculado pela Equação (41).

$$f = 0,55 \frac{t_m \cdot R^{1,5}}{(R + t_m)^{2,5}} \quad (41)$$

### Método de Huval

A rugosidade é medida como a diferença entre o diâmetro equivalente médio ( $D_m$ ) e o diâmetro equivalente nominal ( $D_n$ ) da seção transversal do túnel. Esta rugosidade é igual à rugosidade hidráulica equivalente  $k'$ .

$$k' = D_m - D_n = \sqrt{\frac{4}{\pi}} (\sqrt{A_m} - \sqrt{A_n}) \quad (42)$$

### Método de Priha

O coeficiente de atrito pode ser determinado pela Equação 43.

$$f = 3,30 \cdot 10^{-3} \cdot \delta \frac{A_{1\%}^{0,5}}{(A_{1\%} + 9)^{0,5}} \quad (43)$$

### Método de Solvik

A relativa diferença de área entre seções transversais adjacentes define a rugosidade  $k_i$  surgida devido à variação das áreas da seção transversal.

$$k_i = \frac{|A_i - A_{i-1}|}{P_{ri}} \quad (44)$$

$$k_{avg} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m k_i \quad (45)$$

A rugosidade total do túnel é:  $k =$  rugosidade da parede ( $k_w$ ) + rugosidade da área ( $k_{avg}$ ).  $k_w$  é indicada como sendo igual a 0,15m.

$$f = 0,49 \left[ \frac{k}{4R_{avg}} \right]^{0,667} \quad (46)$$

### Valores propostos por Czarnota

Coeficiente de atrito para túnel escavado em rocha:  $f = 0,0730$ .

### Método de Reinius

REINIUS (1970) estabeleceu equações para a determinação do coeficiente de atrito em túneis escavados em rocha, dependentes do tipo de execução e considerando a rugosidade relativa ( $\delta$ ) estabelecida por RAHM (1958) e mostrada na Equação (36).

- Para escavação normal:

$$f = 0,02 + 0,0016 \cdot \delta \quad (47)$$

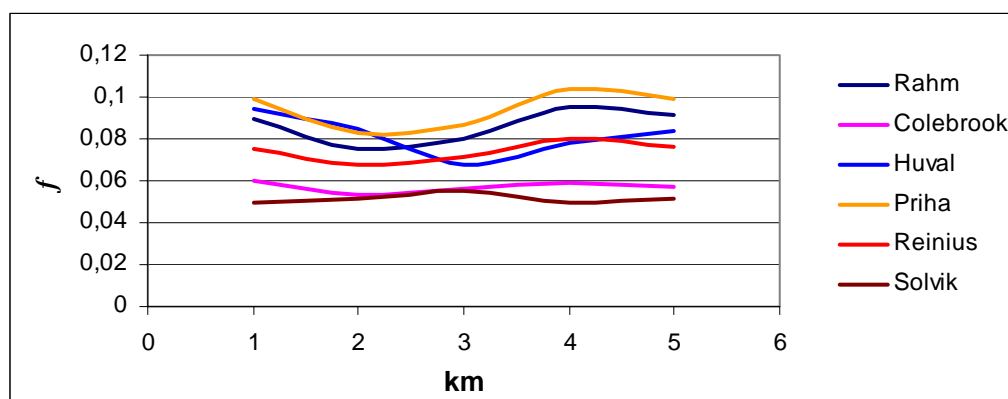
- Para escavação cuidadosa:

$$f = 0,03 + 0,00085 \cdot \delta \quad (48)$$

- Para escavação rápida:

$$f = 0,01 + 0,0027 \cdot \delta \quad (49)$$

GARNAYAK (2001), realizou um estudo de caso para o projeto da Usina Hidrelétrica de Chimay no Peru, e fez uma comparação entre os métodos acima citados, calculando um coeficiente de atrito para cada quilômetro de túnel, chegando aos resultados apresentados na Figura 17. Percebe-se uma variação considerável entre os valores encontrados para o coeficiente de atrito em cada método, sendo que no quilômetro 4 o  $f$  máximo encontrado foi igual ao dobro do mínimo.

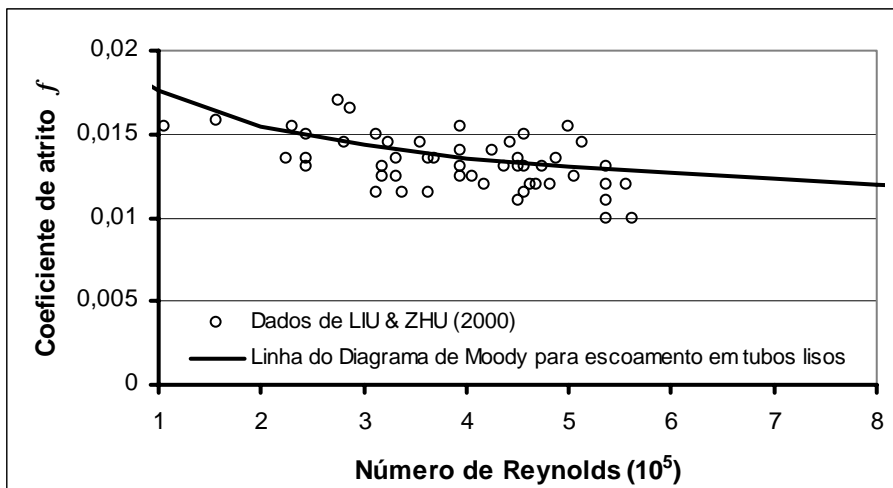


**Figura 17** - Valores de  $f$  calculados por diferentes métodos, para o túnel da usina Chimay (Adaptado de GARNAYAK, 2001).

GARNAYAK (2001), ainda apresenta outros métodos (Método de Wright, Método de Johansen e Método IBA de Ronn), no entanto não fornece informações suficientes para aplicação dos mesmos. Seus resultados para o túnel da usina Chimay, ficaram dentro da faixa de variação dos demais métodos apresentados. Outras referências foram consultadas, porém não foi encontrado o detalhamento destes métodos.

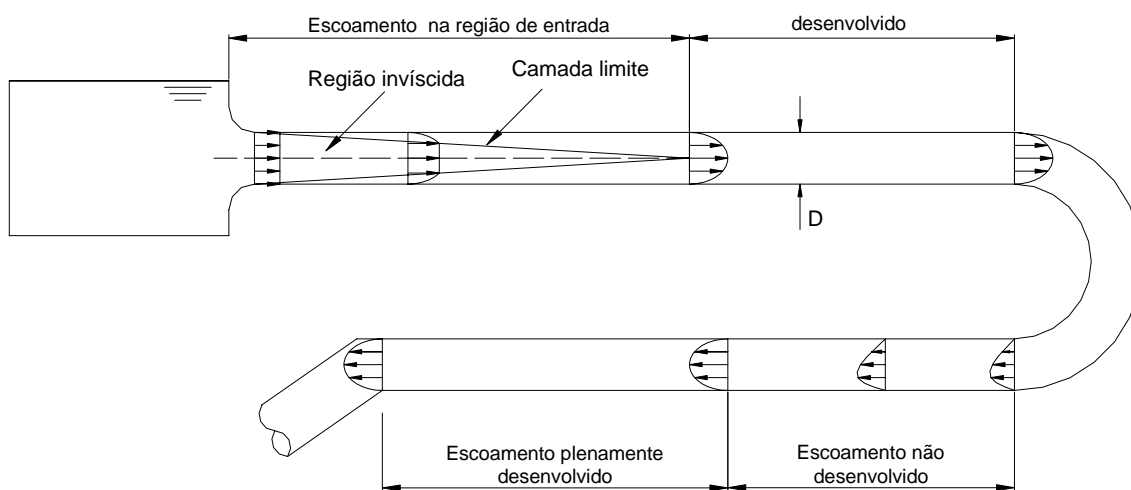
LIU & ZHU (2000), estudaram em um modelo o coeficiente de perda de carga localizada na saída de túneis. Para isto, fizeram uma medição da perda de carga linear e calcularam o coeficiente de atrito, chegando aos valores apresentados na Figura 18.

Segundo LIU & ZHU (2000), o túnel deste estudo tinha paredes lisas e área de aproximadamente  $350 \text{ cm}^2$ . Os dados referentes ao coeficiente de atrito decresceram com o aumento do número de Reynolds ( $Re$ ), e apresentaram uma certa dispersão, mas se confrontaram bem com a previsão do Diagrama de Moody para condutos lisos. Os autores salientaram que o escoamento em seus experimentos foi completamente turbulento ( $Re > 10^5$ ), mas provavelmente não completamente desenvolvido, visto que o comprimento do túnel era de aproximadamente 25 vezes a altura do túnel.



**Figura 18** – Valores de coeficiente de atrito para túnel com paredes lisas (Adaptado de LIU & ZHU, 2000)

Para uma situação como a da Figura 19, onde uma tubulação é alimentada por um reservatório, o perfil de velocidade é, normalmente, uniforme na entrada. Os efeitos viscosos provocam a aderência do fluido às paredes do conduto, produzindo uma camada limite e alterando o perfil de velocidade com a distância longitudinal. Um determinado comprimento de tubulação é necessário para o desenvolvimento do escoamento. Este comprimento se correlaciona bem com o número de Reynolds através das Equações 50 e 51 para os escoamentos laminar e turbulento, respectivamente, onde  $D$  é o diâmetro do conduto (MUNSON *et al.*, 1997)..

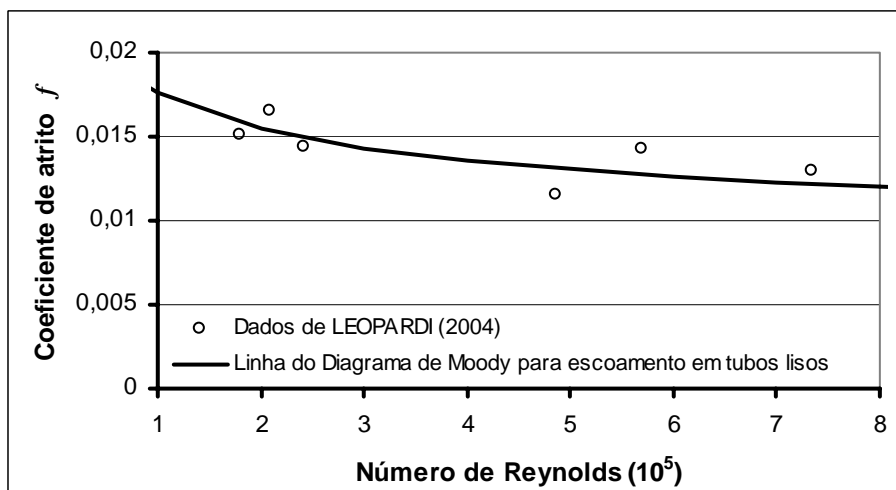


**Figura 19** – Esquema de desenvolvimento de escoamento (MUNSON *et al.*, 1997).

$$\frac{l}{D} = 0,06 Re \quad \text{escoamento laminar} \quad (50)$$

$$\frac{l}{D} = 4,4(\text{Re})^{1/6} \quad \text{escoamento turbulento} \quad (51)$$

LEOPARDI (2004), realizou uma pesquisa sobre a reprodução da rugosidade em modelos hidráulicos. Quatro foram as formas de seção transversal estudadas: retangular, trapezoidal, circular e ferradura. Para o caso da seção ferradura, os resultados obtidos para o coeficiente de atrito encontra-se apresentados na Figura 20.



**Figura 20** - Valores de coeficiente de atrito para túnel (Adaptado de LEOPARDI, 2004).

Percebe-se que os resultados de LEOPARDI (2004) foram compatíveis com os resultados de LIU & ZHU (2000), ajustando-se à equação do Diagrama de Moody para escoamento turbulento em tubos lisos.

## 4 METODOLOGIA

No intuito de avaliar a influência dos parâmetros físicos no dimensionamento de chaminés de equilíbrio simples a jusante das turbinas em usinas hidrelétricas, realizou-se um estudo aplicado à Usina Hidrelétrica de Serra da Mesa, através de simulações numéricas. Quatro modelos numéricos, denominados CHAMINE, CHAMINE-IPH, ESTRANHE e ESTRANHE-IPH, encontravam-se disponíveis para a realização deste trabalho.

Para verificação dos modelos numéricos, foram realizadas simulações de situações reais ocorridas e registradas na Usina de Serra da Mesa, comparando-se os resultados numéricos com os experimentais.

Com os dados obtidos na usina de Serra da Mesa, foi realizado um estudo para a determinação do coeficiente de atrito em seu túnel de restituição, parâmetro muito importante para que os modelos numéricos sejam capazes de reproduzir o nível d'água da chaminé de equilíbrio em regime permanente e transitório. Os resultados iniciais deste estudo motivaram a investigação do comportamento do coeficiente atrito em outros túneis. Foram utilizados, então, os túneis existentes nas Usinas Hidrelétricas de Salto Forqueta e Bugres, além da estrutura laboratorial existente no LAHE, onde se realizaram ensaios de regime transitório.

A seguir apresenta-se a metodologia utilizada no desenvolvimento deste trabalho.

### 4.1 Aquisição de dados

Os dados experimentais utilizados neste trabalho foram coletados em quatro estruturas segundo os objetivos apresentados no Quadro 2.

**Quadro 2 – Aquisição de dados nas estruturas.**

| <b>Estrutura</b>                            | <b>Objetivos</b>   | <b>Dados registrados</b>   |
|---|--|--|
| <b>Usina Hidrelétrica de Serra da Mesa</b>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• monitorar o comportamento no circuito hidráulico da usina durante regimes transientes;</li> <li>• estudar a perda de carga linear no túnel escavado em rocha existente na usina.</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Nível na tomada d'água;</li> <li>• Nível na chaminé de equilíbrio;</li> <li>• Nível no canal de fuga;</li> <li>• Abertura das turbinas;</li> <li>• Potências geradas.</li> </ul>  |
| <b>Usina Hidrelétrica de Salto Forqueta</b> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• estudar a perda de carga linear no túnel escavado em rocha existente na usina.</li> </ul>   | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Nível na entrada do túnel;</li> <li>• Nível na chaminé de equilíbrio;</li> <li>• Nível na restituição;</li> <li>• Abertura das turbinas;</li> <li>• Potências geradas.</li> </ul> |
| <b>Usina Hidrelétrica de Bugres</b>         | <ul style="list-style-type: none"> <li>• estudar a perda de carga linear no túnel existente na usina.</li> </ul>   | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Nível no reservatório;</li> <li>• Pressão na saída do túnel.</li> <li>• Abertura das turbinas;</li> <li>• Potências geradas.</li> </ul>   |

| Estrutura                             | Objetivos  | Dados registrados   |
|---------------------------------------|--|---|
| <b>Estrutura laboratorial do LAHE</b> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• monitorar o comportamento no circuito hidráulico da estrutura durante simulações de regimes transientes;</li> <li>• estudar a perda de carga linear no túnel da estrutura.</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Nível na tomada d'água;</li> <li>• Nível na chaminé de equilíbrio;</li> <li>• Nível no canal de fuga;</li> <li>• Vazão no sistema;</li> <li>• Pressão nos condutos forçados;</li> <li>• Pressão no túnel.</li> </ul> |

A seguir apresenta-se a descrição das estruturas citadas e da forma de aquisição de dados:

#### 4.1.1 Usina Hidrelétrica de Serra da Mesa

A Usina Hidrelétrica de Serra da Mesa tem sua barragem situada no curso principal do Rio Tocantins, no município de Minaçu estado de Goiás, a 1790 km de sua foz e a 640 km de Brasília – DF. O nome da usina provém do local escolhido para sua construção, uma garganta do Rio Tocantins encaixada na extremidade da Serra da Mesa.

Esta usina possui grande importância no panorama energético brasileiro, por ser responsável pela ligação entre o sistema interligado Sul/Sudeste/Centro-Oeste e o Norte/Nordeste, sendo o elo da Interligação Norte-Sul.

As obras da usina tiveram início no final do ano de 1986 e, em 1996, o reservatório começou a ganhar volume. Serra da Mesa, visualizada na Figura 21, possui o maior reservatório em volume d'água do Brasil, com 54,4 bilhões de m<sup>3</sup> e uma área de 1.784 km<sup>2</sup>. Suas três unidades geradoras proporcionam-lhe uma potência instalada de 1.275 MW.

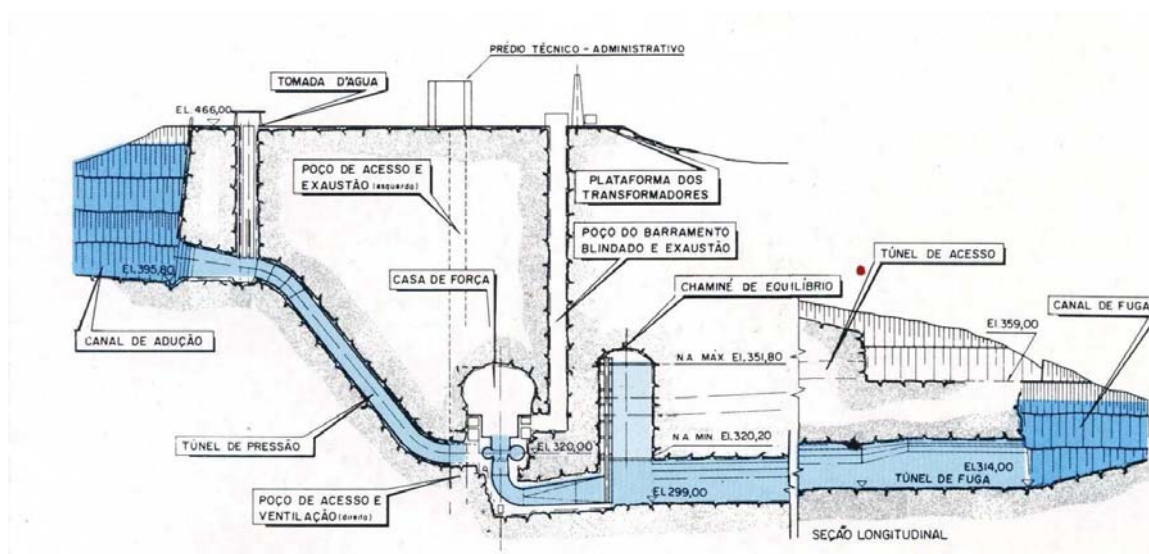


**Figura 21** – Vista geral da Usina de Serra da Mesa.

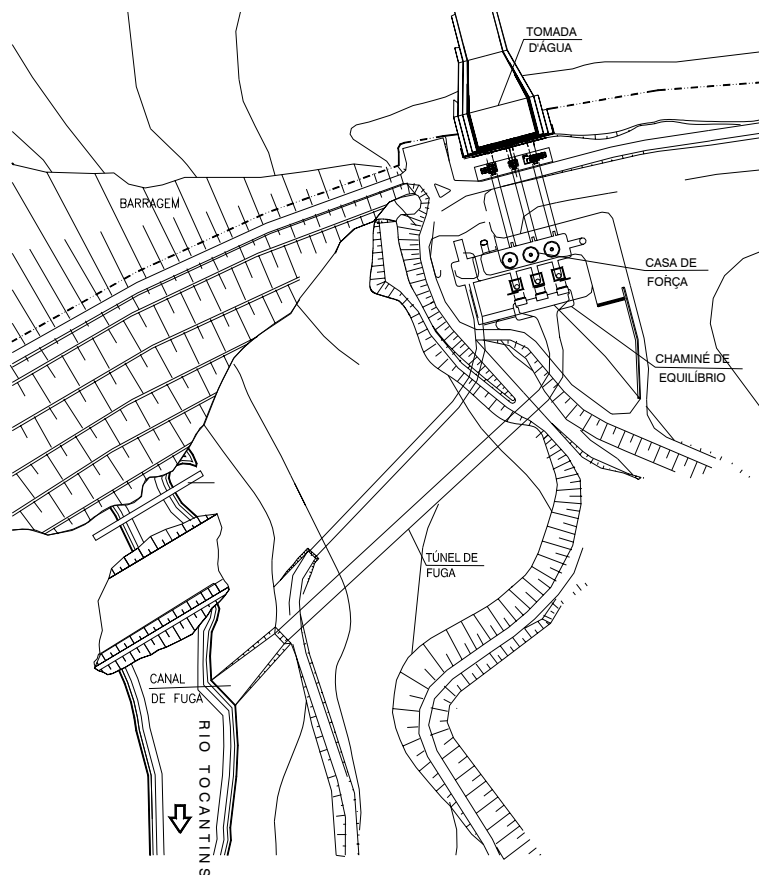
As rochas que compõem a serra, onde foi construída a central, são graníticas, possuindo excelentes características técnicas para a construção civil. Por este motivo, foi



possível que quase todo o circuito hidráulico de geração fosse construído subterrâneo, escavado na própria rocha, como o esquema apresentado na Figura 22.



**Figura 22** – Desenho esquemático da usina de Serra da Mesa.



**Figura 23** - Arranjo geral da usina de Serra da Mesa.

O circuito hidráulico da Usina hidrelétrica de Serra da Mesa, conforme arranjo geral apresentado na Figura 23, é composto por:

**Canal adutor** - Trata-se de uma escavação feita na margem do reservatório com a finalidade de permitir a entrada da água nas tomadas d'água. Suas características são: 200 m de comprimento, 69 m de largura e 64 m de profundidade em relação à cota máxima normal do reservatório (460 m).

**Tomada d'água** - Classifica-se dentro do grupo das tomadas de grande profundidade. A estrutura compõe-se de três tomadas idênticas, uma para cada conduto. Cada tomada está equipada com uma grade em sua entrada, "stop-logs" e uma comporta tipo vagão de 7,65 m de largura e 9,13 m de altura.

**Conduitos forçados** - Os três conduitos forçados contam com idênticas dimensões. Suas seções foram escavadas na rocha, revestidas por concreto e blindadas na parte imediatamente a montante das turbinas. Os conduitos forçados têm um comprimento total de aproximadamente 160 m com um diâmetro de 9 m e declividade de 55°. Os trechos, inicial e final, contam com transições nas junções com a tomada d'água e com as turbinas, apresentando uma declividade menor e um diâmetro variável.

**Turbinas** - As turbinas instaladas são do tipo Francis de eixo vertical, carga hidráulica de 117,2 m, rotação de 120 rpm e potência nominal de 425 MW.

**Tube de sucção** – Tubulação, independente para cada turbina, que comunica a saída da turbina com a chaminé de equilíbrio. Possui seção variável, escavada em rocha e blindada com aço, seu comprimento total é de aproximadamente 35 m.

**Chaminé de Equilíbrio** - A chaminé, também escavada na rocha, tem uma área transversal de 1360 m<sup>2</sup> e uma altura de 63 m. Seu topo não atinge a superfície do solo, sendo a entrada de ar feita através de um túnel de acesso posicionado na cota 352 m, o qual possui 390 m de comprimento. Este túnel tem particular importância, pois, pela movimentação de ar, permite a atuação da pressão atmosférica na superfície livre da água na chaminé.

**Túnel de Fuga** - O túnel de fuga, de 525 m de comprimento, tem uma seção típica em ferradura escavada na rocha e com revestimento em concreto somente na base. Tem uma largura da base de aproximadamente 16m e uma altura máxima no centro da seção em torno de 19 m. Possui uma área média de 293 m<sup>2</sup>, sendo a área de projeto 288,37 m<sup>2</sup>. No seu início, junto à chaminé de equilíbrio, possui uma transição de 31m de comprimento até atingir a seção típica. Uma imagem interna do túnel de acesso da UHE de Serra da Mesa, que é similar ao túnel de fuga, pode ser visualizada na Figura 24.

Canal de fuga - É um canal de, aproximadamente, 90 m de comprimento que comunica o túnel de fuga com a calha natural do rio Tocantins. O mesmo foi escavado em rocha e tem uma seção trapezoidal.



**Figura 24** – Túnel de acesso da UHE de Serra da Mesa, similar ao túnel adutor.

Foram coletados na Usina Hidrelétrica de Serra da Mesa, os níveis d'água no reservatório, na chaminé de equilíbrio e no canal de fuga, além de potências e aberturas provenientes de cada uma das 3 turbinas, através de um sistema projetado pela equipe do projeto "Transientes hidráulicos em circuitos de usinas hidrelétricas", profissionais do Instituto de Pesquisas Hidráulicas e de Furnas Centrais Elétricas.

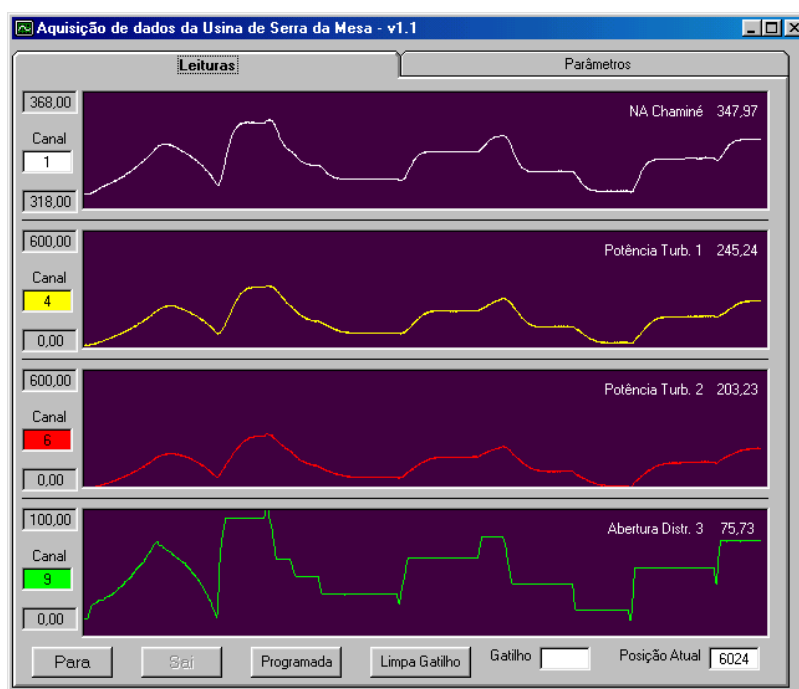
Para a medição dos níveis d'água na chaminé de equilíbrio e na tomada d'água utilizaram-se sensores de nível piezoresistivos, e no canal de fuga um sensor ultra-sônico de nível. As aberturas dos distribuidores e potências geradas foram obtidas dos sinais provenientes do sistema de controle da usina.

Para a aquisição destes dados, instalou-se um sistema com a capacidade de fazer a aquisição de 16 canais com sinais analógico/digital simultaneamente. Utilizou-se uma placa de aquisição de dados com conversor AD de 12 bits (resolução de 1/4096 da faixa selecionada), instalada em um microcomputador.

Todos os sinais do sistema de aquisição foram isolados galvanicamente através de isoladores de corrente instalados na origem do sinal. No caso dos sinais de potência e abertura do distribuidor de cada turbina, utilizaram-se isoladores junto ao quadro de comando onde são gerados estes sinais pelo sistema da usina.

O sistema instalado permite a coleta de dados fora do sistema de supervisão e controle da usina através de um software, desenvolvido pelo Eng<sup>o</sup> Ricardo Eifler do IPH, que faz a aquisição e o armazenamento dos dados. A Figura 25 apresenta uma das telas do software de aquisição de dados.

Foram adquiridos 4 dados por minuto para períodos de operação normal da usina e com uma frequência de 10 Hz para o registro de transientes programados ou não. O registro dos transientes ocorridos sem programação pode ser feito toda vez que alguma das variáveis lidas sofrer alteração que fuja dos padrões normais de operação, disparando assim um “gatilho” que aumenta a frequência de aquisição pelo programa.



**Figura 25** – Tela do software de aquisição de dados.

#### 4.1.2 Estrutura do LAHE

O LAHE – Laboratório de Hidráulica Experimental e Recursos Hídricos, localizado em Jacarepaguá - Rio de Janeiro, é um laboratório pertencente a FURNAS Centrais Elétricas S.A., onde se realiza a reprodução, em escala, das condições naturais dos locais das usinas hidrelétricas e a simulação do funcionamento das estruturas hidráulicas.

Neste laboratório existe uma estrutura que possui semelhança geométrica com a Usina Hidrelétrica de Serra da Mesa, na escala de 1:50, construída na época de projeto da usina, como mostra a Figura 26.

A alimentação do reservatório da estrutura faz-se através de um canal provido de um vertedouro, através do qual se determina a vazão. O reservatório

trabalha com nível constante possuindo um vededouro com crista na posição correspondente à cota 460,00 m da usina.

A estrutura, construída praticamente toda em acrílico, possui válvulas representando as turbinas da usina. A estas válvulas foi acoplado um sistema que contava com servo-motores e proporcionava a execução do fechamento das válvulas em até 0,2 s.



**Figura 26** - Estrutura do LAHE.

Existem plaquetas de 6 mm de largura, 298 mm de comprimento e 3 mm de espessura coladas juntos às paredes internas do túnel, como pode ser visualizado na Figura 27. Estas plaquetas buscavam uma possível reprodução da superfície interna do túnel da usina de Serra da Mesa, o qual é escavado em rocha e sem revestimento.



**Figura 27** – Vista interna do túnel da estrutura do LAHE.

Esta estrutura não foi considerada como um modelo reduzido da Usina de Serra da Mesa, pois a construção de um modelo para o estudo do comportamento de protótipo pressupõe a obediência a determinadas condições que assegurem a semelhança. Para que o modelo seja válido deve reproduzir em escala as forças, momentos e cargas dinâmicas. Isso requer que certas relações sejam satisfeitas, como semelhança geométrica, cinemática e dinâmica. Porém, nos escoamentos reais costuma existir a predominância de apenas algumas forças sobre as demais, cujos efeitos são considerados desprezíveis ou compensados. Assim, define-se a relação de escala a partir daqueles grupos adimensionais mais importantes, desprezando-se os demais (BAPTISTA *et al.* 2003).

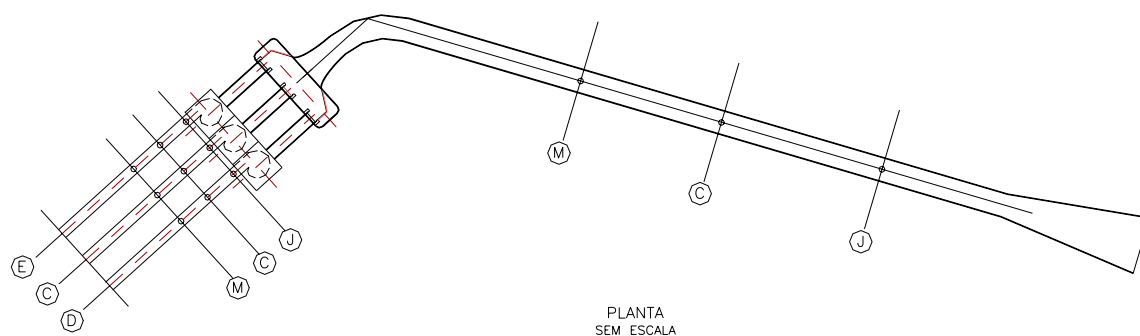
Nos estudos de transientes hidráulicos em usinas hidrelétricas, a aplicação de modelos reduzidos é algo de difícil utilização para a representação do comportamento do fenômeno em protótipos. Ocorre que, neste caso, várias características são importantes, como compressibilidade do fluido, celeridade da onda de pressão, carga hidráulica atuante, tempo de fechamento do distribuidor, entre outros. Assim, torna-se difícil a obtenção de semelhança dinâmica, pois vários grupos adimensionais são importantes.

A estrutura do LAHE possui semelhança geométrica e opera com semelhança de Froude. Assim, os fenômenos transitórios nela simulados não são representativos dos fenômenos ocorridos em Serra da Mesa, pois as demais relações adimensionais necessárias não são atendidas. Isto leva à não utilização da estrutura do LAHE como um modelo reduzido, mas sim à sua utilização neste trabalho de pesquisa como se fosse um protótipo, porém de pequenas dimensões.

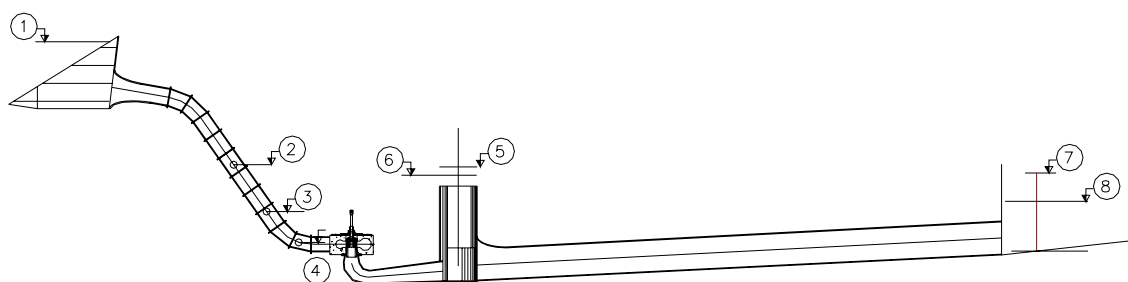
Sendo esta uma estrutura laboratorial, as mais diversas situações de funcionamento podem ser simuladas, o que não ocorre em uma usina real, e o fenômeno transiente pode ser estudado para as características particulares desta estrutura.

Os dados coletados nesta estrutura foram utilizados para a análise de situações sob escoamento transitório, além do estudo de perda de carga linear em túneis.

A instalação dos instrumentos de aquisição de dados apresentava-se na disposição das Figura 28 e 29.



**Figura 28** - Posicionamento dos instrumentos de aquisição de dados – Planta.



**Figura 29** - Posicionamento dos instrumentos de aquisição de dados - Corte.

Utilizaram-se os seguintes instrumentos nas medições:

**Sondas (transdutores ultra-sônicos de nível)** – Para a medição de nível d'água no reservatório, na chaminé de equilíbrio e no canal de fuga, posições 1, 5 e 7, da Figura 32, respectivamente.

**Transdutores de pressão** – Para a medição da pressão nos condutos forçados, posições 2, 3 e 4 da Figura 32. Estes equipamentos também se encontravam instalados no túnel de fuga nas posições M, C e J da Figura 31.

**Pontas linimétricas** – Para a leitura do nível de água no reservatório e no canal de fuga, junto aos locais onde estão implantadas as sondas de ultra-som.

**Piezômetros** – Para leitura da carga piezométrica ao longo dos condutos forçados e túnel de fuga, além da chaminé de equilíbrio.

Para a medição da vazão utilizou-se um vertedouro, instalado no canal que alimenta o reservatório, cujo coeficiente de descarga é conhecido.

Dentro das pretensões do projeto de pesquisa e desenvolvimento “Transientes Hidráulicos em Circuitos de Usina Hidrelétricas”, os ensaios se dividiram, segundo o seu objetivo, em:

- ensaios para estudo do regime transiente nos condutos forçados;
- ensaios para estudo do regime transiente a jusante das válvulas.

A diferença entre estes ensaios consistia na frequência e tempo de aquisição de dados. Os ensaios considerados neste trabalho foram os referentes ao de regime transiente a jusante das válvulas, os quais possuíam frequência de aquisição de 10 Hz e tempo de registro de 300 s, em média.

Quanto a estes ensaios, realizaram-se manobras de fechamento e abertura das válvulas com diferentes aberturas iniciais e finais, possibilitando a análise da influência de um parâmetro no estudo das oscilações de nível em chaminés de equilíbrio durante um regime transitório, que é o diferencial de vazão.

Em cada ensaio, realizava-se a estabilização do sistema antes e após o transitório e o registro dos dados destas condições, sendo pressões através dos piezômetros e níveis através das pontas linimétricas. Para o estudo da perda de carga no túnel foram utilizados estes dados referentes a todos os ensaios, independentemente de seus objetivos.

Os dados dos piezômetros e transdutores localizados ao longo do túnel de fuga não puderam ser utilizados devido ao fato da estrutura ser muito curta e as perdas de carga entre os instrumentos ficarem dentro da faixa de erro dos mesmos.

#### **4.1.3 Usina Hidrelétrica de Salto Forqueta**

A Usina Hidrelétrica de Salto Forqueta, localizada na divisa entre os municípios de Putinga e São José do Herval no estado do Rio Grande do Sul, com acesso pela BR386 km 286, visualizada na Figura 30, é uma pequena central hidrelétrica que entrou em operação no mês de novembro de 2002 com uma potência instalada de 6.124 kW.

Idealização da Cooperativa Regional de Eletrificação Teutônia – Certel, a hidrelétrica de Salto Forqueta foi construída no rio Forqueta, o qual possui uma vazão média de longo termo de 18,40 m<sup>3</sup>/s. Ela é uma típica usina de desvio, podendo ser representada esquematicamente pela Figura 5. É composta por uma barragem de regularização diária; uma tomada d'água com vazão de engolimento de



22,60 m<sup>3</sup>/s; um túnel adutor, com 127 m de comprimento escavado em rocha e revestido com concreto projetado que pode ser visualizado na Figura 31; uma chaminé de equilíbrio de seções circular simples com diâmetro de 6 m e altura de 14 m; conduto forçado em aço sendo 76 m com diâmetro de 2,85 m e 2 trechos de 30m com 1,95m de diâmetro correspondentes ao desdobramento do conduto para abastecer as duas turbinas; na casa de força encontram-se duas turbinas do tipo Francis dupla de eixo horizontal, com potência unitária de 3.190 kW ligadas aos seus respectivos geradores do tipo Brushless com rotação de 514 rpm, frequência de 60 Hz e tensão de 6.600 V.



**Figura 30** – Usina Hidrelétrica de Salto Forqueta.



**Figura 31** – Túnel escavado em rocha da Usina Hidrelétrica Salto Forqueta.

As medições na Usina Hidrelétrica de Salto Forqueta foram feitas para contribuir com os estudos sobre perda de carga linear em túneis escavados em rocha.

Os dados coletados referenciam-se ao escoamento em regime permanente para diversas vazões, sendo as coletas sincronizadas. Não se utilizou esta usina na análise do regime transiente devido à dificuldade de aquisição dos dados necessários.

Os dados adquiridos na UHE Salto Forqueta foram:

- Nível d'água na tomada d'água, após o gradeamento;
- Nível d'água na chaminé de equilíbrio;
- Nível d'água na restituição;
- Potência de operação e abertura das palhetas do distribuidor.

Os dados de nível de água na tomada d'água e chaminé de equilíbrio foram medidos de forma manual, utilizando-se sensores de contato e trena, sendo georeferenciados na seqüência. Os dados de nível de água na restituição, potências geradas e abertura dos distribuidores foram obtidos do sistema de medição e controle existente na usina.

Iniciaram-se as medições com as turbinas completamente fechadas, abrindo-as gradualmente e realizando as medições a partir da estabilização do nível na chaminé.

#### 4.1.4 UHE Bugres

A Usina Hidrelétrica Bugres, propriedade da CEEE – Companhia Estadual de Energia Elétrica do Estado do Rio Grande do Sul, tem sua casa de força localizada no município de Canela-RS e entrou em operação em 1952.

Sua barragem encontra-se construída no leito do Rio Santa Cruz. A água captada é inicialmente conduzida por um túnel de seção circular, escavado em rocha e revestido com placas de concreto que possui 2080 m de comprimento e 2,2 m de diâmetro, passando então por uma adutora de baixa pressão de 2 m de diâmetro e 1175 m de comprimento. Esta adutora desemboca em uma chaminé de equilíbrio de 10 m de diâmetro. Da chaminé parte o conduto de alta pressão com diâmetro variando entre 2 m e 1,7 m e com comprimento de 500 m que alimenta as turbinas na casa de força. Na casa de força estão instaladas duas unidades geradoras, uma de 6 MW e outra de 11 MW. A restituição da água é feita ao Rio Santa Maria.

Na Figura 32 apresenta-se uma foto da casa de força e conduto forçado da Usina Hidrelétrica Bugres.



**Figura 32** – Foto da Usina Hidrelétrica Bugres.

Os dados referentes a esta usina foram cedidos pela Companhia Estadual de Energia Elétrica do Rio Grande do Sul – CEEE.

O processo de medição adotado consistiu no acompanhamento do nível d'água na barragem e medição da pressão na saída do túnel.

Para medição da pressão na saída do túnel, foi instalado um manômetro a 2,4 m da saída deste, no eixo tubulação o qual encontrava-se georeferenciado. Para as maiores vazões verificou-se uma perturbação de fluxo provocada pela bifurcação da válvula “by-pass” e do afogamento da descarga da mesma, existentes na tubulação na seqüência do manômetro, adotaram-se os valores de pressão média.

#### **4.2 Análise dos Dados Experimentais de Regimes Transientes**

Foram analisadas as características dos dados experimentais das oscilações de nível na chaminé obtidos na Estrutura do LAHE e na Usina de Serra da Mesa. Determinaram-se períodos e amplitudes, comparando-os com os valores teóricos, além do amortecimento das oscilações.

#### **4.3 Estudo da Perda de Carga Linear em Túneis**

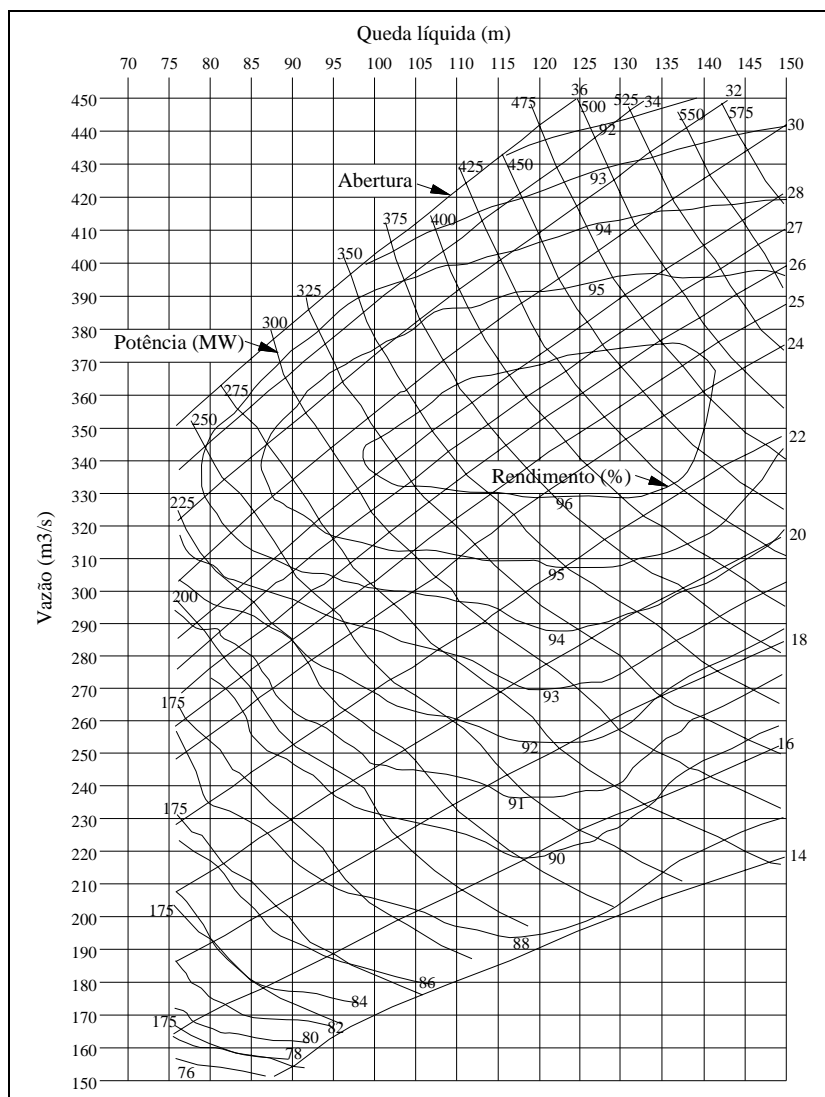
Para o cálculo da perda de carga linear, necessitava-se conhecer a vazão do escoamento em cada situação medida nas quatro estruturas.

A determinação da vazão no túnel da Usina de Serra da Mesa foi feita somando-se as vazões das três turbinas, pois este túnel encontra-se a jusante das máquinas, fazendo a restituição da água turbinada ao rio. A vazão de cada máquina foi obtida através do diagrama de operação das turbinas, Figura 33, visto que se dispunha dos dados de entrada do diagrama (potência e abertura dos distribuidores).

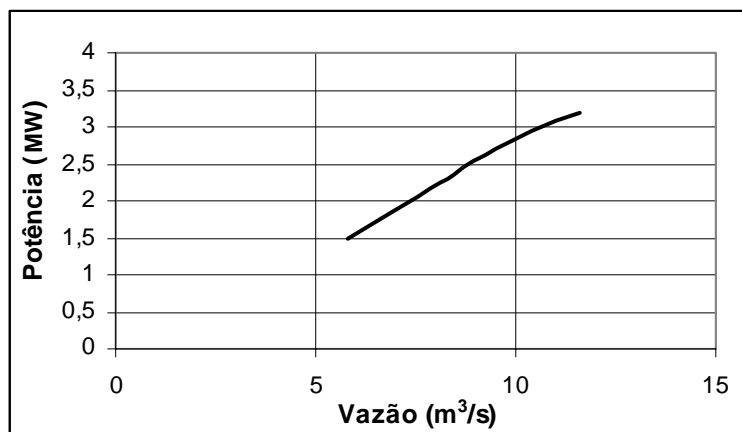
No caso da Usina de Salto Forqueta, dispunha-se de uma curva que correlacionava vazão e potência gerada para uma determinada altura de queda líquida (31,75 mca), Figura 34. Desta curva obteve-se a vazão da turbina, informando-se a potência gerada. Como a queda líquida das situações medidas (aproximadamente 31,60 mca) não se distanciou muito do valor para o qual a curva de rendimentos disponível é válida, considerou-se esta curva como sendo válida neste estudo. Novamente, obteve-se a vazão do túnel através da soma das vazões turbinadas, pois, neste caso, toda a vazão aduzida pelo túnel alimentava as turbinas.

A vazão das situações medidas na Usina Hidrelétrica Bugres foi disponibilizada pela CEEE, da mesma forma que os demais dados.

Na estrutura do LAHE realizou-se a medição da vazão através de um vertedouro existente no canal de alimentação desta estrutura. Como a água proveniente deste canal alimenta o reservatório de montante desta estrutura, o qual trabalha com nível constante em regime permanente, toda a vazão do canal escoa pelo túnel.

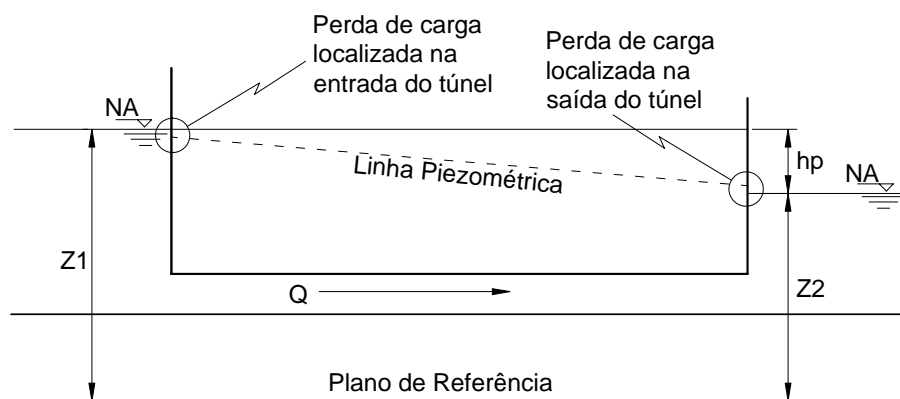


**Figura 33** – Curva de operação das turbinas da UHE de Serra da Mesa (Adaptada da curva fornecida pó FURNAS).



**Figura 34** – Curva de operação das turbinas da Usina de Salto Forqueta para queda líquida igual a 31,75 mca (Fornecida pela CERTEL).

Através dos níveis d'água registrados foi possível o cálculo da perda de carga total ( $h_p$ ) entre os pontos de medição, ver Figura 35 como exemplo. Com a vazão, calculou-se as perdas de carga localizadas considerando as singularidades existentes entre estes pontos nas estruturas citadas e os coeficientes indicados na bibliografia. Da perda total subtraiu-se a perda localizada e obteve-se a perda de carga linear ( $h_f$ ) no túnel. Com a aplicação da fórmula universal de perda de carga calculou-se o coeficiente de atrito  $f$ .



**Figura 35** – Exemplo - Perda de carga entre dois reservatórios.

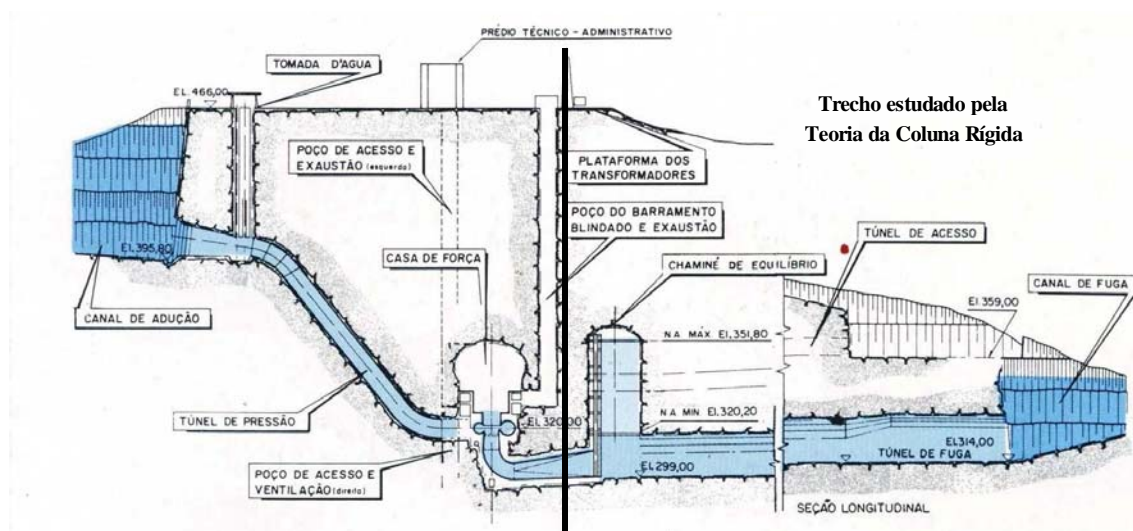
Para análise dos resultados, correlacionaram-se os valores de perda de carga linear com suas respectivas vazões e os valores encontrados para  $f$  com seus respectivos números de Reynolds  $Re$ . Foi feita, dentro das possibilidades para cada estrutura, a comparação entre os resultados desta pesquisa e os resultados das aplicações dos métodos indicados no item revisão bibliográfica para determinação do coeficiente de atrito em túneis.

#### 4.4 Simulações Numéricas de Regimes Transientes

Nas simulações numéricas foram utilizados os modelos numéricos descritos a seguir:

##### 4.4.1 Modelo CHAMINE

O Modelo CHAMINE foi desenvolvido pela IESA – Internacional de Engenharia S.A. em linguagem FORTRAN, para FURNAS em 1989. Este simula as oscilações de nível de água em uma chaminé de equilíbrio a jusante da casa de força para chaminés do tipo simples e com estrangulamento na base. Ou seja, simula o escoamento em regime transitório entre a chaminé e o canal de fuga (Figura 36). Este modelo emprega a teoria da coluna rígida (oscilação de massa) cujas equações são resolvidas pelo método das diferenças finitas.



**Figura 36** – Circuito estudado pelo modelo CHAMINE.

No arquivo de entrada de dados, em padrão ASCII, informam-se o nível inicial no canal de fuga e o nível estabilizado com seu respectivo tempo, a curva de vazão turbinada versus tempo, os dados da chaminé de equilíbrio e túnel de fuga e os coeficientes de perda de carga.

Os arquivos de saída, também em padrão ASCII, fornecem a oscilação de nível na chaminé, os dados de velocidades, perdas de carga entre outros, em função do tempo.

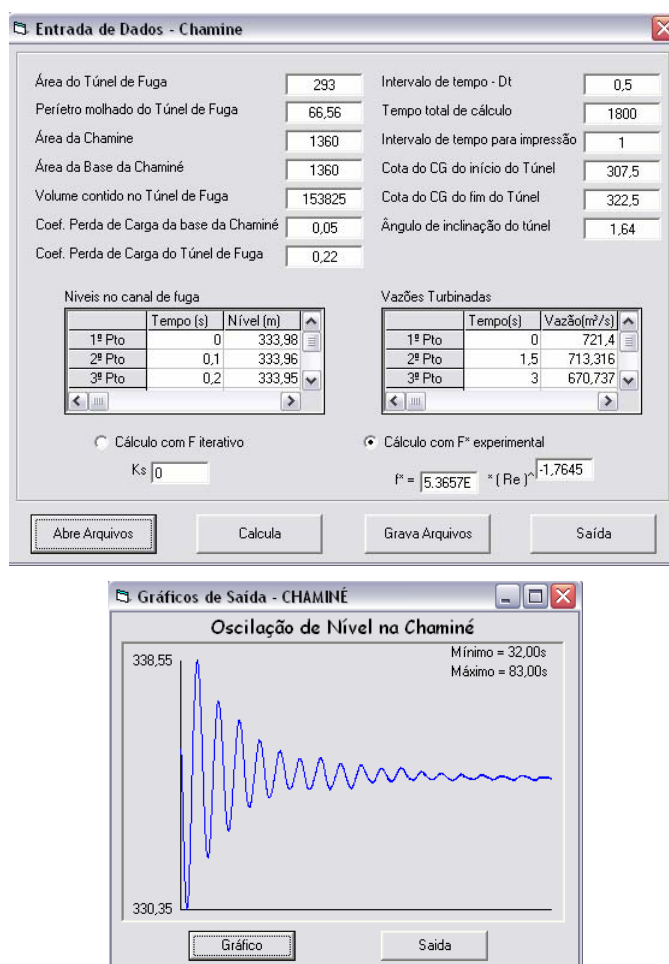
Este programa considera o coeficiente de perda de carga no túnel como sendo constante e o cálculo da perda de carga no túnel utiliza a fórmula de perda de carga localizada.

Objetivando melhor representar o fenômeno de oscilação de nível d'água na chaminé de equilíbrio durante um regime transiente, algumas alterações foram implementadas no programa original (CHAMINE) pelo Engº Ricardo Eifler - IPH. A versão com alterações passou a ser chamada de CHAMINE-IPH enquanto a versão original continuou sendo denominada unicamente como CHAMINE.

As alterações realizadas dizem respeito a:

- possibilidade de entrar com até 20.000 pontos para a curva de vazão turbinada;
- Divisão das perdas de carga linear e localizada no túnel de fuga;
- Possibilidade de calcular o coeficiente "f" de atrito pela fórmula de Colebrook-White ou por uma equação que também permite a utilização de um valor fixo;
- Possibilidade de variar o nível do canal de fuga durante o estudo, com até 20.000 pontos.

Outra implementação feita foi a utilização de uma linguagem visual, na plataforma Windows®, que permite uma operação mais amigável do sistema e facilita a introdução e a análise dos resultados que são apresentados em uma forma gráfica, como mostra a Figura 37.



**Figura 37** – Telas de utilização do modelo CHAMINE.

As limitações do CHAMINE-IPH são:

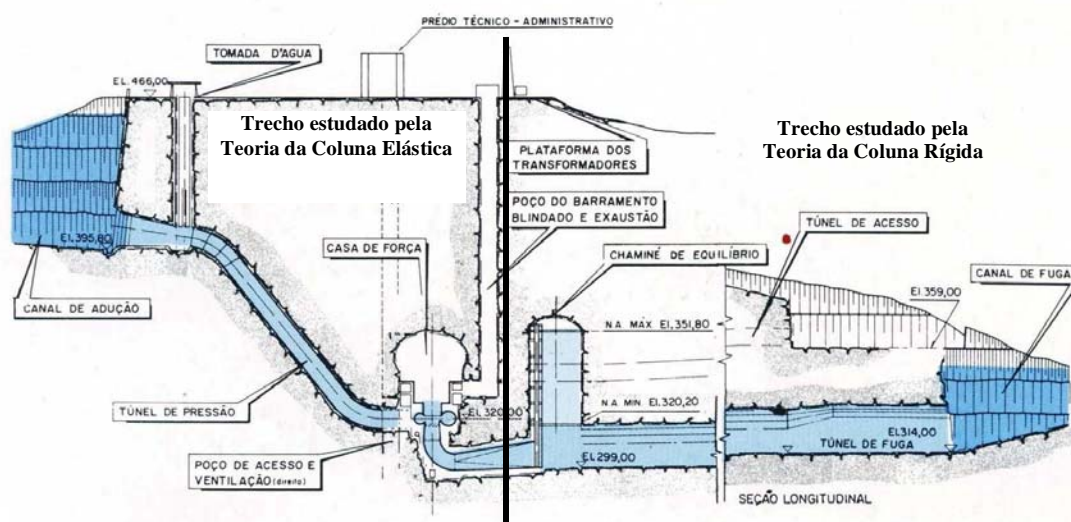
- A estrutura a ser simulada deve ter o escoamento na seguinte ordem: turbinas ou válvulas, chaminé de equilíbrio, túnel de fuga e canal a jusante;
- A taquicarga no canal de fuga é desprezada;



- Somente permite a simulação de estruturas que possuam chaminé simples ou com estrangulamento da base;
- Não permite variar os coeficientes de perda de carga local de acordo com o sentido do fluxo;
- Não considera o aumento de área na base da chaminé para a transição ao túnel de fuga.

#### 4.4.2 Modelo ESTRANHE

O Modelo ESTRANHE pertencente a FURNAS, foi desenvolvido pelo Eng<sup>o</sup> Ricardo de Mattos Vieira - IESA – Internacional de Engenharia S.A. em linguagem FORTRAN em 1992 (VIEIRA, 1991). O sistema foi originalmente concebido para simular usinas hidrelétricas reversíveis sendo adaptado para o caso de um circuito hidráulico como o da UHE Serra da Mesa. Permite o cálculo do transiente no trecho do conduto forçado em pontos predefinidos e calcula a oscilação de nível na chaminé. Para a parte de montante da chaminé utiliza as equações da teoria da coluna elástica resolvidas pelo método das características e para o cálculo da variação de nível na chaminé de equilíbrio durante o regime transiente aplica o método de oscilação em massa (teoria da coluna rígida) com as equações resolvidas pelo método das diferenças finitas, como mostra a Figura 38.



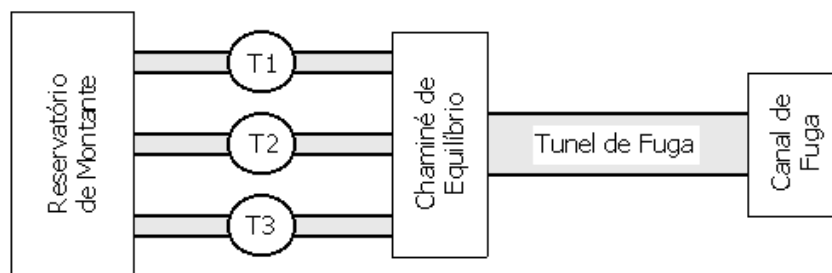
**Figura 38** – Esquema de cálculo do ESTRANHE.

No arquivo de entrada de dados, em padrão ASCII, devem ser informados o nível d'água no canal de fuga, a vazão por turbina, os dados geométricos e dinâmicos dos condutos, os dados da chaminé de equilíbrio, a curva de operação, os dados da turbina

(diagrama de SUTER), os coeficientes de perda de carga, a lei de operação das turbinas, a potência, entre outros.

O arquivo de saída fornece, em padrão ASCII, as pressões nos condutos forçados, a oscilação de nível na chaminé e a vazão em função do tempo.

O ESTRANHE admite até 3 condutos forçados independentes, mas de mesma geometria e com mesma condição de escoamento (vazões iguais). A geometria do modelo é rígida, ou seja, o circuito deve obedecer a seguinte ordem: reservatório de montante, condutos forçados, turbina, chaminé, túnel e canal de fuga, conforme a Figura 39, não admitindo outra disposição.



**Figura 39** – Esquema do sistema de operação do modelo ESTRANHE.

No ESTRANHE o coeficiente de perda de carga linear é considerado constante tanto nos condutos como no túnel. Para o cálculo da perda de carga linear no túnel, o modelo utiliza um conceito de diâmetro equivalente para o túnel de fuga, considerando-o como circular. Não permite variação no nível de jusante e também não admite que as turbinas operem com condições diferentes entre si.

Objetivando melhor representar o fenômeno transiente, algumas alterações foram implementadas no programa original (ESTRANHE) pelo Eng<sup>o</sup> Ricardo Eifler - IPH. A versão com alterações passou a ser chamada de ESTRANHE-IPH enquanto a versão original continuou sendo chamada de ESTRANHE.

As alterações feitas dizem respeito a:

- Utilização de uma linguagem visual, na plataforma Windows®, que permite uma operação mais amigável do sistema e facilita a introdução de dados e análise dos resultados que são apresentados de forma gráfica (mudança da forma de entrada e saída de dados do programa), como mostra a Figura 40;
- Número de circuitos a montante da chaminé variável;
- Cálculo do coeficiente de atrito " $f$ " nos condutos forçados pela fórmula de Colebrook-White ou por um valor fixo;
- Utilização de um valor fixo para o coeficiente de atrito " $f$ " do túnel de restituição ou seu cálculo por uma equação de potência;

- Possibilidade de variar o nível do canal de fuga durante o estudo, com limitação de 20.000 pontos;
- Utilização do diâmetro hidráulico, o qual é indicado pela bibliografia para o cálculo da perda de carga em formas não circulares sendo, aqui, aplicado ao túnel de fuga.

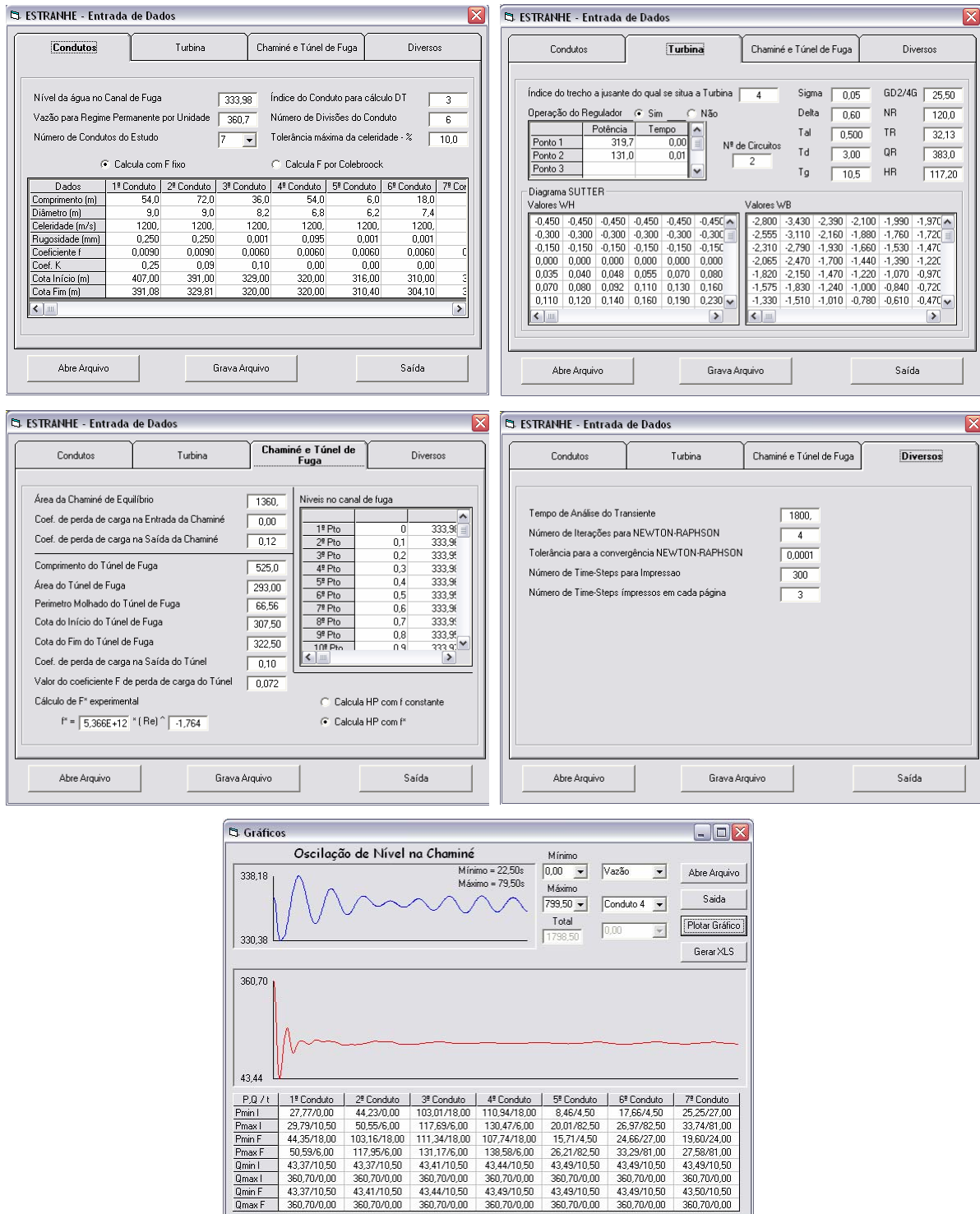


Figura 40 – Telas de utilização do modelo ESTRANHE-IPH.

Na tela de saída do programa ficam disponíveis para visualização os valores da oscilação de nível na chaminé e a pressão ou vazão em cada conduto, para tanto, é necessário que o usuário escolha qual conduto e qual o dado ele deseja visualizar. Também é apresentada uma tabela onde consta um resumo com os valores extremos observados em cada conduto.

Cabe salientar aqui que o diagrama de Suter utilizado no programa ESTRANHE adaptado pelo IPH foi o mesmo utilizado no programa inicial, dado que não se dispunha do verdadeiro diagrama de Suter das turbinas da UHE Serra da Mesa. No programa original conforme informações obtidas estão colocadas as curvas da UHE Itaipu, uma vez que apresentam uma rotação específica similar ( $N_s$  Itaipu = 210 e  $N_s$  Serra de Mesa = 199). Estava disponível durante a realização deste estudo a curva de operação das turbinas da UHE de Serra da Mesa, apresentada na Figura 33.

As limitações do modelo ESTRANHE-IPH são:

- A estrutura em estudo deve seguir a ordem: tomada d'água, condutos forçados; turbinas; tubo de sucção curto; chaminé de equilíbrio; túnel e canal de fuga;
- A taquicarga no canal de fuga é desprezada;
- Os circuitos hidráulicos, incluindo as turbinas devem ser idênticos e devem apresentar as mesmas condições iniciais de escoamento;
- Durante o regime transitório, todas as unidades devem estar sujeitas à mesma operação, tanto em relação ao sistema elétrico como em relação ao regulador;
- As curvas características das unidades devem ser fornecidas;
- O nível de montante é dado de saída;
- Não permite variar a área da base da chaminé.

#### 4.4.3 Organização das Simulações

As simulações numéricas foram realizadas dentro das seguintes fases:

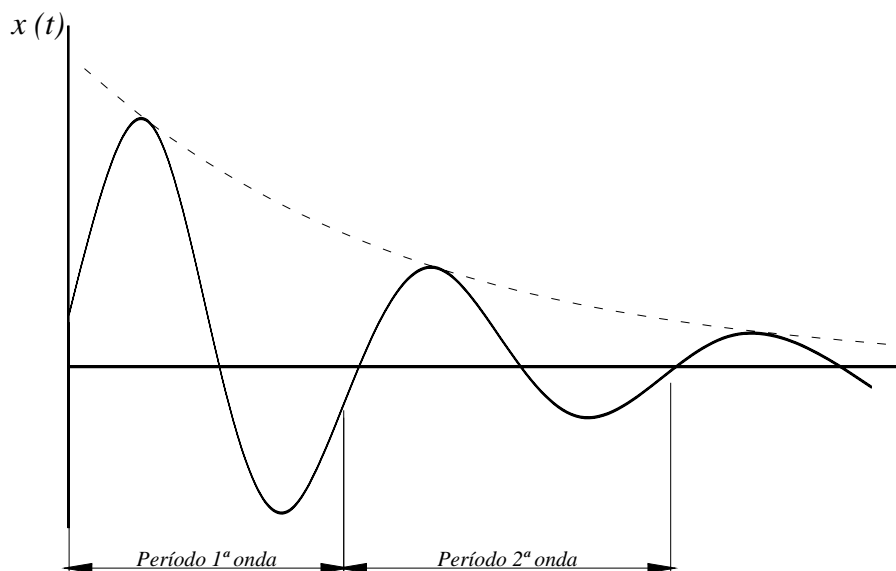
**Fase I** - Simulação de regimes transientes ocorridos na Usina de Serra da Mesa:

Realizaram-se simulações numéricas nos programas CHAMINE e ESTRANHE originais, cedidos por FURNAS, e nas versões modificadas pelo IPH denominadas CHAMINE-IPH e ESTRANHE-IPH, comparando seus resultados com os dados experimentais registrados na usina. Estas simulações proporcionaram um maior conhecimento sobre o funcionamento dos programas, bem como a identificação dos programas mais adequados à aplicação na seqüência do trabalho.

**Fase II** - Simulações numéricas para análise da influência de parâmetros físicos nas oscilações em chaminés de equilíbrio:

Com os programas computacionais validados, tornou-se possível a simulação de situações nas quais variavam-se os parâmetros físicos. Fez-se a análise da influência de cada um destes parâmetros nas oscilações de nível d'água na chaminé de equilíbrio, para uma usina nos moldes de Serra da Mesa.

Para medição do período de cada onda, considerou-se o seu tempo de início como o tempo médio entre a ocorrência do mínimo da onda anterior e do máximo da onda atual, e o seu tempo de fim como sendo o tempo médio entre a ocorrência do mínimo da onda atual e do máximo da onda subsequente, tendo em vista que as ondas não são harmônicas, conforme a Figura 41.



**Figura 41** – Forma de mensuração do período.

Estabeleceu-se uma simulação, denominada padrão, que, por medidas de controle e confiança, representa uma situação real de funcionamento registrada na usina. Efetuou-se posteriormente, para a análise da influência de cada parâmetro físico, simulações variando um parâmetro por vez e computando as alterações das oscilações de nível na chaminé de equilíbrio comparadas com a oscilação da simulação padrão.

Na seqüência apresentam-se os parâmetros estudados e as simulações realizadas. Cada simulação recebeu um nome para facilitar sua apresentação no item resultados e discussão.

Em algumas simulações as variações dos parâmetros foram estipuladas em porcentagem do valor aplicado na simulação padrão. Realizaram-se variações de 5%, com a finalidade de representar uma possível faixa de erros de projeto, e em

porcentagens exageradas (15% e 50%, conforme indicado na seqüência), objetivando facilitar a visualização dos efeitos dos parâmetros.

- ❖ Geometria - realizou-se a variação da área da chaminé de equilíbrio e da área e comprimento do túnel de fuga. As simulações foram as seguintes:
  - Área da Chaminé:
    - A1 = Área 5% maior que a da simulação padrão;
    - A2 = Área 50% maior que a da simulação padrão;
    - A3 = Área 5% menor que a da simulação padrão;
    - A4 = Área 50% menor que a da simulação padrão;
    - A5 = Área igual a área do túnel de fuga;
    - A6 = Área igual a área de Thoma.
  - Comprimento do túnel de fuga:
    - C1 = Comprimento 5% maior que o da simulação padrão;
    - C2 = Comprimento 15% maior que o da simulação padrão;
    - C3 = Comprimento 5% menor que o da simulação padrão;
    - C4 = Comprimento 15% menor que o da simulação padrão.
  - Área do túnel de fuga:
    - AT1= Área 5% maior que a da simulação padrão;
    - AT2= Área 15% maior que a da simulação padrão;
    - AT3= Área 5% menor que a da simulação padrão;
    - AT4= Área 15% menor que a da simulação padrão;
- ❖ Perda de carga - foram aplicados a equação encontrada para o túnel de Serra da Mesa e coeficientes teóricos:
  - P1 =  $f$  fixo = 0,073 (Czarnota),  $\Sigma k = 0,22$ ;
  - P2 =  $f$  fixo = 0,0106 (Manning – n mínimo),  $\Sigma k = 0,22$ ;
  - P3 =  $f$  fixo = 0,073 (Czarnota),  $\Sigma k = 1,0$ ;
  - P4 =  $f$  fixo = 0,0106 (Manning – n mínimo),  $\Sigma k = 1,0$ ;
  - P5 =  $f$  variável, curva ajustada para  $\Sigma k = 1,0$ .
- ❖ Vazão - variação da curva de fechamento da turbina e conseqüentemente da velocidade de escoamento no circuito hidráulico:
  - Q1 = Vazão 5% maior que a da simulação padrão;
  - Q2 = Vazão 50% maior que a da simulação padrão;
  - Q3 = Vazão 5% menor que a da simulação padrão;
  - Q4 = Vazão 50% menor que a da simulação padrão;
  - Q5 = Vazão variando em linha reta entre os pontos inicial e final da simulação padrão.
- ❖ Nível de jusante:

CF1= Nível fixo e igual ao do início da rejeição;

CF2= Nível fixo e igual ao do final da rejeição;

CF3= Nível variável conforme o real e deslocado 1 metro para cima;

CF4= Nível variável conforme o real e deslocado 1 metro para baixo;

CF5= Nível variável entre dois pontos (igual ao inicial e ao final da rejeição).

❖ Tempo de fechamento do distribuidor:

T1 = Igual a 0,1 s;

T2 = Igual a 20 s;

T3 = Igual a 40 s;

T4 = Igual a 60 s;

T5 = Igual a 80 s.

### **Fase III - Simulação numérica de situações de projeto, aplicado a Usina de Serra da Mesa**

Foram realizadas, para cada situação, duas simulações, uma aplicando parâmetros teóricos que provavelmente seriam escolhidos na fase de dimensionamento da chaminé de equilíbrio, e outra aplicando os parâmetros reais obtidos com esta pesquisa.

As rejeições estudadas referem-se à operação da usina com carga máxima para níveis no canal de fuga normal, sem vertimento, enchente com período de retorno de 100 anos e enchente máxima provável.

Buscou-se a verificação da confiança dos projetos quando da utilização dos parâmetros teóricos no que diz respeito ao estabelecimento de dimensões para que a chaminé cumpra adequadamente suas funções.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

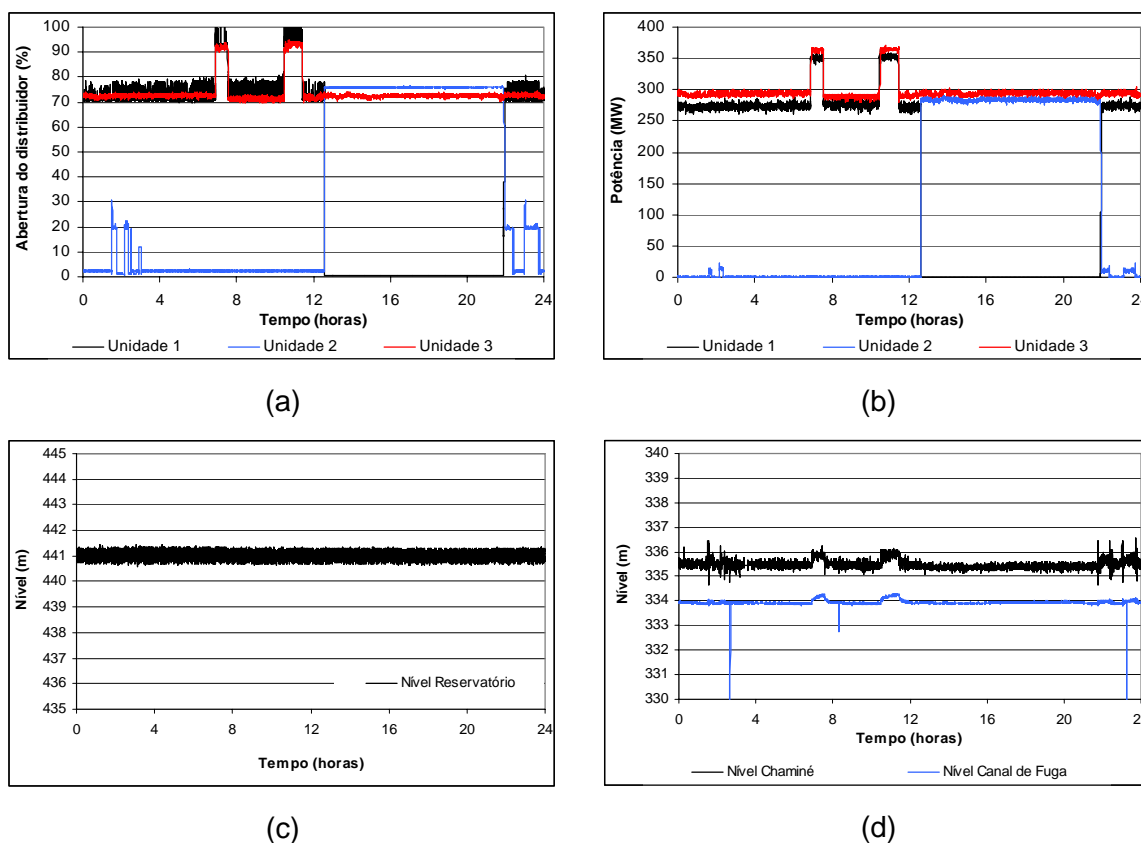
### 5.1 Aquisição de Dados na Usina de Serra da Mesa

O sistema de aquisição de dados implantado monitorou os níveis no reservatório, canal de fuga e chaminé, além das potências e aberturas das três unidades (turbinas). Os registros foram divididos entre dados diários, utilizados no estudo sobre a perda de carga no túnel da Usina de Serra da Mesa, e dados das rejeições, aplicados na verificação dos resultados dos modelos numéricos.

#### 5.1.1 Dados Diários

Os dados diários considerados neste estudo foram coletados entre 12 de julho e 26 de setembro de 2004.

Os gráficos da Figura 42 apresentam, como exemplo, as medições realizadas no dia 18/07/2004.



**Figura 42** – Medições realizadas no dia 18/07/2004 na UHE de Serra da Mesa, (a) Aberturas dos distribuidores, (b) Potências geradas, (c) Nível d'água no reservatório, (d) Nível d'água na chaminé e canal de fuga.



Pela Figura 42, verifica-se que no início do dia as turbinas 1 e 3 estavam em operação gerando aproximadamente 275 MW e 297 MW, respectivamente, sendo suas potências elevadas por volta das 7 e das 11 horas da manhã e, ainda, que ocorreu uma alternância entre as turbinas 1 e 2 no período entre 13 e 22 horas. Para o aumento da potência gerada pelas turbinas 1 e 3 no período da manhã, as palhetas destas turbinas foram abertas aumentando-se a vazão. Percebe-se ainda que o nível d'água no reservatório foi praticamente estável ao longo do dia. Os níveis d'água na chaminé de equilíbrio e canal de fuga, respondem à abertura das palhetas dos distribuidores das turbinas com a elevação do nível d'água, devido ao aumento de vazão, e a redução deste nível com a diminuição das aberturas.

Existem ruídos elétricos incorporados às medições, no entanto, os sinais registrados são bastante característicos, facilitando a identificação destes ruídos.

### 5.1.2 Rejeições

Dentro do período de aquisição de dados, no qual se baseou este trabalho, apenas uma rejeição de carga foi registrada.

Programada junto ao Operador Nacional do Sistema Elétrico – ONS, a rejeição de carga realizada às 1:17 horas da madrugada do dia 1º de outubro de 2004 foi completamente registrada pelo sistema de aquisição de dados, no que diz respeito aos níveis no reservatório, canal de fuga e chaminé, além das potências e aberturas das três turbinas.

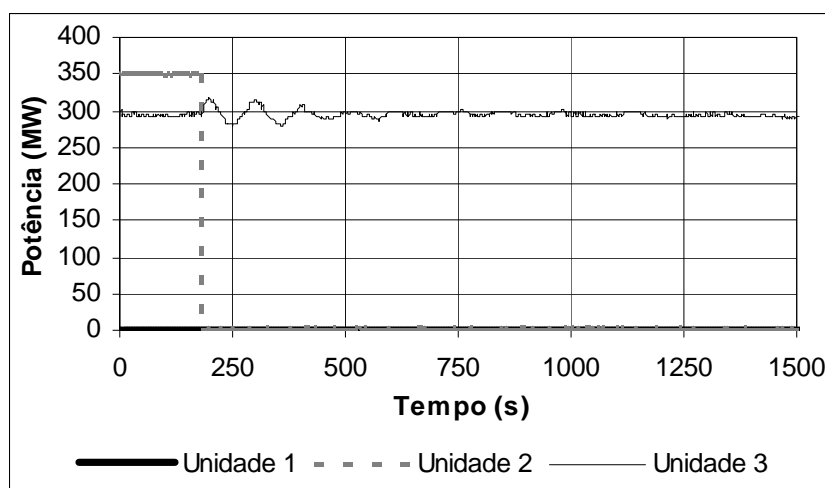
As condições iniciais desta rejeição de carga foram as seguintes:

|  |           |
|--|-----------|
| ▪ Nível d'água no reservatório:          | 437,60 m  |
| ▪ Nível d'água no canal de fuga:         | 333,98 m  |
| ▪ Nível d'água na chaminé de equilíbrio: | 335,53 m  |
| ▪ Abertura turbina 1:                    | 0,00%     |
| ▪ Potência turbina 1:                    | 0,00 MW   |
| ▪ Abertura turbina 2:                    | 98,92%    |
| ▪ Potência turbina 2:                    | 350,00 MW |
| ▪ Abertura turbina 3:                    | 77,02%    |
| ▪ Potência turbina 3:                    | 292,70 MW |

Provocou-se uma rejeição de carga total na turbina 2, mantendo-se a turbina 3 inalterada. A turbina 1 encontrava-se fora de operação devido a problemas mecânicos ocorridos na semana anterior.

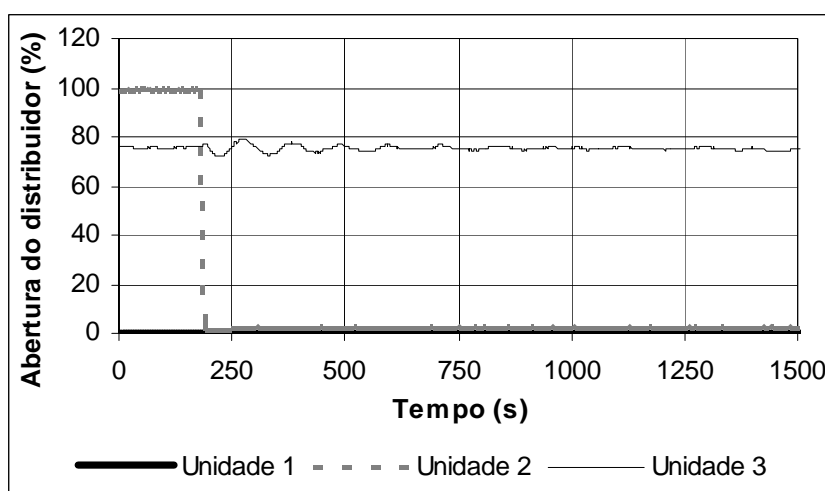
A Figura 43 apresenta o comportamento das potências durante a rejeição de carga. Analisando esta figura observa-se que a turbina ou unidade 1, por estar fechada e fora de operação, não sofre influência alguma, que a unidade 2, na qual a rejeição é provocada, a

potência sofre uma queda de 350 MW para 0 MW, e que a unidade 3 apresenta oscilações no valor de potência gerada, após a rejeição da unidade 2, que variam entre 279,5 MW e 316,9 MW. Espera-se este comportamento da potência gerada na unidade 3, pois, durante o regime transiente provocado no sistema ocorrem alterações de nível na chaminé de equilíbrio e, conseqüentemente, alterações do valor de carga hidráulica disponível para geração, assim, o regulador da turbina 3 entra em ação buscando a estabilidade da potência gerada.



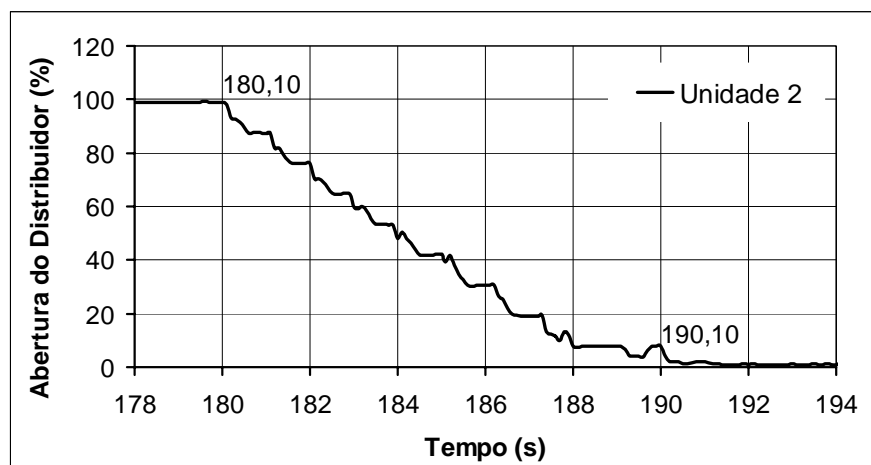
**Figura 43** – Comportamento das potências das três unidades geradoras.

Na Figura 44, mostra-se o comportamento das aberturas dos distribuidores das turbinas durante a rejeição de carga. Observa-se que a unidade 1 não apresenta alteração nenhuma em sua abertura, pelo fato de estar fora de operação, que a abertura da unidade 2 passa de aproximadamente 100% para aproximadamente 0%, e que a unidade 3 apresenta variações na porcentagem de abertura devido à atuação do regulador.



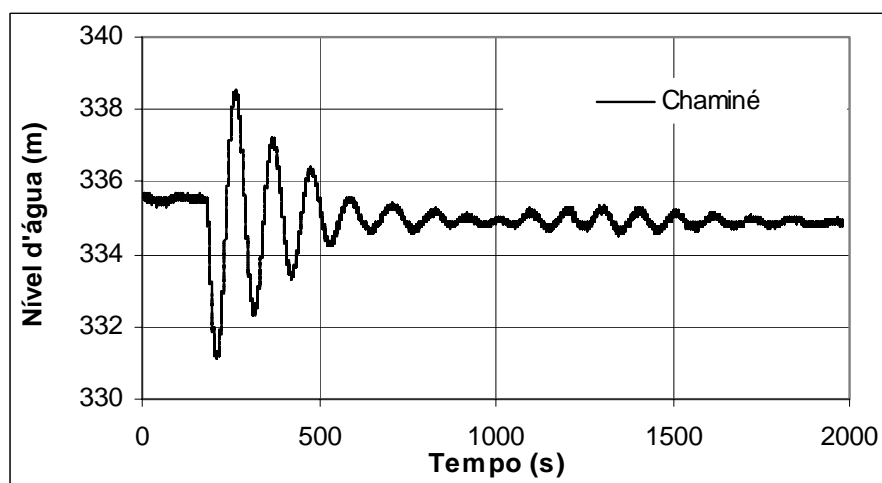
**Figura 44** - Comportamento das aberturas dos distribuidores das três turbinas durante a rejeição.

Na Figura 45 pode-se observar a manobra de fechamento do distribuidor da unidade 2 que demora aproximadamente 10 s.



**Figura 45** – Comportamento da abertura do distribuidor da unidade 2 no momento da rejeição.

A rejeição de carga provocada na unidade de geração 2 desencadeou um regime transiente no circuito hidráulico da Usina de Serra da Mesa. Como a chaminé de equilíbrio, nesta usina, encontra-se imediatamente após as turbinas o fechamento de uma turbina provoca, em um primeiro momento, a redução da vazão no circuito de jusante e a água contida na chaminé é utilizada para abastecer o túnel de fuga, como se verifica na Figura 46.



**Figura 46** – Comportamento do nível d'água na chaminé de equilíbrio com a rejeição de carga da unidade de geração 2.

O nível d'água na chaminé manteve suas oscilações entre 338,46 m e 331,21 m, tendendo à estabilização em aproximadamente 780 segundos (13 minutos) após a parada da turbina 2. No Quadro 3 apresenta-se os valores de amplitude e período registrados nas três primeiras oscilações.

**Quadro 3** –Amplitude e período das três primeiras oscilações da rejeição de 1° de outubro de 2004.

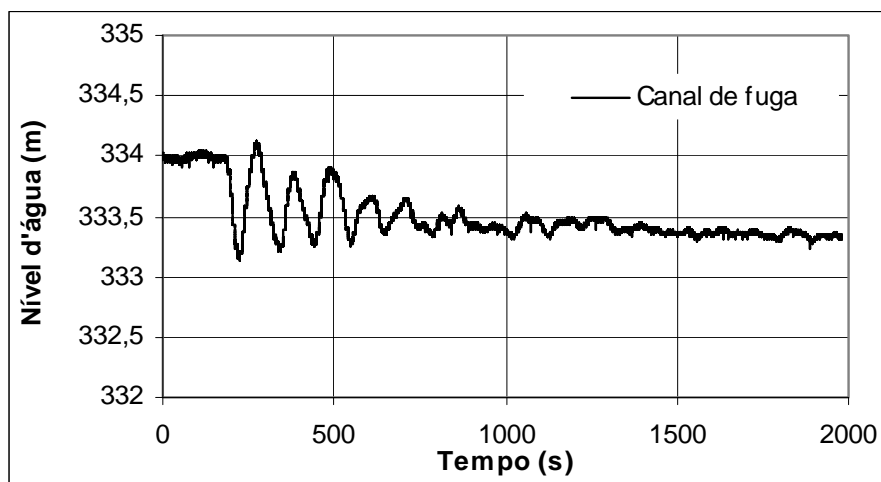
| Oscilação | Amplitude | Período |
|-----------|-----------|---------|
|           | (m)       | (s)     |
| 1ª        | 6,62      | 106,15  |
| 2ª        | 4,82      | 110,75  |
| 3ª        | 3,03      | 109,95  |

A amplitude teórica, calculada pelas indicações de ELETROBRÁS (1999), apresenta um valor de 13,35 m, que é bastante superior ao valor registrado. No entanto, o valor teórico seria referente a uma rejeição de carga total de todas as unidades, o que não ocorreu nesta situação.

O cálculo do período pela formulação teórica forneceu o valor de 99,02 s, que é inferior aos registrados. O fator de amortecimento das oscilações desta rejeição foi de 0,0284, calculado conforme a Equação (26).

Após o nível d'água na chaminé encontrar-se praticamente estabilizado, ocorreu uma certa amplificação nas oscilações e posterior estabilização total. Esta amplificação se deve a uma nova manobra de ajuste da turbina que permaneceu em operação, podendo ser reflexo do transiente provocado no sistema elétrico.

O nível d'água no canal de fuga também apresenta um comportamento oscilatório após a parada da turbina 2, como pode ser visualizado na Figura 47.



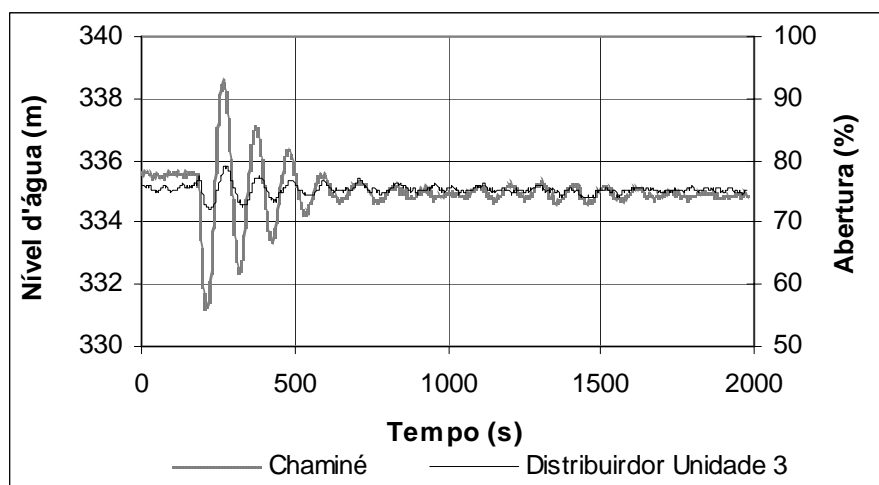
**Figura 47** - Comportamento do nível d'água no canal de fuga com a rejeição de carga da unidade de geração 2.

Comparando-se o comportamento dos níveis d'água na chaminé de equilíbrio e canal de fuga, percebe-se um comportamento similar, porém, com diferenças de amplitudes e períodos. O tempo de estabilização é bastante similar e a amplificação das

oscilações registrada na chaminé, próxima aos 1000 s, também pode ser verificada no nível d'água no canal de fuga.

Os geradores utilizados na Usina Hidrelétrica de Serra da Mesa são síncronos, o sistema de potência opera com frequência fixa. Para controlar a potência elétrica dos conjuntos, adotaram-se reguladores de velocidade, que controlam a frequência através da variação de potência, atuando no controle da entrada de água da turbina.

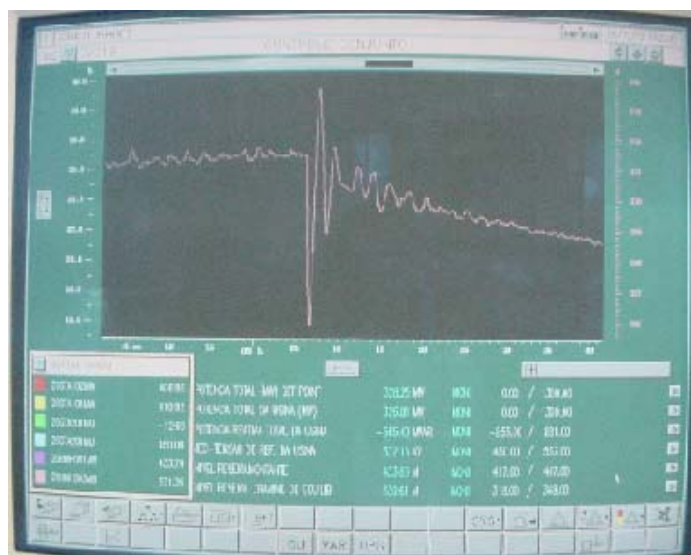
Lembrando que a potência gerada é função da carga hidráulica disponível e da vazão, para se manter a potência constante faz-se necessário diminuir a vazão quando a carga hidráulica aumenta e aumentar a vazão quando a carga hidráulica diminui. Isto pode ser verificado na Figura 48 que apresenta a comparação entre o nível d'água registrado na chaminé de equilíbrio e a abertura do distribuidor da turbina 3 durante o regime transiente. Quando o nível d'água na chaminé diminui, a carga hidráulica disponível aumenta e o regulador diminui a abertura das palhetas das turbinas de forma a reduzir a vazão e manter a potência e vice-versa. Retornando à Figura 43, verifica-se que a potência gerada pela unidade 3 apresenta oscilações em seu valor no período em que as oscilações de nível na chaminé são maiores, estabilizando logo após.



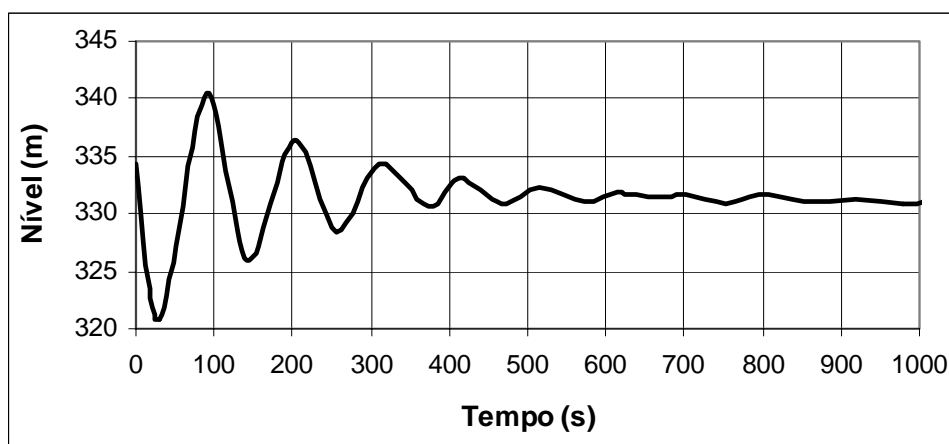
**Figura 48** – Comparação entre os dados de nível d'água na chaminé e abertura do distribuidor da unidade geradora 3.

No dia 4 de julho de 1999, anteriormente à instalação do sistema de aquisição de dados na usina, ocorreu uma rejeição de carga total de 1180 MW a 0 MW, onde as três turbinas encontravam-se em operação. Esta rejeição foi provocada na usina para analisar o deslocamento de ar nos túneis de acesso à chaminé de equilíbrio, quando da ocorrência de uma rejeição total com vazão turbinada próxima da vazão máxima.

As informações sobre a rejeição de 4 de julho de 1999 foram obtidas graças à colaboração dos engenheiros da UHE Serra da Mesa que, por iniciativa própria, copiaram os valores dos picos das oscilações de nível da chaminé de equilíbrio da tela do computador do sistema de controle da usina, a qual encontra-se exemplificada na Figura 49, pois o sistema original da usina não permitia a gravação dos dados. A oscilação registrada na chaminé durante a rejeição de 4 de julho de 1999 encontra-se apresentada na Figura 50.



**Figura 49** – Tela do sistema de controle da usina.



**Figura 50** – Comportamento do nível d'água na chaminé de equilíbrio durante a rejeição de carga de 4 de julho de 1999.

As oscilações permaneceram entre 320,79 m e 340,5 m, com um fator de amortecimento de 0,1222. No Quadro 4 apresentam-se os valores de amplitude e período registrados nas três primeiras oscilações.

A amplitude teórica, calculada pelas indicações de ELETROBRÁS (1985 e 1999), apresenta um valor de 26,05 m, que é bastante superior ao valor registrado. E o período calculado pela formulação teórica teve o valor de 99,02 s, que é inferior aos registrados.

**Quadro 4** – Amplitude e período das três primeiras oscilações da rejeição de 4 de julho de 1999.

| Oscilação      | Amplitude | Período |
|----------------|-----------|---------|
|                | (m)       | (s)     |
| 1 <sup>a</sup> | 19,71     | 115,5   |
| 2 <sup>a</sup> | 10,6      | 112,5   |
| 3 <sup>a</sup> | 6,06      | 114     |

Durante esta rejeição os sensores de nível a jusante do canal de fuga não estavam funcionando e os níveis de jusante foram obtidos através de leituras em uma régua situada a aproximadamente 400 m a jusante do canal de fuga. Apenas dois pontos foram registrados, um anterior a rejeição e igual a 333,05 m e outro 861 s após a ocorrência do transitório, igual a 329,21 m. Em 1999 a UHE Cana Brava ainda não tinha sido construída, portanto, o nível de jusante estava sujeito ao escoamento normal do rio Tocantins.

## 5.2 Aquisição de Dados na Estrutura do LAHE

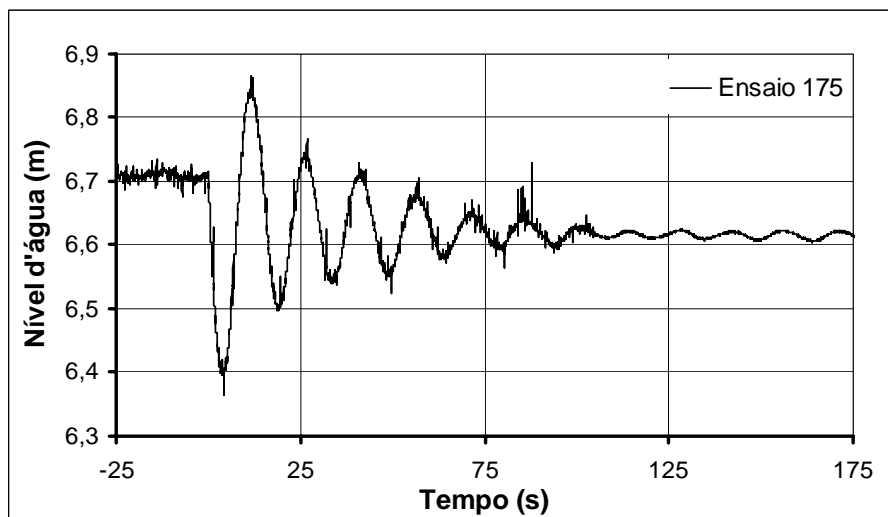
Diversos foram os ensaios realizados na estrutura do LAHE no período de maio de 2003 a agosto de 2004. Muitos destes ensaios serviram para definição das condições de funcionamento das válvulas e dos equipamentos de aquisição de dados, além da verificação das dificuldades de execução dos ensaios e da qualidade dos dados adquiridos. E outros ensaios serviram para o estudo do regime transiente nos condutos forçados, dentro do projeto de pesquisa e desenvolvimento “Transientes Hidráulicos em Circuitos de Usinas Hidrelétricas”.

Quanto aos ensaios referentes ao estudo do regime transiente a jusante das válvulas, apresenta-se, a seguir, alguns exemplos para o auxílio no entendimento do comportamento no nível d’água na chaminé de equilíbrio durante este regime transitório.

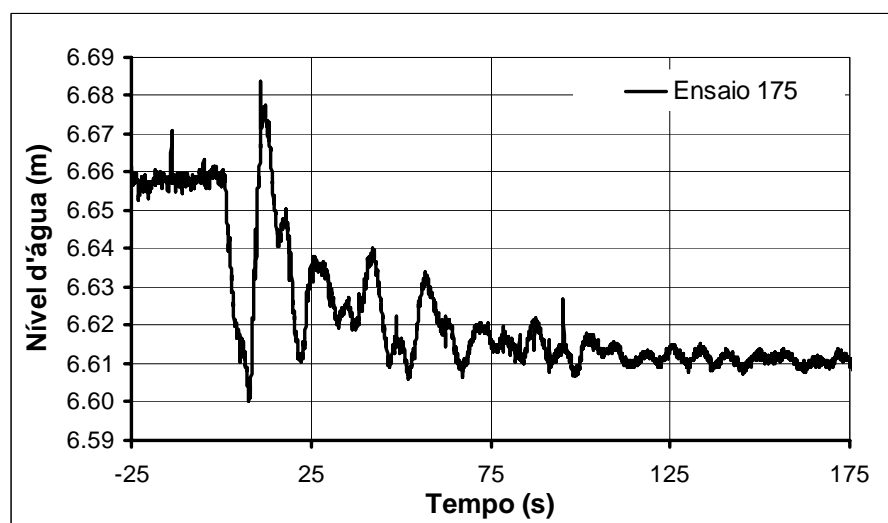
A Figura 51 apresenta a oscilação de nível d’água na chaminé de equilíbrio para um ensaio de fechamento total, abertura das válvulas variando de 100% para 0%, e a Figura 52 mostra o comportamento do nível d’água no canal de fuga para o mesmo ensaio.

Pode-se visualizar que os sinais são afetados por ruídos elétricos, principalmente o sinal de nível no canal de fuga. Acredita-se que estes ruídos possam ser causados pelo servo motor, ou pelas bombas existentes na estação de bombeamento localizada ao lado

da estrutura. Verifica-se neste ensaio que em torno de 100 s o ruído foi praticamente extinto. Como o comportamento dos dados de nível é bastante característico e, para este estudo, os valores médios são os de maior importância, os ruídos podem ser filtrados.



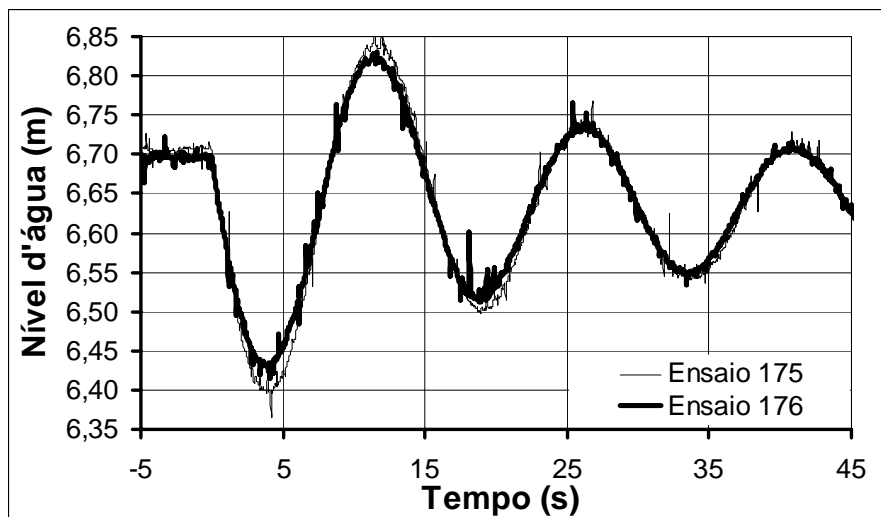
**Figura 51** – Nível d'água na chaminé para um ensaio de fechamento total.



**Figura 52** – Nível d'água no canal de fuga para um ensaio de fechamento total.

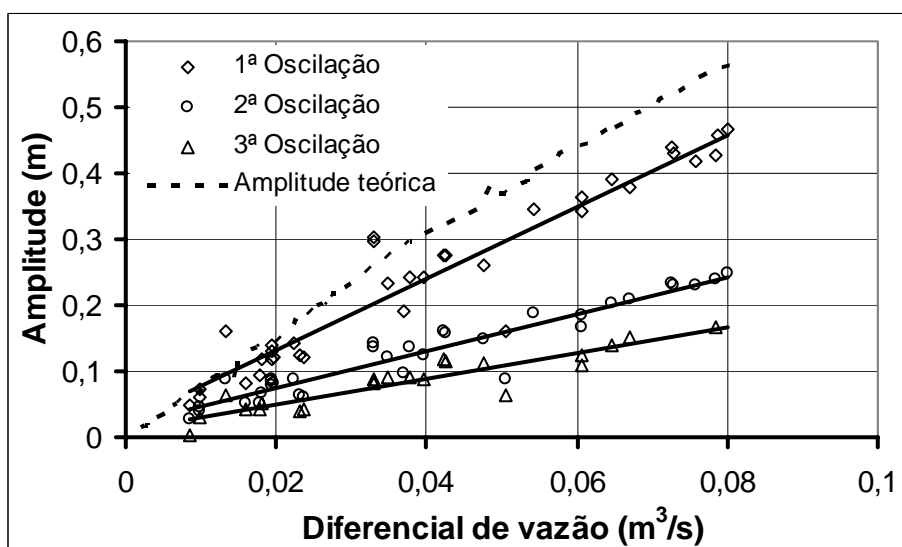
Na Figura 53 encontra-se a comparação entre um ensaio realizado de 100% de abertura para 0% e um ensaio feito com abertura inicial de 75% passando a 0%. Para ambos os ensaios o tempo de fechamento das válvulas foi de 0,2 s. Pode-se conferir que para o ensaio com menor diferencial de vazão (75% - 0%), as amplitudes foram menores que para o ensaio com maior diferencial de vazão (100% - 0%).





**Figura 53** – Comparação entre os ensaios 175 (100% - 0%) e 176 (75% - 0%).

A Figura 54 mostra a tendência apresentada pelas amplitudes das oscilações na chaminé de equilíbrio com a variação do diferencial de vazão, para os ensaios de fechamento, com tempo de manobra de 0,2 s.

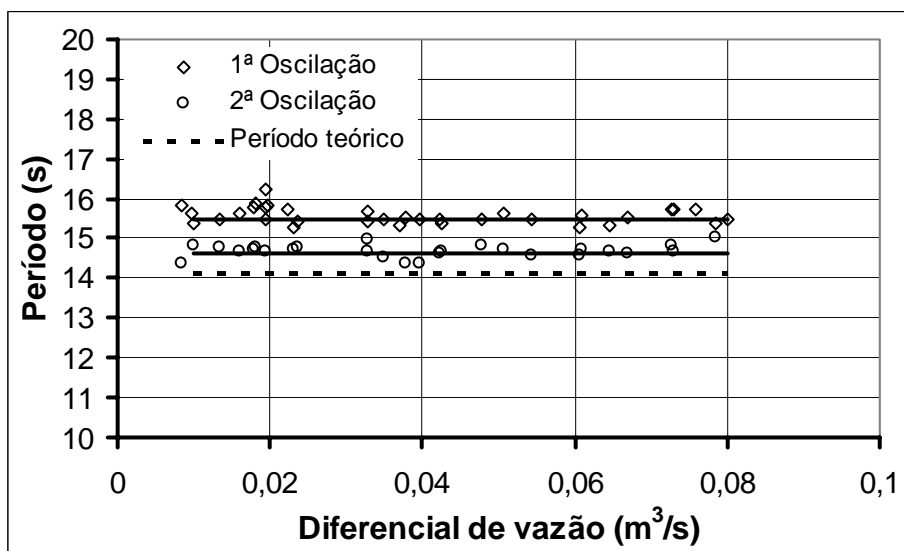


**Figura 54** – Comportamento das amplitudes em ensaios de fechamento.

Pela Figura 55 percebemos que as amplitudes das oscilações crescem linearmente com o aumento do diferencial de vazão para o caso dos ensaios de fechamento das válvulas e que as amplitudes registradas apresentaram valores inferiores aos teóricos ( $Y_E + Y_D$ , item 3.3.4.2).

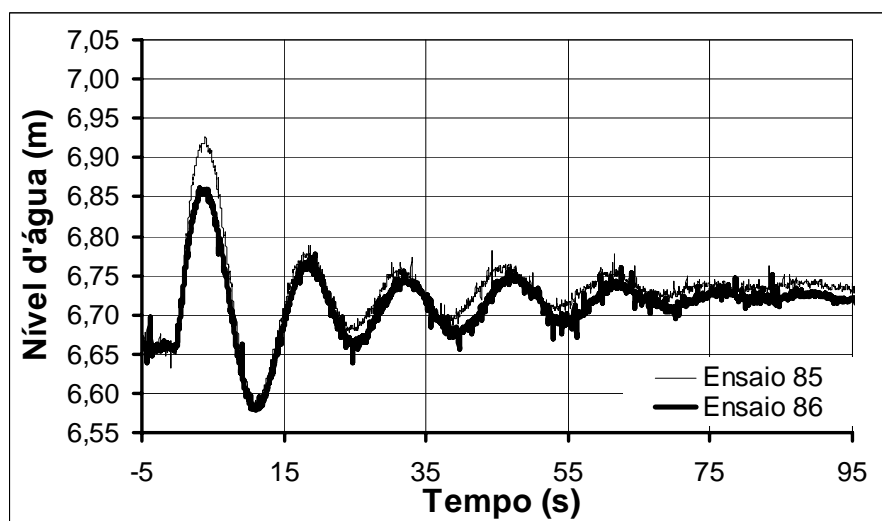
Em se tratando de períodos, estes tendem a ser constantes nas primeiras oscilações de nível d'água na chaminé de equilíbrio para diferentes diferenças de vazão, nos ensaios de fechamento com tempo de manobra de 0,2 s. A primeira oscilação

manteve-se com um período em torno de 15,5 s, enquanto a segunda manteve-se com aproximadamente 14,6 s, como pode ser visualizado na Figura 55, sendo que o período calculado pelas bases teóricas (Equação 24) apresentou valor inferior aos registrados.



**Figura 55** – Comportamento dos períodos em ensaios de fechamento.

A Figura 56 apresenta a comparação entre dois ensaios de abertura, um com abertura inicial de 0% passando a 75% e outro partindo de 0% para 100% de abertura, ambos com tempo de manobra de 0,2 s.

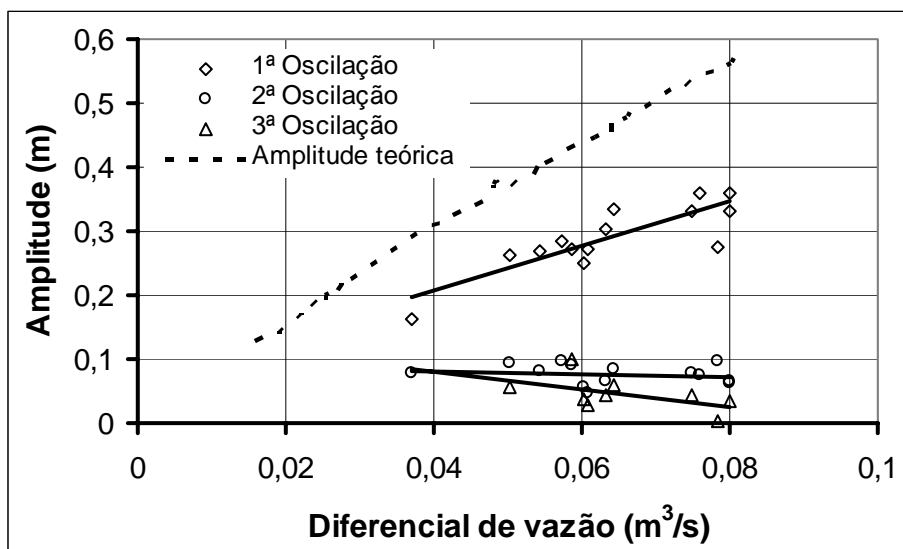


**Figura 56** – Comparação entre os ensaios 85 (0% - 100%) e 86 (0% - 75%).

Nos ensaios de abertura, a primeira oscilação apresentou amplitude tanto maior quanto o diferencial de vazão, porém, quanto maior a vazão final mais rápida foi a estabilização, assim, as oscilações posteriores apresentaram amplitudes inversamente

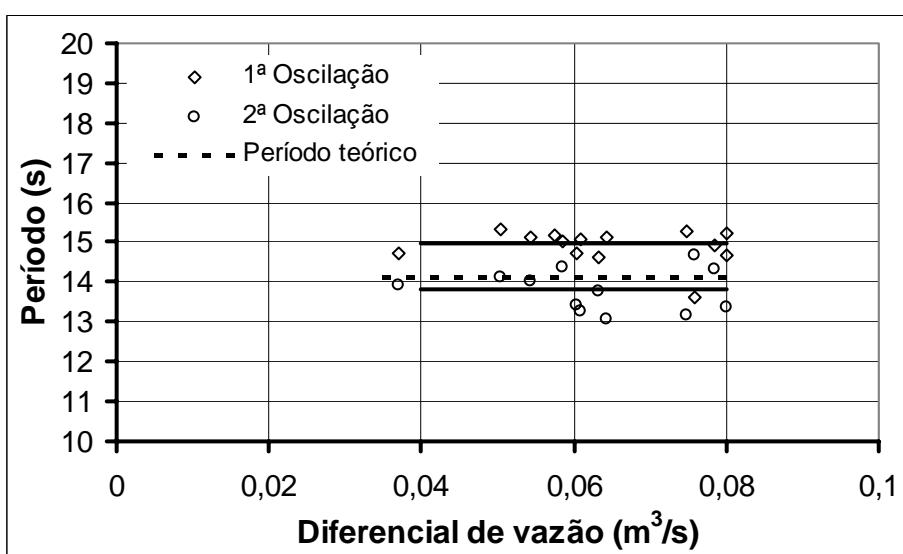
proporcionais ao diferencial de vazão. Os valores registrados para as amplitudes foram inferiores aos calculados pela equação sugerida por ELETROBRÁS (1985 e 1999).

A Figura 57 apresenta a tendência apresentada pelos ensaios de abertura para as amplitudes das oscilações na chaminé de equilíbrio.



**Figura 57** – Comportamento das amplitudes em ensaios de abertura.

Os períodos tendem a ser constantes nas primeiras oscilações pra diferentes diferencias de vazão. A primeira oscilação possui um período em torno de 15 s, enquanto a segunda tem este valor em aproximadamente 13,8 s, como pode ser visualizado na Figura 58. Percebe-se que os ensaios de abertura tendem a apresentar períodos menores para as oscilações de nível na chaminé de equilíbrio, se aproximando mais do período teórico.



**Figura 58** – Comportamento dos períodos em ensaios de abertura.

### 5.3 Perda de Carga

Sendo o coeficiente de atrito no túnel de restituição um dos dados de entrada nos modelos numéricos para a simulação de regimes transientes, sua determinação faz-se muito importante para prosseguimento da pesquisa sobre a influência dos parâmetros físicos no comportamento do nível d'água em chaminés de equilíbrio durante regimes transitórios.

Para a determinação do coeficiente de atrito do túnel da Usina Hidrelétrica de Serra da Mesa, onde seria aplicada a pesquisa, foram utilizados os dados de regimes permanentes registrados durante a operação normal desta usina.

Como os resultados iniciais deste estudo, mostraram-se diferentes do esperado frente aos resultados dos métodos teóricos de determinação do coeficiente de atrito em túneis escavados em rocha, foi motivada a investigação sobre o comportamento deste parâmetro em túneis de outras estruturas. O estudo foi realizado, então, nos túneis das usinas de Serra da Mesa, Salto Forqueta e Bugres, e da Estrutura do LAHE, com o objetivo de se compreender o fenômeno.

#### 5.3.1 Usina Hidrelétrica de Serra da Mesa

Das aquisições de dados diários, escolheram-se períodos onde não houvesse variações nas condições de operação. Foram calculados os valores médios de potência e abertura do distribuidor de cada unidade geradora, além dos valores médios dos níveis. Assim, para cada período determinou-se uma vazão, através do gráfico de operação das turbinas, e uma perda de carga total, através da diferença de nível entre a chaminé de equilíbrio e o canal de fuga. A Figura 59 apresenta o desenvolvimento da perda de carga total frente a variação de vazão.

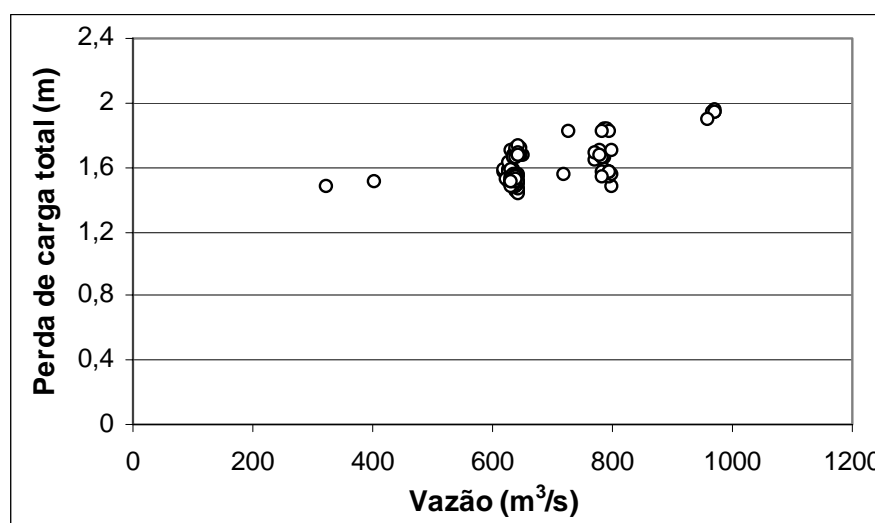


Figura 59 – Perda de carga total versus vazão – Serra da Mesa.

Pode-se perceber pela Figura 59 que a maior concentração de pontos encontra-se nas faixas de 600 m<sup>3</sup>/s e 800 m<sup>3</sup>/s, condição mais comum de operação da usina na época atual, é também nestas zonas que a dispersão apresenta-se de forma relativamente significativa. Visualiza-se também que com o aumento da vazão ocorre o acréscimo do valor da perda de carga, ficando os valores registrados entre 1,93 m e 1,47 m.

O túnel da Usina de Serra da Mesa foi, entre os túneis aqui estudados, o de maior área (área média igual a 293 m<sup>2</sup>), e nele foram registradas as maiores vazões (mínima de 323 m<sup>3</sup>/s e máxima de 971 m<sup>3</sup>/s), vazão esta que pode chegar a mais de 1200 m<sup>3</sup>/s segundo o gráfico de operação das turbinas.

Entre os pontos de medição (chaminé de equilíbrio e canal de fuga), existem três pontos onde o cálculo da perda de carga localizada torna-se necessário: a saída da chaminé, curva de 62,5° e a saída do túnel. O Quadro 5 apresenta os coeficientes indicados pela bibliografia para estas singularidades.

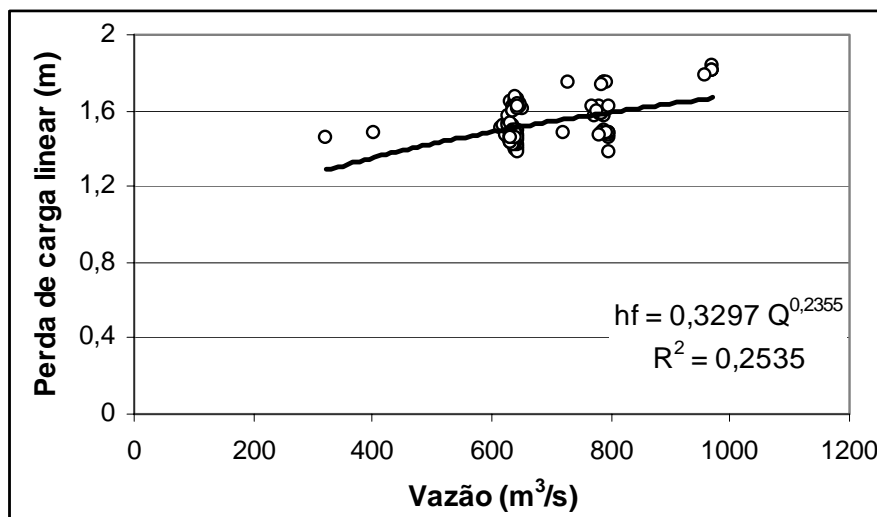
**Quadro 5** – Coeficientes de perda de carga localizada adotados.

| Singularidade    | Coeficiente de perda de carga localizada |              |               |
|------------------|--|--------------|---------------|
|                  | Valor mínimo                             | Valor máximo | Valor adotado |
| Saída da chaminé | 0,04                                     | 0,5          | 0,04          |
| Curva de 62,5°   | 0,08                                     | 0,12         | 0,08          |
| Saída do túnel   | 0,1                                      | 1,0          | 0,1           |

Fontes: SCHREIBER (1977); SINNIGER & HAGER (1989); ZULCY *et al.* (1999).

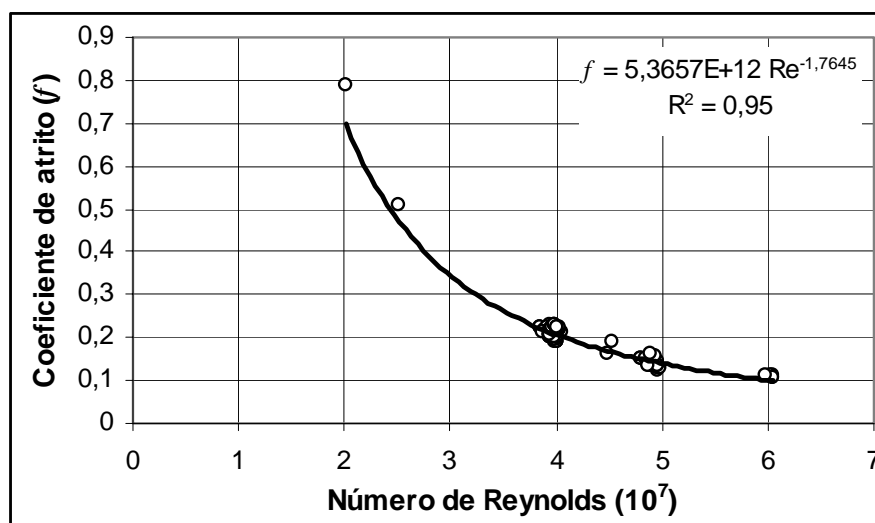
A escolha dos menores valores indicados pela bibliografia baseou-se no fato de a saída da chaminé possuir um formato hidrodinâmico e a saída do túnel ao canal de fuga possuir paredes em ângulo reduzido, o que diminui a perda de carga. Também foram realizadas simulações no programa CHAMINE-IPH que mostraram que estes coeficientes apresentam os melhores resultados nas simulações do regime transiente, comparando com dados reais.

A Figura 60 apresenta os valores calculados de perda de carga linear referentes as diversas vazões. Observando o estudo realizado por RAHM (1958) buscou-se o ajuste de uma curva de potência a estes dados, o qual foi bastante influenciado pela zona onde a dispersão é mais significativa. Neste caso, a relação encontrada por RAHM (1958), que mostra que a perda de carga é proporcional ao quadrado da vazão, não foi verificada. Forçando o ajuste de uma equação como a proposta por RAHM (1958) aos dados de Serra da Mesa, obteve-se uma curva incapaz de reproduzir os dados experimentais. Logo o coeficiente de atrito seria função do número de Reynolds.



**Figura 60** – Ajuste de curva de potência aos dados de perda de carga linear – Serra da Mesa.

Calculou-se então os números de Reynolds respectivos às diversas vazões e, pela fórmula universal de perda de carga os coeficientes de atrito, correlacionando-os na Figura 61. Verifica-se que o coeficiente de atrito variou com o número de Reynolds de uma forma bem definida, ajustou-se então uma curva de potência a estes dados.



**Figura 61** – Coeficiente de atrito: ajuste de uma curva de potência – Serra da Mesa.

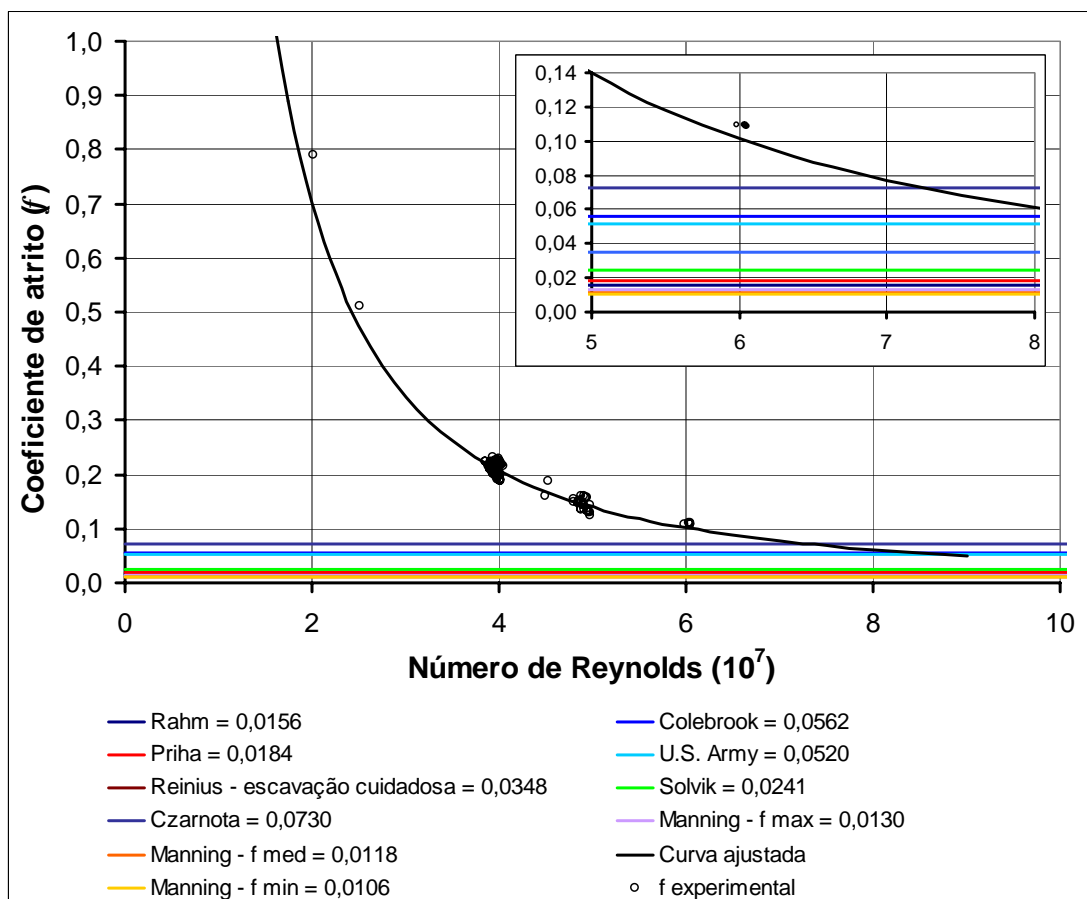
Segundo as informações fornecidas por MUNSON *et al.* (1997), verificou-se que o túnel da Usina de Serra da Mesa precisaria ter um comprimento entre 1280 m e 1535 m para que seu escoamento estivesse desenvolvido nas faixas de vazões registradas. No entanto, como este túnel tem 525 m de comprimento, o escoamento não se apresentou completamente desenvolvido em nenhuma situação observada.

A relação  $\frac{Re\sqrt{f}}{D/e}$  para os registros ficou entre 410000 e 480000, representando

que o escoamento nas situações medidas era turbulento hidraulicamente rugoso.

De acordo com as observações feitas por LIU & ZHU (2000), acredita-se que a variação do valor do coeficiente de atrito segundo o número de Reynolds nos registros de Serra da Mesa deve ocorrer, provavelmente, pelo não desenvolvimento do escoamento.

Como encontravam-se disponíveis os dados de construção do túnel de Serra da Mesa, com o detalhamento das seções transversais a cada 5 m, foi possível o cálculo empírico do coeficiente de atrito para este túnel por diversos métodos indicados no capítulo de Revisão Bibliográfica. A comparação dos coeficientes de atrito calculados e observados encontra-se apresentada na Figura 62. As recomendações da bibliografia para o coeficiente de atrito do túnel da UHE de Serra da Mesa levaram a valores compreendidos entre 0,0106 e 0,0730.

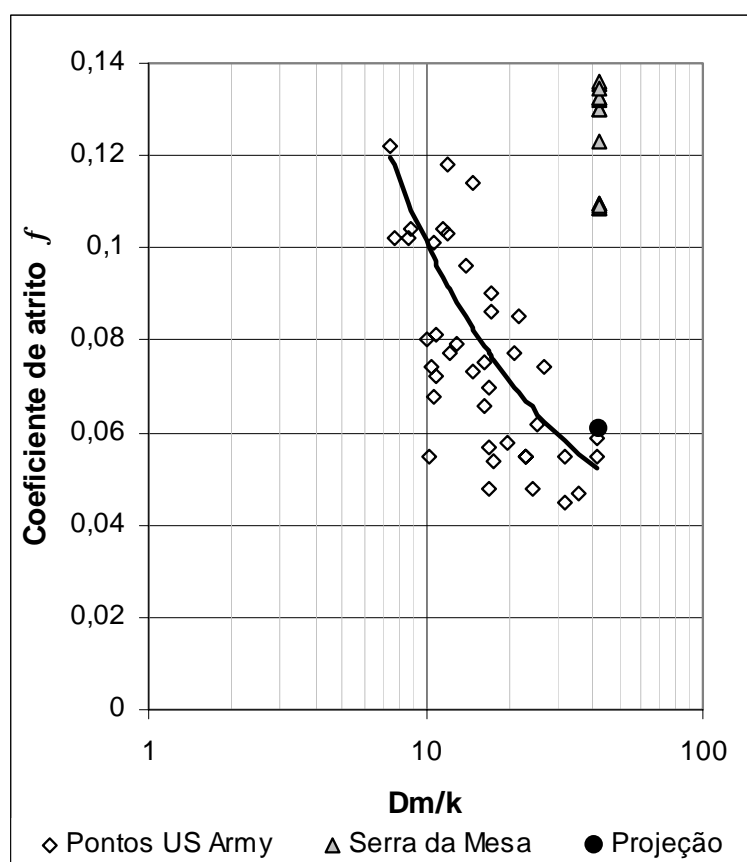


**Figura 62** – Comparação entre os coeficientes de atrito teóricos e os experimentais – Serra da Mesa.

Percebe-se que os valores de  $f$  observados variaram com o número de Reynolds ( $Re$ ) e que seus valores foram sempre superiores aos calculados para a faixa de

operação da usina. Fazendo uma projeção através da curva ajustada, os valores experimentais entrariam na faixa dos coeficientes de atrito empírico a partir de um número de Reynolds da ordem de  $7,0 \times 10^7$ .

Calculada a relação  $Dm/k$  (diâmetro/rugosidade) para o túnel da usina de Serra da Mesa, pôde-se comparar, na Figura 63, os resultados obtidos com os dados utilizados e a equação ajustada pelo U.S. ARMY CORPS OF ENGINEERS (1973). No entanto, como o U.S. ARMY CORPS OF ENGINEERS não considerou a variação do coeficiente de atrito segundo o número de Reynolds, os dados encontrados para Serra da Mesa tiveram que ser todos dispostos sobre a linha da mesma relação  $Dm/k$ .



**Figura 63** – Comparação entre os coeficientes de atrito de U.S. ARMY CORPS OF ENGINEERS e os experimentais – Serra da Mesa.

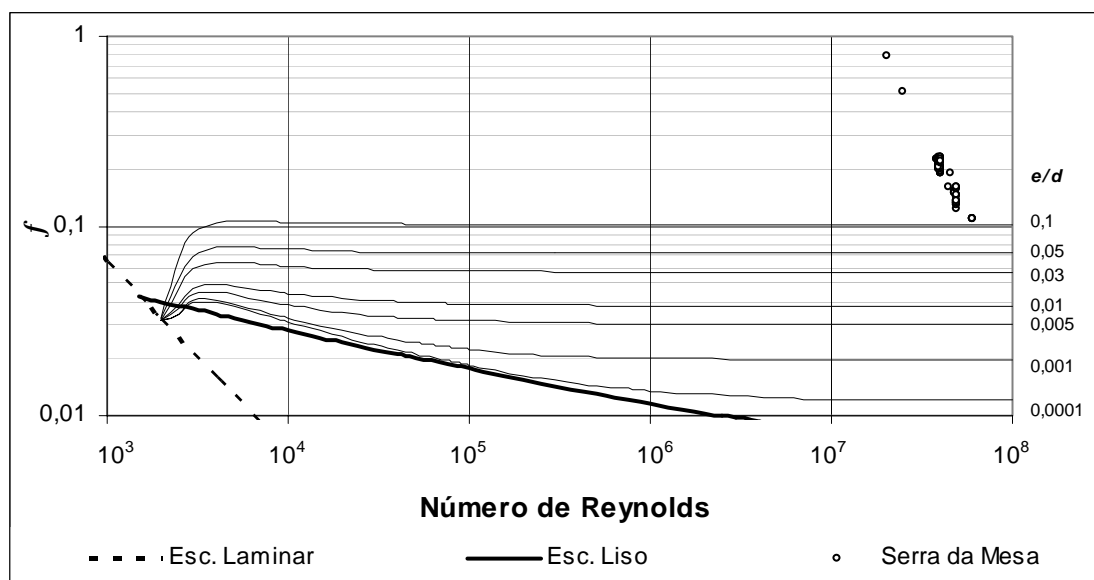
Os coeficientes de atrito observados chegaram aproximadamente até 0,8, mas o gráfico da Figura 63 apresenta limite superior igual a 0,14 para facilitar a visualização dos dados e curva do U.S. ARMY CORPS OF ENGINEERS (1973) frente aos dados do túnel de Serra da Mesa para seus maiores números de Reynolds.

Realizou-se uma extrapolação da curva ajustada na Figura 61 para calcular o coeficiente de atrito correspondente ao número de Reynolds de máxima vazão das turbinas, da ordem de  $1270 \text{ m}^3/\text{s}$ . Este número de Reynolds (aproximadamente  $8,0 \times 10^7$ ) encontra-se na região da equação, ajustada aos dados para o cálculo do valor de  $f$ , que



tende a estabilização (Figura 61). Percebe-se que o valor obtido desta extrapolação, denominado “projeção” na Figura 63, ajustou-se bem aos dados de U.S. ARMY CORPS OF ENGINEERS (1973).

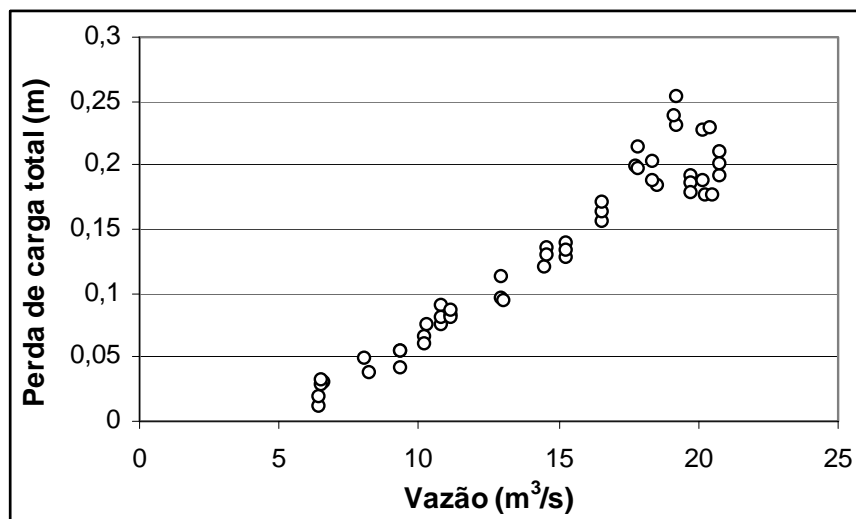
Como o Diagrama de Moody é um grande referencial no estudo do coeficiente de atrito, na Figura 64, apresenta-se a comparação entre este diagrama e os dados encontrados para o coeficiente de atrito do túnel de Serra da Mesa. Verifica-se que os pontos se encontram na região do escoamento turbulento, porém que não se ajustam à forma proposta pelo diagrama, o que era de se esperar, pois, na estrutura estudada, a forma da seção transversal é diferente da considerada na elaboração do diagrama e, nas situações de medição, o escoamento não se encontrava completamente desenvolvido.



**Figura 64** – Comparação entre os coeficientes de atrito experimentais e o Diagrama de Moody – Serra da Mesa.

### 5.3.2 Usina Hidrelétrica de Salto Forqueta

A partir das medições realizadas na Usina de Salto Forqueta, encontravam-se disponíveis os dados de nível na chaminé e tomada d'água para diversas condições de operação, dentro da faixa de funcionamento das turbinas da usina. Assim, para cada condição de operação determinou-se uma vazão, de forma gráfica, e uma perda de carga total, através da diferença de nível entre a tomada d'água e a chaminé de equilíbrio. A Figura 65 apresenta o desenvolvimento desta perda de carga total frente a variação de vazão.



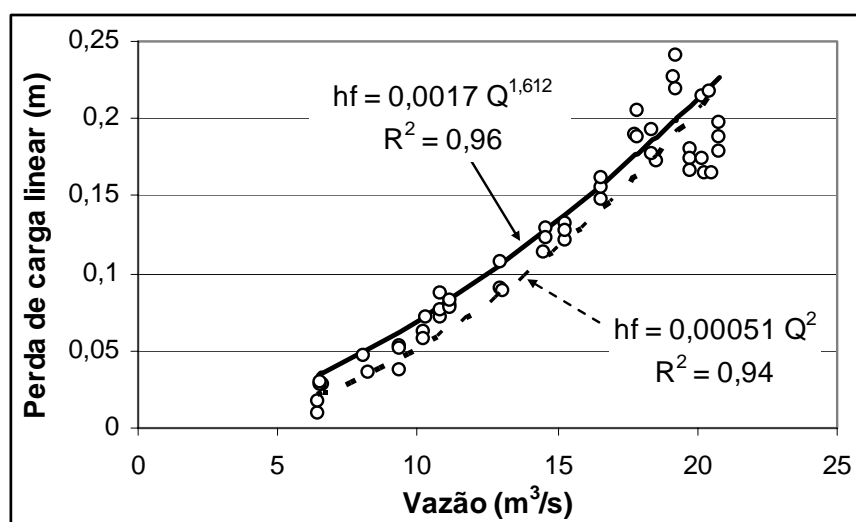
**Figura 65** – Perda de carga total versus vazão – Salto Forqueta.

Pode-se perceber pela Figura 65, que com o aumento da vazão ocorre o acréscimo do valor da perda de carga, ficando os valores registrados entre 0 m e 0,252 m.

Os pontos medidos para as maiores vazões, em torno de 20 m³/s, apresentam maior dispersão. Nestes casos, o nível d'água na chaminé encontrava-se bastante instável, o que afetou as medições, aumentando seus erros.

Entre os pontos de medição (tomada d'água e chaminé de equilíbrio), a única singularidade existente para o cálculo da perda de carga localizada, foi a saída do túnel.

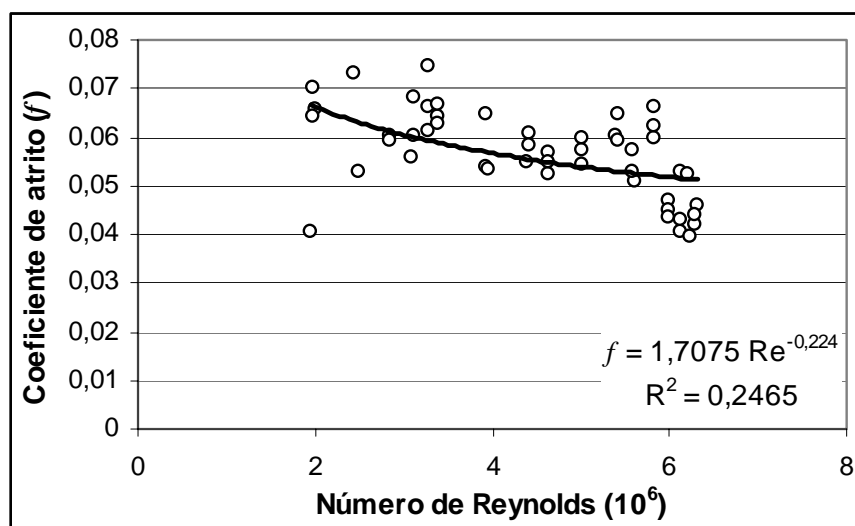
A Figura 66 apresenta os valores calculados de perda de carga linear referentes as diversas vazões e o ajuste de uma curva de potência a estes dados.



**Figura 66** – Ajuste de curva de potência aos dados de perda de carga linear – Salto Forqueta.

A curva de potência se ajustou bem aos dados, mas a relação encontrada não foi com  $Q^2$ . Foi então forçado o ajuste de uma equação que respeitasse esta relação, sua curva encontra-se desenhada em linha pontilhada na Figura 66.

Realizou-se o cálculo dos coeficientes de atrito respectivos a cada vazão. A correlação entre estes coeficientes e seus números de Reynolds correspondentes encontra-se na Figura 67.



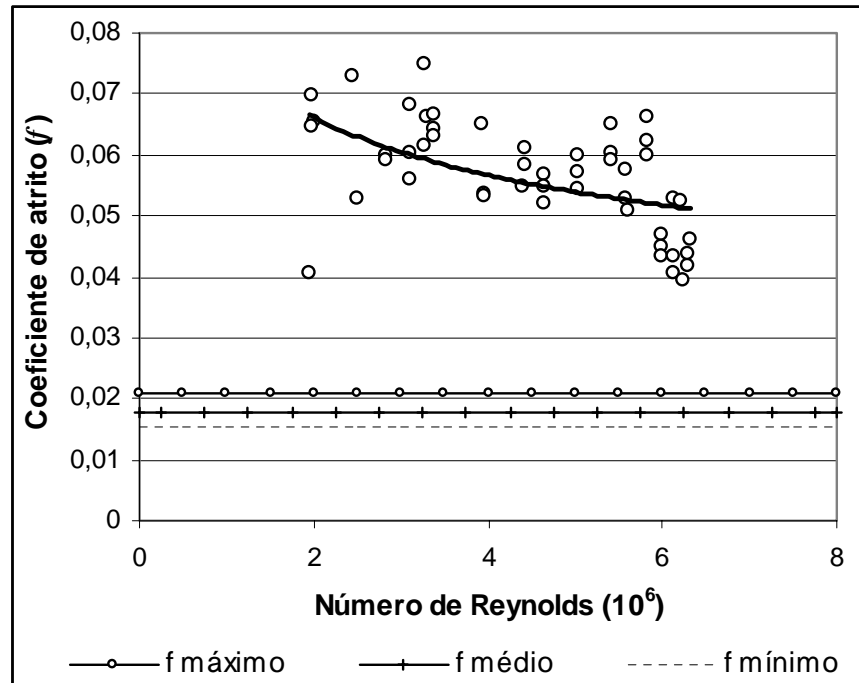
**Figura 67** – Coeficiente de atrito versus número de Reynolds – Salto Forqueta.

Verifica-se que o coeficiente de atrito apresentou uma certa variação com o número de Reynolds.

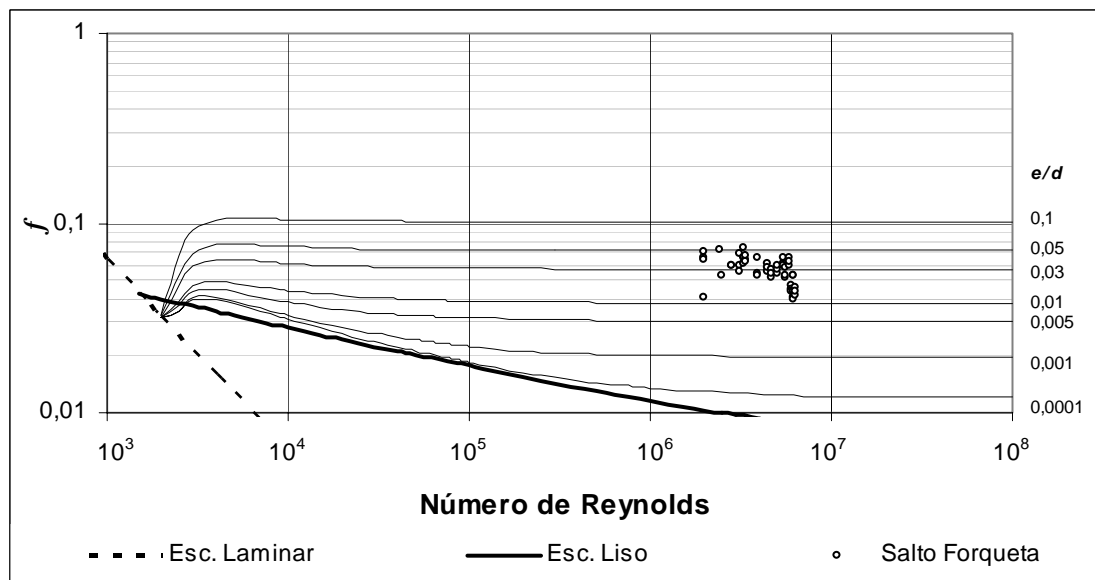
Para este túnel, não se dispunha dos dados necessários ao cálculo da rugosidade e por isso não foi possível a verificação do tipo de escoamento, no entanto, pelo elevado valor do  $Re$ , acredita-se que o escoamento seja turbulento hidraulicamente rugoso. Verificou-se que para o desenvolvimento do escoamento, nas faixas de vazões medidas, seria necessário comprimento entre 190 m e 230 m. Como o túnel da Usina de salto Forqueta possui 127 m, o escoamento durante as medições não se encontrava plenamente desenvolvido, o que provavelmente justifique, junto com os possíveis erros de medição, a ligeira variação do coeficiente de atrito com o número de Reynolds. Poderia ser estipulado um valor médio para o  $f$  da ordem de 0,055.

Como as informações sobre este túnel são limitadas, o único método empírico aplicado foi o sugerido por PENNINGTON (1998). A comparação dos coeficientes de atrito teóricos e experimentais encontra-se apresentada na Figura 68, onde observa-se que os valores de  $f$  experimentais apresentaram valores maiores que os sugeridos por PENNINGTON (1998).

Comparando os resultados obtidos com o Diagrama de Moody, na Figura 69, observa-se que os pontos se encontram na região do escoamento turbulento, porém que não se ajustam à linearidade proposta pelo diagrama para esta zona.



**Figura 68** – Comparação entre os coeficientes de atrito experimentais e teóricos sugeridos por PENNINGTON (1998) – Salto Forqueta.

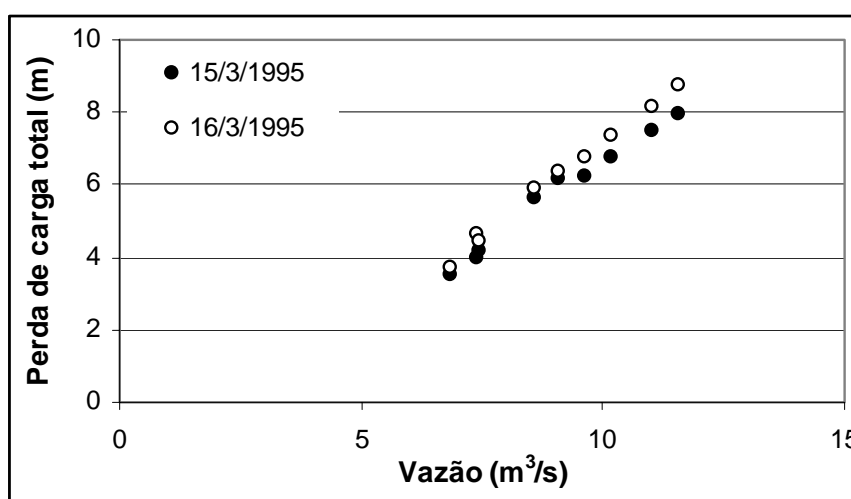


**Figura 69** – Comparação entre os coeficientes de atrito experimentais e o Diagrama de Moody – Salto Forqueta.

### 5.3.3 Usina Hidrelétrica Bugres

Os dados fornecidos pela CEEE apresentavam a vazão no túnel em  $\text{m}^3/\text{s}$ , o nível no reservatório em m e a pressão no manômetro em  $\text{kg}/\text{cm}^2$ , que foi transformada em mca.

A Figura 70 apresenta a perda de carga total entre o reservatório e o manômetro para cada vazão registrada. Observa-se que ocorre o acréscimo do valor da perda de carga com o aumento da vazão, estando os valores registrados entre 3,49 m e 8,74 m. Este túnel é o que apresenta os maiores valores de perda de carga, o que é consequência do comprimento do túnel, que é muito maior comparado aos outros túneis estudados neste trabalho.



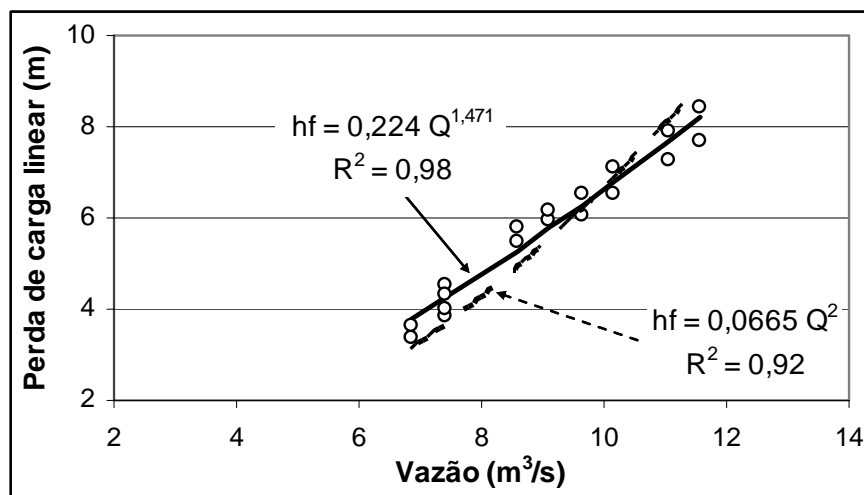
**Figura 70** – Perda de carga total versus vazão – Bugres.

Os dados na usina de Bugres foram medidos em dois dias consecutivos, sendo o segundo dia uma repetição do primeiro. Percebe-se que os dados aparentam estar dispostos em duas linhas, referindo-se cada uma delas a um dos dias.

Entre os pontos de medição (tomada d'água e manômetro), existem o sistema de gradeamento e a entrada do túnel como singularidades onde foram determinadas as perdas de carga localizadas. Neste caso, utilizou-se a mesma metodologia e coeficientes aplicados no projeto da usina. Os valores calculados de perda de carga linear referentes as diversas vazões encontram-se apresentados na Figura 71. A estes dados ajustou-se uma curva de potência que representou bastante bem a relação entre perda de carga linear e vazão, porém, não da forma verificada por RAHM (1958).

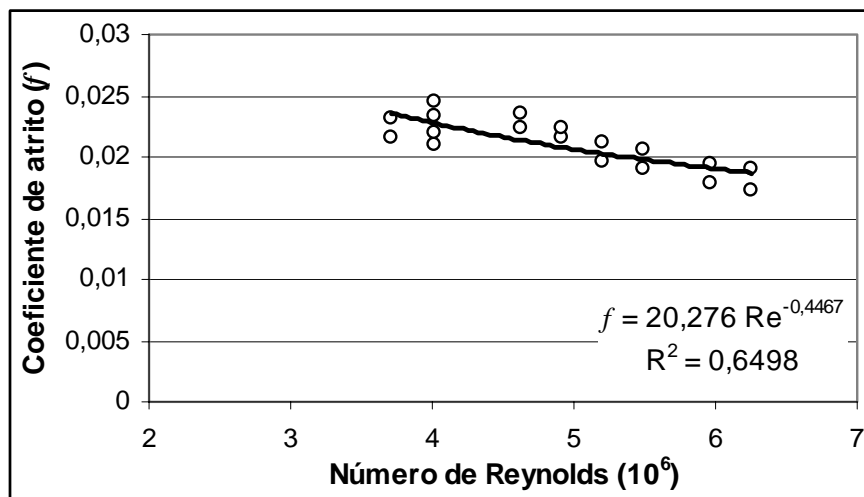
Forçando o ajuste de uma curva de potência que tenha  $Q^2$ , aos dados de perda de carga linear, o coeficiente de correlação teve seu valor reduzido e os pontos

experimentais, aparentemente, oscilariam em torno desta curva, que encontra-se em linha pontilhada na Figura 71.



**Figura 71** – Ajuste de curva de potência aos dados de perda de carga linear – Bugres.

Calculou-se, pela equação universal de perda de carga, os coeficientes de atrito para cada situação medida, apresentando na Figura 72 a correlação entre estes coeficientes e seus respectivos números de Reynolds.

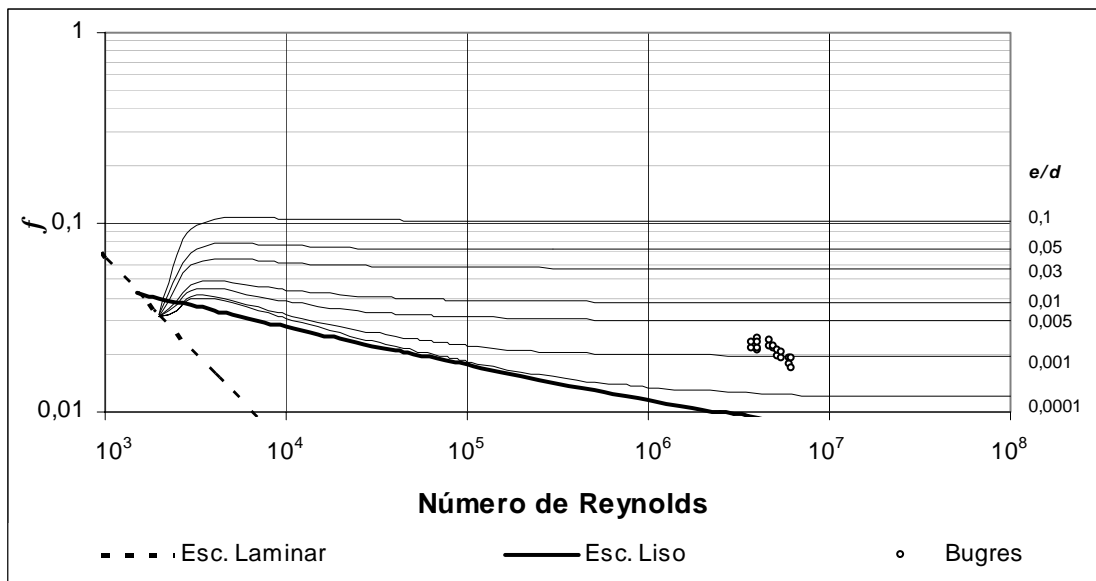


**Figura 72** – Coeficiente de atrito versus número de Reynolds – Bugres.

A disposição dos dados em duas linhas também é visível nesta análise, sendo que ambas possuem o mesmo comportamento, dando a impressão de que vão oscilar em torno do valor de  $f = 0,021$ . No entanto a equação ajustada apresenta uma tendência inversa de crescimento do  $f$  em relação ao número de Reynolds.

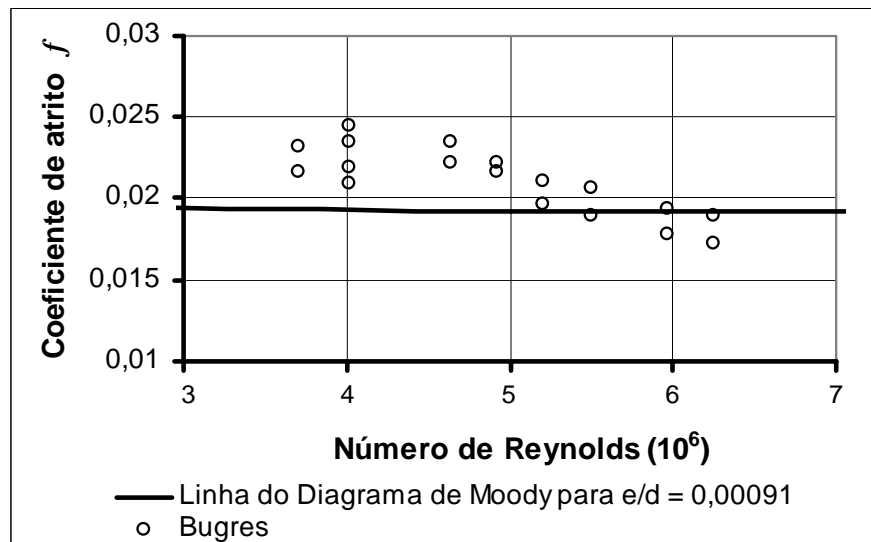
Neste túnel, verificou-se que o escoamento era turbulento hidráulicamente rugoso e encontrava-se plenamente desenvolvido.

Sendo este túnel de seção transversal circular e revestido, cabe sua comparação com o Diagrama de Moody como apresenta a Figura 73.



**Figura 73** – Comparação entre os coeficientes de atrito experimentais e o Diagrama de Moody – Bugres.

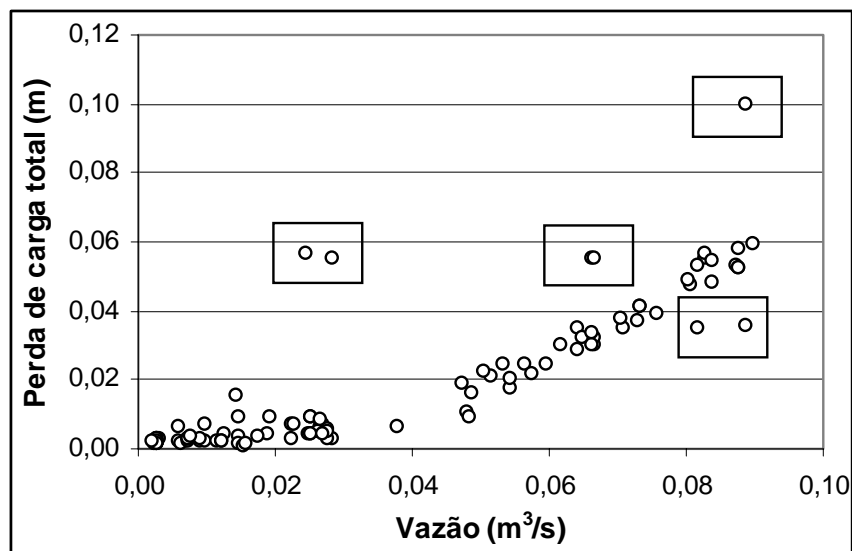
O túnel da usina de Bugres apresenta uma relação  $e/d$  (rugosidade/diâmetro) de aproximadamente 0,00091 (rugosidade do concreto obtida de NETTO *et al.* 1998) e seus pontos passaram sobre esta faixa no Diagrama de Moody, como mostra o detalhe da Figura 74.



**Figura 74** – Detalhe da comparação entre os coeficientes de atrito experimentais e o Diagrama de Moody – Bugres.

### 5.3.4 Estrutura do LAHE

Das aquisições de dados realizadas na estrutura do LAHE, calculou-se a perda de carga total entre a chaminé de equilíbrio e o canal de fuga pela diferença de nível entre eles, para cada vazão registrada. A Figura 75 apresenta a correlação entre a perda de carga total e a vazão.



**Figura 75** – Perda de carga total versus vazão – Estrutura do LAHE.

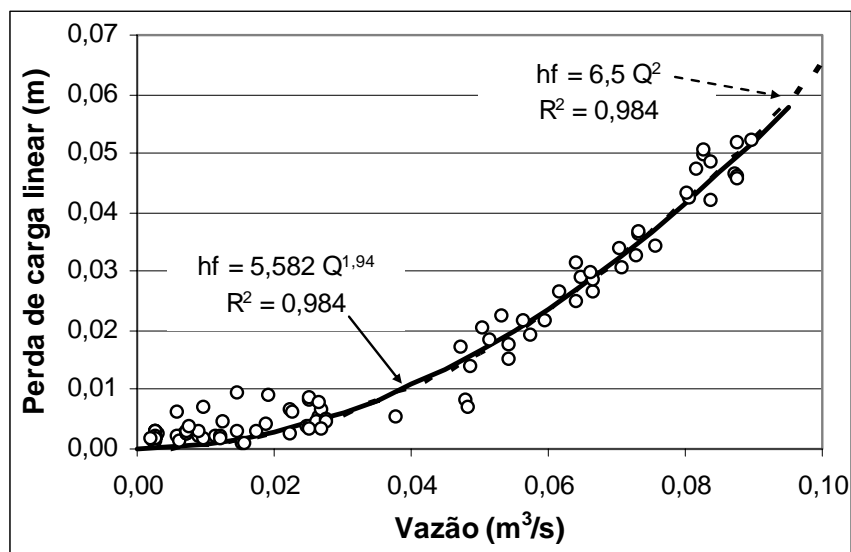
Os dados apresentaram um comportamento bastante tendencioso e pontos fora deste comportamento foram facilmente identificados, encontrando-se alguns destacados no gráfico. Os ensaios referentes a estes pontos tratavam-se de ensaios realizados em seqüência, significando que os dados teriam sido afetados pelo mesmo evento. Acredita-se que os dados destes ensaios teriam sido afetados pela formação de limo nas paredes dos piezômetros, pois estas seqüências de ensaios foram realizadas em períodos imediatamente anteriores à limpeza dos piezômetros. Desconsiderando estes pontos discrepantes a perda de carga total fica entre 0,0012 m e 0,06 m.

Como no caso da Usina de Serra da Mesa, entre os pontos de medição (chaminé de equilíbrio e canal de fuga), existem três pontos onde o cálculo da perda de carga localizada torna-se necessário: a saída da chaminé, curva de 62,5° e a saída do túnel. Como as estruturas são semelhantes geometricamente, as perdas de carga localizadas nos pontos de medição foram consideradas da mesma maneira já explicada no Item 5.3.1.

A Figura 76 apresenta os valores calculados de perda de carga linear referentes às diversas vazões. Percebe-se que os dados se ajustaram bem a uma equação de potência, sendo perceptível uma dispersão nos dados para as menores vazões, onde os valores se dispuseram acima da curva. Nota-se que as curvas da equação



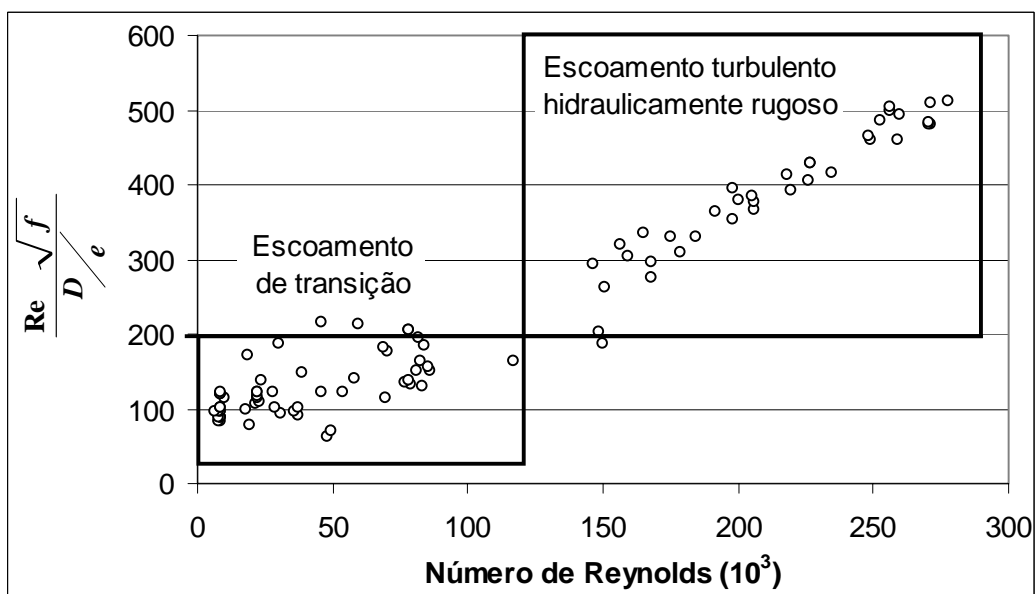
diretamente ajustada aos dados e da equação com o ajuste forçando a presença de  $Q^2$ , são praticamente coincidentes na faixa de vazões estudadas.



**Figura 76** – Perda de carga linear versus vazão – Estrutura do LAHE.

Verificou-se que o túnel da Estrutura do LAHE precisaria ter um comprimento entre 6,69 m e 12,52 m para que seu escoamento estivesse desenvolvido nas faixas de vazões registradas. Como o comprimento do túnel desta estrutura é de 10,5 m e a distância entre a saída da curva e o fim do túnel é de 8,3 m, pode-se dizer que o escoamento chegou a se desenvolver completamente em alguns ensaios.

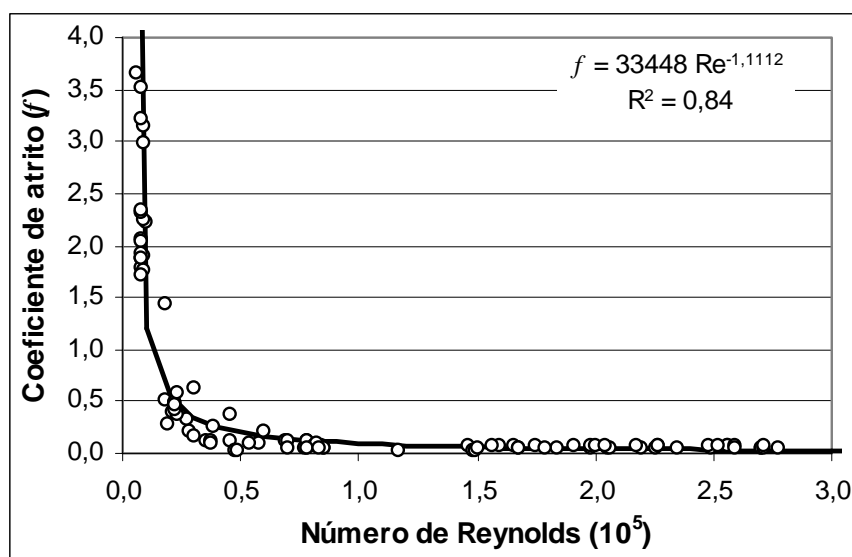
A relação  $\frac{Re \sqrt{f}}{D/e}$  para os registros encontra-se apresentada na Figura 77.



**Figura 77** – Tipo de escoamento – Estrutura do LAHE.

Sendo o limite inferior desta relação igual a 198 para o estabelecimento do escoamento turbulento hidraulicamente rugoso, percebem-se duas zonas na Figura 77, uma onde o escoamento encontra-se na transição e outra onde ele apresenta-se hidraulicamente rugoso, divididas aproximadamente pelo  $Re$  igual a  $1,2 \times 10^5$ .

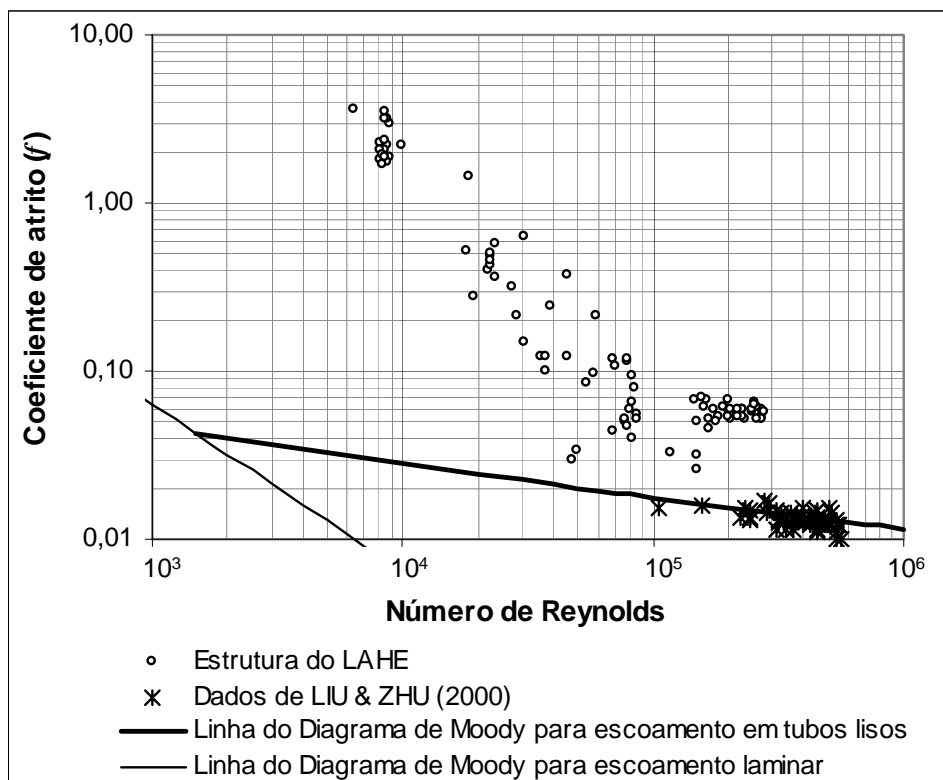
Realizou-se o cálculo dos coeficientes de atrito para cada vazão e, na Figura 78, apresenta-se a correlação entre estes coeficientes e seus respectivos números de Reynolds, onde pode ser visualizado que o coeficiente de atrito variou com o número de Reynolds, principalmente para  $Re$  menores que  $1,2 \times 10^5$ , sendo a maior dispersão encontrada no ponto de inflexão da curva.



**Figura 78** – Coeficiente de atrito versus número de Reynolds – Estrutura do LAHE.

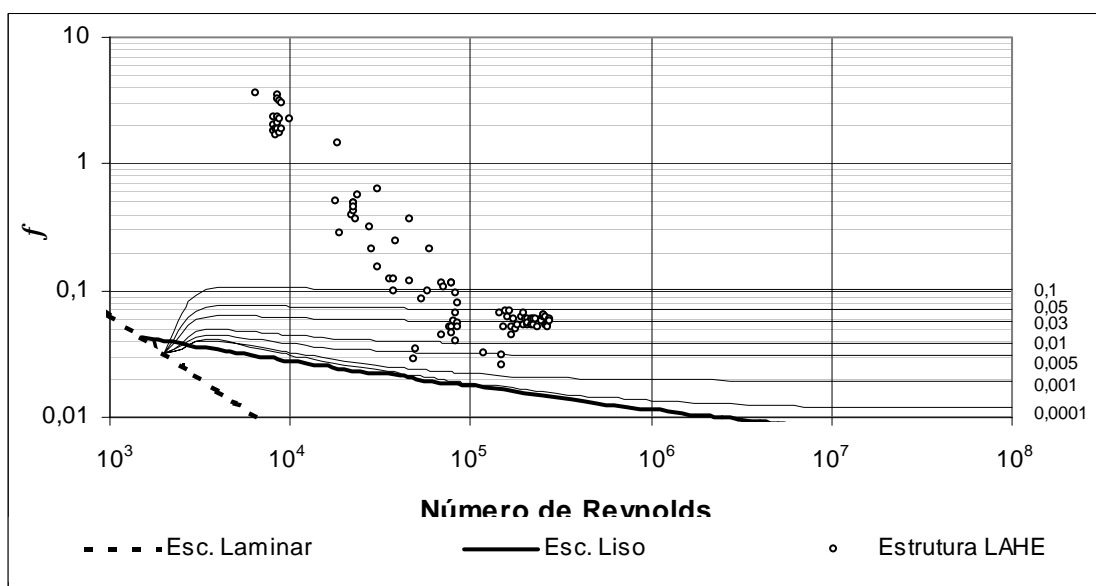
Desenhando o gráfico da Figura 78 em escala logarítmica e comparando os resultados aqui obtidos com os dados de LIU & ZHU (2000), como mostra a Figura 79, observa-se que os coeficientes de atrito obtidos para o túnel da Estrutura do LAHE, que possui rugosidade, apresentam valores mais elevados do que os coeficientes encontrados por LIU & ZHU, os quais foram encontrados para um túnel liso, algo bastante coerente.

Percebe-se, mais claramente, na escala logarítmica a divisão da zona de transição, onde o coeficiente de atrito varia com o número de Reynolds, e da zona onde o escoamento turbulento hidraulicamente rugoso, com o coeficiente de atrito apresentando um valor constante.



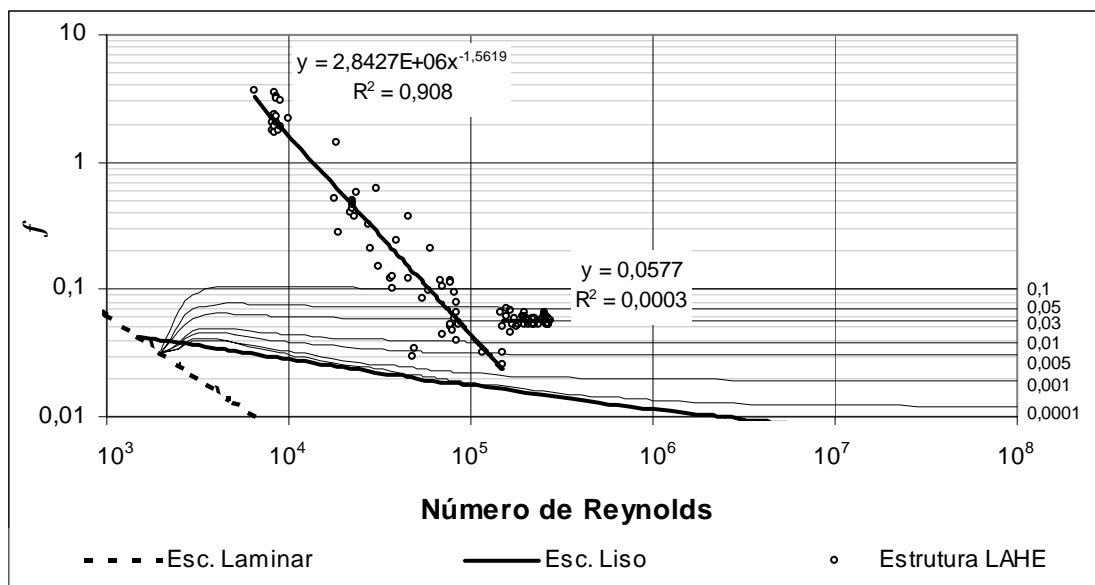
**Figura 79** – Comparação entre os coeficientes de atrito do túnel da Estrutura do LAHE e os encontrados no trabalho de LIU & ZHU (2000).

Comparando os resultados obtidos com o Diagrama de Moody, na Figura 80, observa-se que os pontos não se ajustam a proposição do diagrama, apresentando uma variação mais brusca do valor do coeficiente de atrito na transição, o que pode ser atribuído como efeito da geometria da seção transversal do túnel.



**Figura 80** – Comparação entre os coeficientes de atrito experimentais e o Diagrama de Moody – Estrutura do LAHE.

Pode-se ajustar equações distintas para as duas zonas identificadas, como mostra a Figura 81.



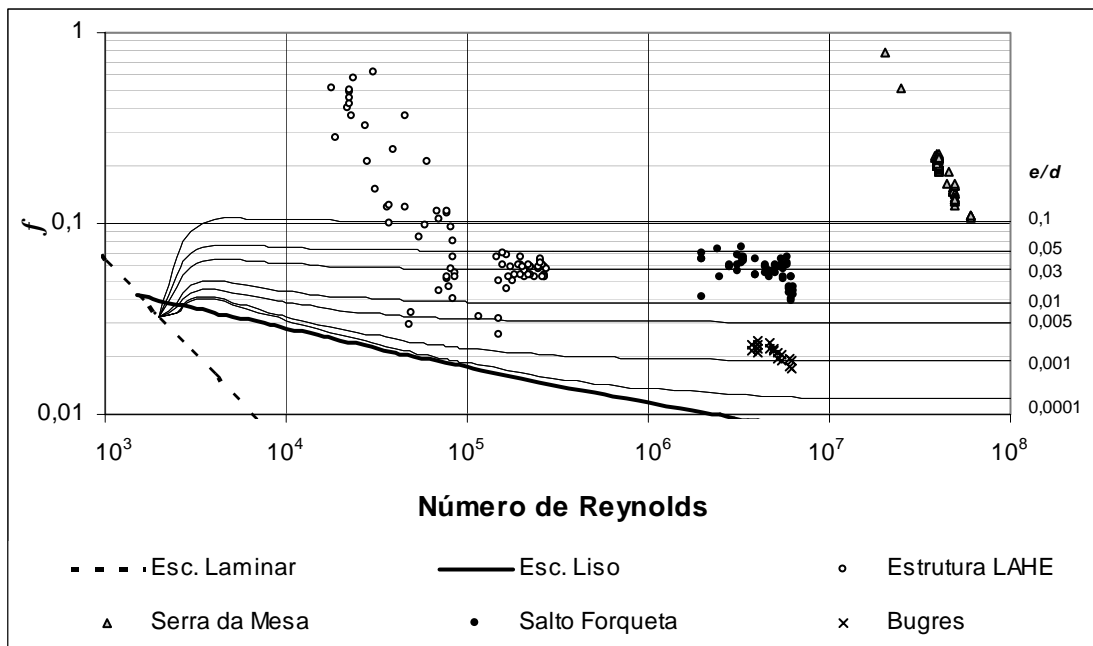
**Figura 81** – Ajuste de duas equações aos dados do coeficiente de atrito da Estrutura do LAHE.

Estudos mais aprofundados, principalmente sobre os campos de velocidade em túneis seção ferradura, são necessários para definir o real comportamento do coeficiente de atrito nesta estruturas.

### 5.3.5 Comparação entre os resultados dos túneis estudados

Apresenta-se a seguir, na Figura 82, uma comparação entre os resultados obtidos para o coeficiente de atrito de cada túnel estudado. No entanto, deve-se salientar as diferenças existentes entre os túneis são bastante grandes.

O escoamento no túnel de Serra da Mesa foi o que trabalhou com os maiores números de Reynolds. No túnel escavado em rocha desta usina, os valores obtidos para  $f$  foram maiores que os dos túneis de Bugres e Forqueta, o que era de se esperar, pois, o túnel de Serra da Mesa não possui acabamento ou revestimento, enquanto o túnel de Bugres é revestido com placas de concreto e o túnel de Forqueta com concreto projetado. Os dados do LAHE foram os que apresentaram a maior variação no valor de  $f$ . Também foi o escoamento neste túnel o que registrou os menores números de Reynolds.



**Figura 82** – Comparação entre os resultados obtidos para o coeficiente de atrito.

Percebe-se que, em escala logarítmica, os dados de Serra da Mesa apresentaram um comportamento semelhante aos dados da zona de transição do LAHE (Figura 77 e Figura 81), apesar da maior dispersão, registrando coeficientes de atritos iguais para números de Reynolds de ordens diferentes.

Esta semelhança chama atenção, pois estas estruturas possuem uma escala geométrica entre si e operam com semelhança de Froude, no entanto a dedução teórica de uma relação entre estes dados foi dificultada pela diferença entre os escoamentos que, na Usina, não era completamente desenvolvido, mas turbulento e hidráulicamente rugoso, e na Estrutura da LAHE era um escoamento desenvolvido em transição entre o laminar e o turbulento.

A partir das equações ajustadas para os dados de Serra da Mesa e para os dados da zona de transição do LAHE, foi encontrada a seguinte relação:

$$Re_{SM} = 3606 \times Re_{LAHE}^{0,8852}$$

Quanto às rugosidades:

$$\frac{k_{SM}}{k_{LAHE}} = 166,14 \text{ e } \frac{D_{SM}/k_{SM}}{D_{LAHE}/k_{LAHE}} = 0,324$$

## **5.4 Simulações Numéricas de Regimes Transientes**

### **5.4.1 Fase I - Simulação de regimes transientes ocorridos na Usina de Serra da Mesa**

Apresenta-se a comparação entre os dados experimentais das rejeições de carga ocorridas na UHE de Serra da Mesa em 1º de outubro de 2004 e 4 de julho de 1999 e os resultados numéricos de suas simulações nos programas CHAMINE, CHAMINE-IPH, ESTRANHE e ESTRANHE-IPH. Objetiva-se a escolha do(s) programa(s) mais adequado(s) ao seguimento da pesquisa.

#### Rejeição de 1º de outubro de 2004

Como esta rejeição foi completamente monitorada, os dados experimentais encontravam-se disponíveis para entrada nos programas e também para a verificação da qualidade dos dados resultantes das simulações. Cabe lembrar que durante esta rejeição, duas turbinas encontravam-se em operação, sendo provocada a rejeição de carga de apenas uma delas.

Na determinação da vazão total turbinada durante o transitório, para aplicação no programa CHAMINE-IPH, considerou-se a combinação entre a vazão da turbina na qual ocorre a rejeição e a vazão (oscilante) da turbina que permanece em operação, obtida a partir do diagrama de operação das turbinas.

No programa ESTRANHE-IPH pode-se simular a operação de um número variável de unidades, porém, não permitindo a operação diferenciada entre estas unidades. No programa ESTRANHE as unidades também devem seguir a mesma operação e seu número deve ser igual a 3. Assim as simulações da rejeição em questão nos programas ESTRANHE-IPH e ESTRANHE tiveram que ser aproximadas à realidade, entrando-se com a vazão inicial real e buscando atingir o nível de montante inicial e a vazão final iguais aos reais. Devido a estas limitações, não se podia esperar que os programas ESTRANHE-IPH e ESTRANHE conseguissem reproduzir os resultados reais com fidelidade.

No Quadro 6 encontram-se as características da simulação realizada no programa ESTRANHE-IPH e no Quadro 7 as da realizada no programa ESTRANHE.

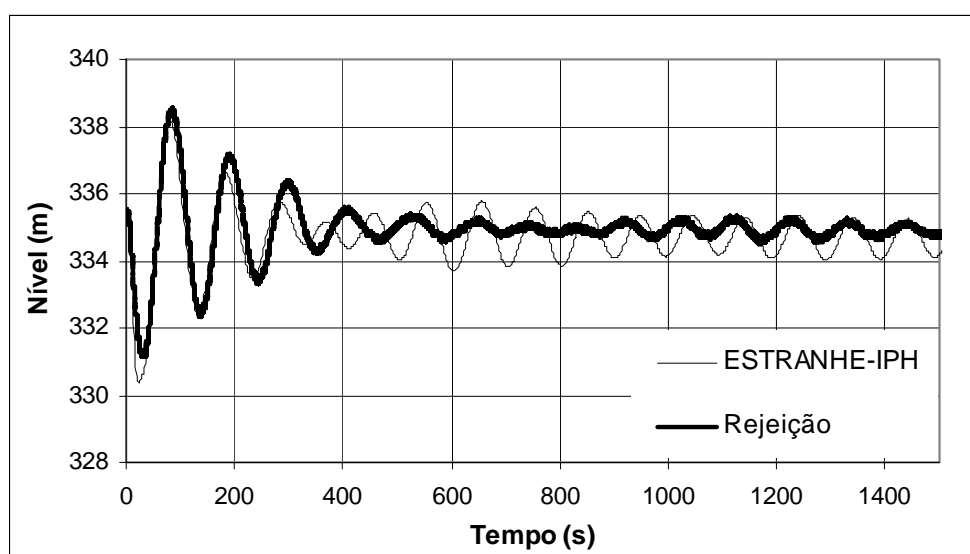
**Quadro 6 - Dados de entrada no programa ESTRANHE-IPH.**

|  |  |
|--|--|
| <b>Programa</b>                        | ESTRANHE-IPH                                 |
| <b>Vazão turbinada inicial</b>         | 360,7 m <sup>3</sup> /s                      |
| <b>Unidades em operação</b>            | 2  |
| <b>Potência inicial por unidade</b>    | 319,7 MW                                     |
| <b>Potência final por unidade</b>      | 131,0 MW                                     |
| <b>Nível no canal de fuga</b>          | Variável, conforme o real.                   |
| <b>Coefficiente de atrito do túnel</b> | Variável, aplicação da equação experimental. |

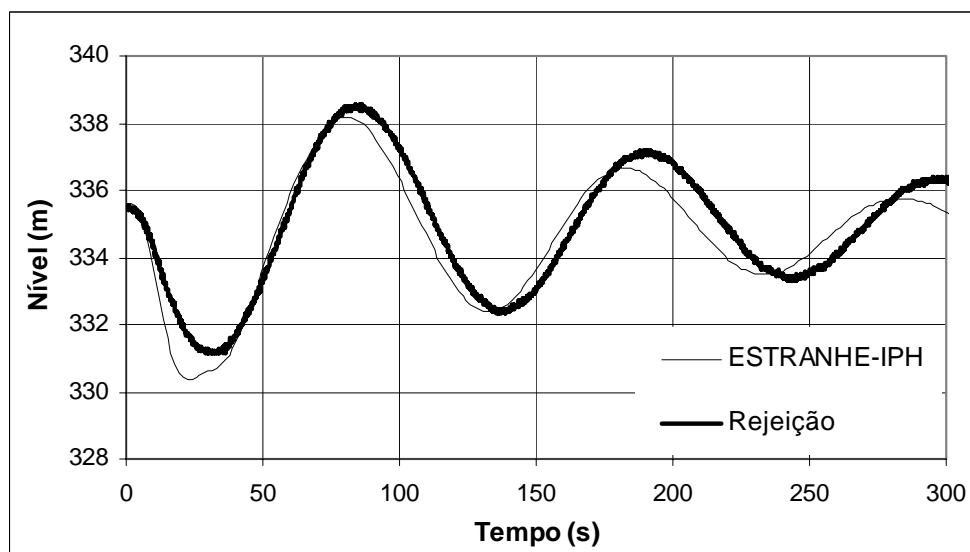
**Quadro 7 - Dados de entrada no programa ESTRANHE.**

|  |   |
|--|---|
| <b>Programa</b>                        | ESTRANHE  |
| <b>Vazão turbinada inicial</b>         | 240,5 m <sup>3</sup> /s   |
| <b>Unidades em operação</b>            | 3 (sem possibilidade de alteração)                              |
| <b>Potência inicial por unidade</b>    | 209,2 MW  |
| <b>Potência final por unidade</b>      | 78,2 MW   |
| <b>Nível no canal de fuga</b>          | Fixo e igual a 333,98 m   |
| <b>Coefficiente de atrito do túnel</b> | Fixo, calculado pela equação experimental para a vazão inicial. |

Comparando, na Figura 83, os dados experimentais com os resultados da simulação no programa ESTRANHE-IPH da rejeição de 1° de outubro de 2004, percebe-se que realmente não foi possível a reprodução fiel dos dados reais através deste programa, porém os resultados numéricos conseguiram ser bastante próximos. Um detalhe dos 300 primeiros segundos pode ser visto na Figura 84.



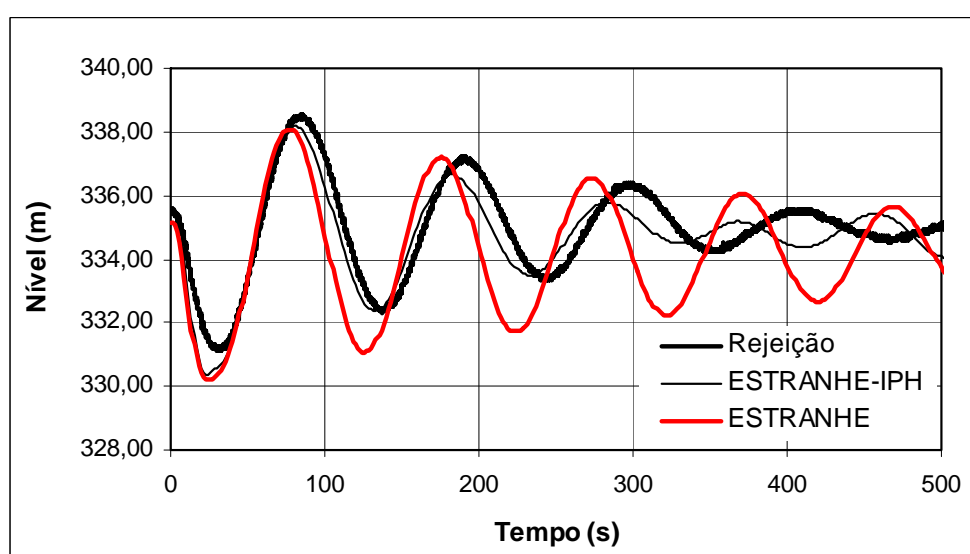
**Figura 83** – Comparação dos resultados do programa ESTRANHE-IPH com os dados experimentais da UHE de Serra da Mesa.



**Figura 84** – Detalhe da comparação dos resultados do programa ESTRANHE-IPH com os dados experimentais da UHE de Serra da Mesa.

Percebe-se que o nível inicial na chaminé de equilíbrio coincide com o real, o que significa que as perdas de carga e a vazão inicial consideradas no programa correspondem ou se aproximam bastante das reais. Nota-se ainda que o primeiro mínimo foi superestimado em 0,70 m e o primeiro máximo não foi atingido por 0,10 m, os períodos também não correspondem aos experimentais, porém, durante a fase transiente, as considerações do programa não reproduzem as condições reais (como já discutido), o que pode justificar as diferenças obtidas.

Pode-se ainda comparar os resultados do programa ESTRANHE-IPH com os resultados da simulação desta rejeição de carga no programa ESTRANHE, como mostra a Figura 85.



**Figura 85** – Comparação dos resultados do programa ESTRANHE e ESTRANHE-IPH com os dados experimentais da UHE de Serra da Mesa.



Pela Figura 85 percebe-se que o programa ESTRANHE-IPH apresenta uma maior semelhança com os dados experimentais que o programa original, o que era de se esperar, pois o ESTRANHE-IPH utiliza um volume maior de informações experimentais.

Quanto aos programas CHAMINE-IPH e CHAMINE, as simulações da rejeição de 1º de outubro de 2004 aplicaram as características apresentadas nos Quadros 8 e 9, respectivamente.

**Quadro 8** - Dados de entrada no programa CHAMINE-IPH.

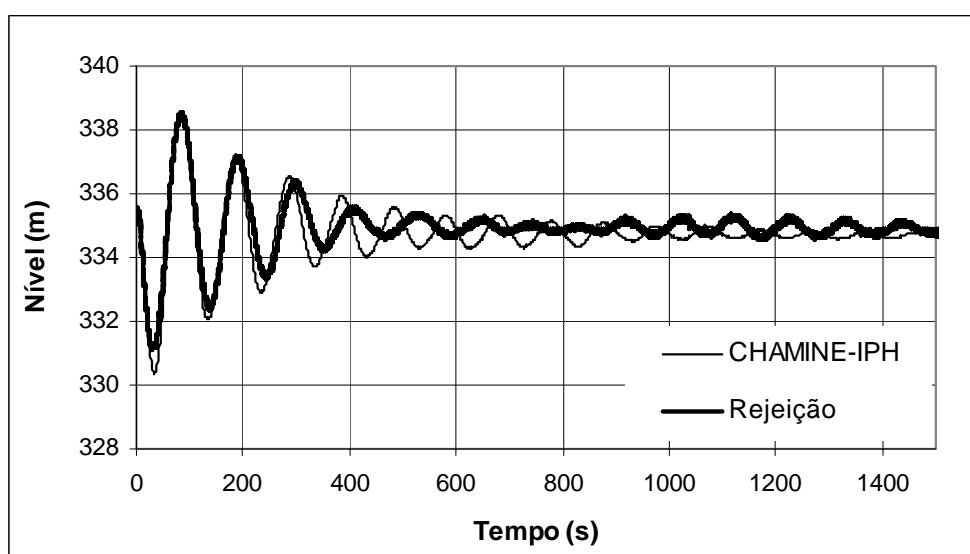
|  |  |
|--|--|
| <b>Programa</b>                        | CHAMINE-IPH                                  |
| <b>Vazão turbinada</b>                 | Variável, baseada nos dados reais            |
| <b>Nível no canal de fuga</b>          | Variável, conforme o real.                   |
| <b>Coefficiente de atrito do túnel</b> | Variável, aplicação da equação experimental. |

**Quadro 9** - Dados de entrada no programa CHAMINE.

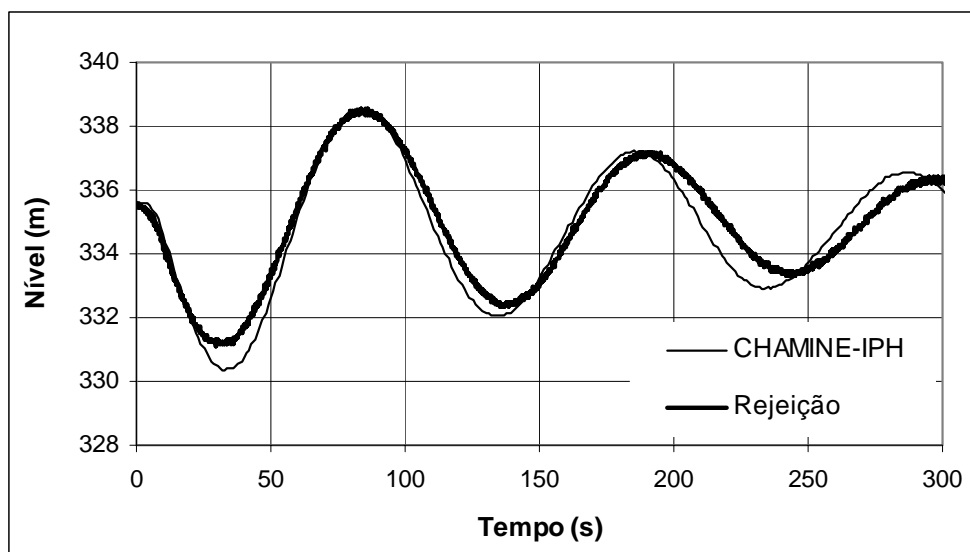
|   |   |
|---|---|
| <b>Programa</b>                             | CHAMINE   |
| <b>Vazão turbinada</b>                      | Variando de 721,4 m <sup>3</sup> /s a 317,4 m <sup>3</sup> /s em 26 segundos. |
| <b>Nível no canal de fuga</b>               | t = 0 s - Nj=333,98 m<br>t = 585 s - Nj=333,4 m                               |
| <b>Coefficiente de atrito do túnel</b>      | Não é considerado neste programa  |
| <b>Coefficiente de perda local no túnel</b> | 5,0*  |

\*ajustado dos dados experimentais.

Comparando, na Figura 86, os dados experimentais com os resultados da simulação no programa CHAMINE-IPH da rejeição de 1º de outubro de 2004, percebe-se que a reprodução não foi fiel aos dados reais, porém os resultados numéricos se aproximam bastante destes. Um detalhe dos 300 primeiros segundos pode ser visto na Figura 87.



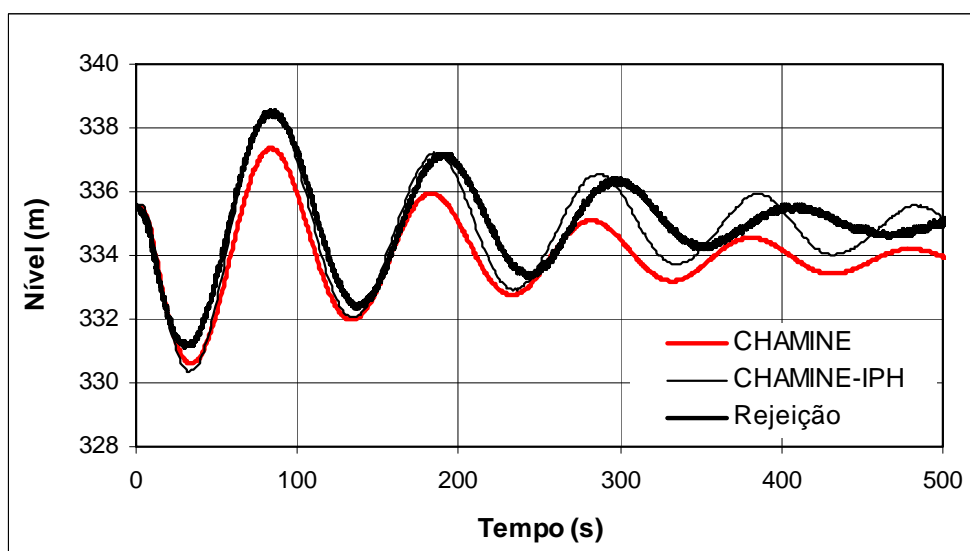
**Figura 86** – Comparação dos resultados do programa CHAMINE-IPH com os dados experimentais da UHE de Serra da Mesa.



**Figura 87** – Detalhe da comparação dos resultados do programa CHAMINE-IPH com os dados experimentais da UHE de Serra da Mesa.

Pelo detalhe da Figura 87, percebe-se que o nível inicial na chaminé de equilíbrio coincide com o real, significando que as considerações feitas sobre as perdas de carga e a vazão inicial são bastante próximas das reais. Nota-se ainda que o primeiro mínimo foi superestimado em 0,80 m. Quanto aos máximos, o programa foi capaz de fazer uma previsão bastante boa e os períodos, após a primeira oscilação, apresentam uma pequena defasagem.

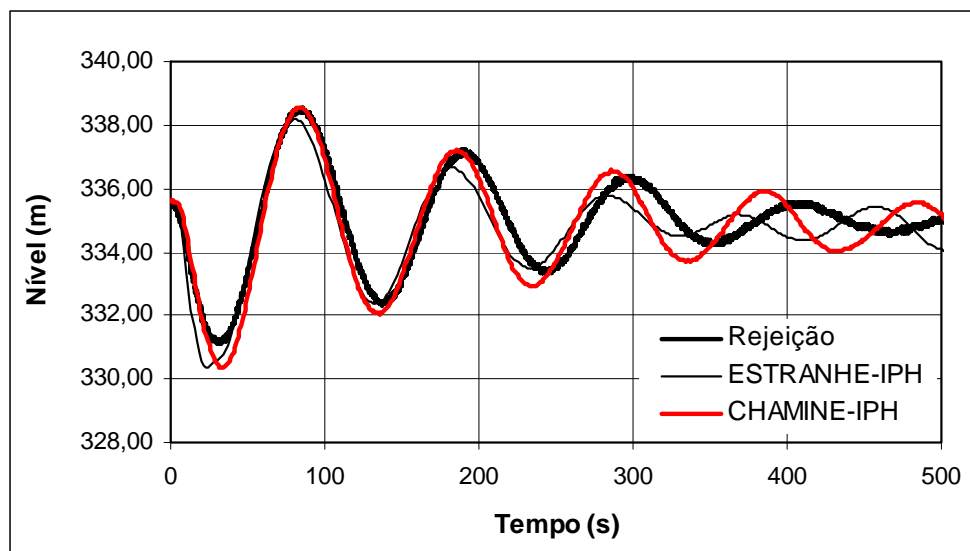
Na Figura 88 compara-se os resultados das simulações feitas nos programas CHAMINE-IPH e CHAMINE com os dados experimentais.



**Figura 88** – Comparação dos resultados do programa CHAMINE e CHAMINE-IPH com os dados experimentais da UHE de Serra da Mesa.

Observando a Figura 88, percebe-se que o programa CHAMINE-IPH fornece resultados mais parecidos com os dados experimentais do que o programa original, o que se justifica pela utilização de um volume maior de informações experimentais no CHAMINE-IPH.

Na Figura 89 visualiza-se a comparação com os dados experimentais dos resultados dos programas CHAMINE-IPH e ESTRANHE-IPH.



**Figura 89** – Comparação dos resultados dos programas CHAMINE-IPH e ESTRANHE-IPH com os dados experimentais da UHE de Serra da Mesa.

#### Rejeição de 4 de julho de 1999

Nesta rejeição de carga, a Usina Hidrelétrica de Serra da Mesa operava com potência de 1180 MW, valor muito próximo do referente a máxima potência instalada. Foi provocada a rejeição de carga total das três turbinas.

Como o sistema de aquisição de dados ainda não havia sido instalado, o registro dos dados foi feito de forma manual, assim, poucos dados experimentais encontravam-se disponíveis para entrada nos programas.

Na determinação da vazão turbinada foram utilizadas simulações no programa ESTRANHE-IPH, buscando, de forma iterativa, o ajuste com os dados conhecidos.

No Quadro 10 encontram-se as características adotadas para a simulação final no programa ESTRANHE-IPH e no Quadro 11 as da realizada no programa ESTRANHE.

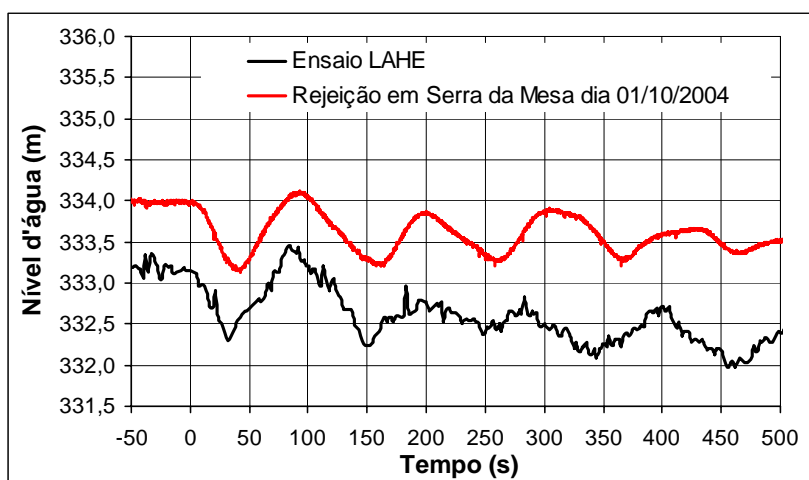
**Quadro 10** - Dados de entrada no programa ESTRANHE-IPH.

|  |  |
|--|--|
| <b>Programa</b>                        | ESTRANHE-IPH   |
| <b>Vazão turbinada inicial</b>         | 415 m <sup>3</sup> /s  |
| <b>Unidades em operação</b>            | 3  |
| <b>Potência inicial por unidade</b>    | 393,3 MW   |
| <b>Potência final por unidade</b>      | 0 MW   |
| <b>Nível no canal de fuga</b>          | Variável, conforme um ensaio de vazão equivalente realizado na estrutura do LAHE.* |
| <b>Coefficiente de atrito do túnel</b> | Variável, aplicação da equação experimental.                                       |

**Quadro 11** - Dados de entrada no programa ESTRANHE.

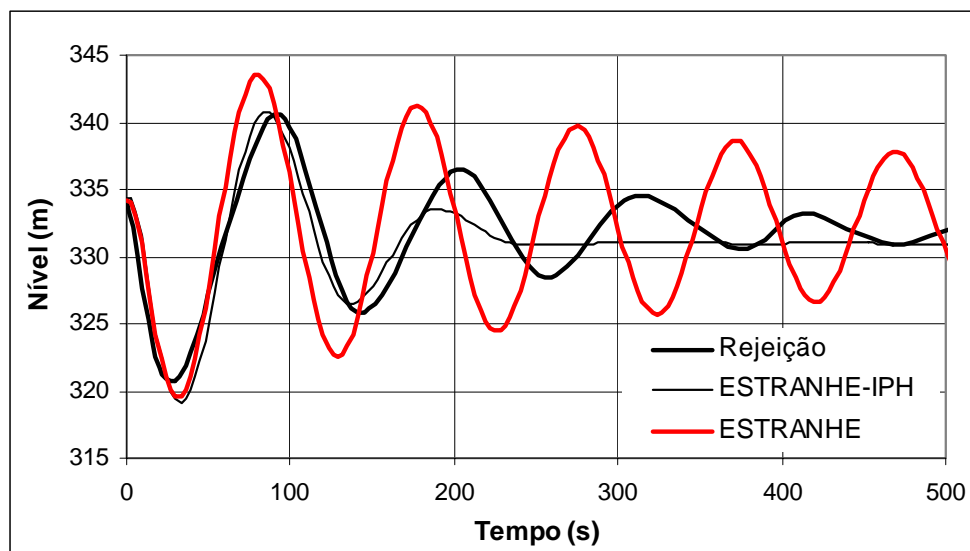
|  |   |
|--|---|
| <b>Programa</b>                        | ESTRANHE  |
| <b>Vazão turbinada inicial</b>         | 415 m <sup>3</sup> /s   |
| <b>Unidades em operação</b>            | 3   |
| <b>Potência inicial por unidade</b>    | 393,3 MW  |
| <b>Potência final por unidade</b>      | 0 MW  |
| <b>Nível no canal de fuga</b>          | Fixo e igual ao inicial aplicado no ESTRANHE-IPH                |
| <b>Coefficiente de atrito do túnel</b> | Fixo, calculado pela equação experimental para a vazão inicial. |

\* Aplicou-se os dados de nível d'água no canal de fuga de um ensaio realizado no LAHE, com vazão equivalente a estimada para esta rejeição, corrigindo-se a escala geométrica e a escala de tempo pela semelhança de Froude. Sabe-se que não ocorre a reprodução fiel de fenômenos da Usina de Serra da Mesa na Estrutura do laboratório. No entanto, a comparação do registro do comportamento do nível no canal de fuga da rejeição de 01/10/2004 com o de um ensaio similar realizado no LAHE mostrou alguma semelhança entre os resultados, principalmente para a primeira oscilação (ver Figura 90). Esta escolha leva a erros na simulação, mas acredita-se que eles sejam menores do que a consideração de um nível fixo.



**Figura 90** – Comparação do comportamento do nível d'água no canal de fuga entre a rejeição de carga do dia 1º de outubro de 2004 em Serra da Mesa e um ensaio similar na estrutura do LAHE.

Comparando os resultados numéricos com os experimentais na Figura 91, percebe-se que o programa ESTRANHE-IPH apresentou um amortecimento muito rápido das oscilações, no entanto conseguiu representar bastante bem a primeira oscilação, a qual seria mais importante em uma situação de projeto. O modelo ESTRANHE apresentou amplitudes maiores, principalmente pelo fato de não considerar a variação do coeficiente de atrito com a vazão, sendo seus resultados considerados a favor da segurança para o caso de projeto.



**Figura 91** – Comparação dos resultados do programa ESTRANHE e ESTRANHE-IPH com os dados experimentais da UHE de Serra da Mesa.

Quanto aos programas CHAMINE-IPH e CHAMINE, as simulações da rejeição de 4 de julho de 1999 aplicaram as características apresentadas nos Quadros 12 e 13, respectivamente.

**Quadro 12** - Dados de entrada no programa CHAMINE-IPH.

| Programa                        | CHAMINE-IPH   |
|---------------------------------|---|
| Vazão turbinada                 | Variável, baseada nos dados do programa ESTRANHE-IPH*                             |
| Nível no canal de fuga          | Variável, conforme um ensaio de vazão equivalente realizado na estrutura do LAHE. |
| Coefficiente de atrito do túnel | Variável, aplicação da equação experimental.                                      |

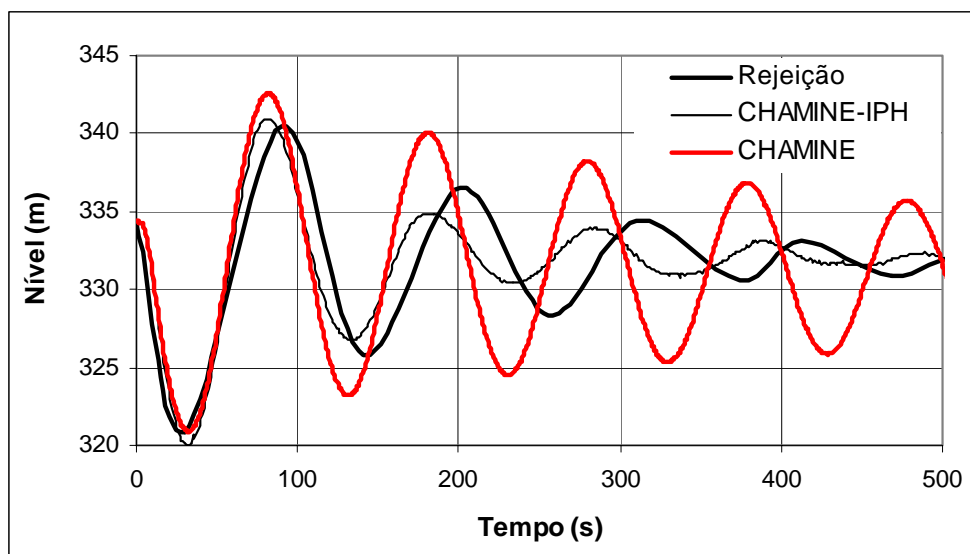
**Quadro 13** - Dados de entrada no programa CHAMINE.

| Programa                             | CHAMINE   |
|--------------------------------------|---|
| Vazão turbinada                      | Variável, baseada nos dados do programa ESTRANHE-IPH* |
| Nível no canal de fuga               | t = 0 s - Nj=332,41 m<br>t = 600 s - Nj=330,33 m      |
| Coefficiente de atrito do túnel      | Não é considerado neste programa                      |
| Coefficiente de perda local no túnel | 2,1**   |

\* A vazão final obtida através do ESTRANHE-IPH foi igual a zero, o que não se verifica na realidade, pois as turbinas não vedam completamente no fechamento. Assim, foi arbitrada uma vazão residual ao final do fechamento das turbinas equivalente a 10% da vazão inicial.

\*\*Ajustado dos dados experimentais.

Comparando, na Figura 92, os dados experimentais com os resultados das simulações nos programas CHAMINE-IPH e CHAMINE, percebe-se que a reprodução não foi fiel aos dados reais, porém que os resultados numéricos não se distanciaram tanto dos dados registrados, principalmente na primeira oscilação.



**Figura 92** – Comparação dos resultados do programa CHAMINE-IPH e CHAMINE com os dados experimentais da UHE de Serra da Mesa.

Os resultados obtidos para as simulações da rejeição de carga de 4 de julho de 1999 nos programas ESTRANHE-IPH e CHAMINE-IPH foram considerados satisfatórios, devido à qualidade dos dados experimentais disponíveis para comparações e à falta de informações para entrada nos programas. Cabe lembrar que a equação de perda de carga aplicada é atual e que, segundo SCHREIBER (1977), a perda de carga pode se alterar com o tempo.

Com estas simulações, verificou-se que os programas ESTRANHE-IPH e CHAMINE-IPH apresentaram resultados, no geral, mais próximos dos reais que os programas originais ESTRANHE e CHAMINE. Percebeu-se ainda, que os quatro programas apresentam resultados diferentes entre si, o que provavelmente se deva ao diferente grau de detalhamento das estruturas e a diferentes formas de consideração de determinados parâmetros.

Os programas ESTRANHE-IPH e CHAMINE-IPH conseguiram reproduzir, de forma bastante aproximada, os fenômenos transientes ocorridos na Usina de Serra da Mesa, apresentando boa semelhança com o que ocorreu na realidade. Com isso, considerou-se que eles encontram-se aptos à aplicação na estimativa do comportamento

do nível d'água na chaminé de equilíbrio durante um regime transiente, podendo ser aplicados, então, na investigação sobre a influência dos parâmetros físicos na representação das oscilações de nível em chaminés de equilíbrio. No entanto, optou-se por se dar preferência à utilização do programa CHAMINE-IPH neste estudo, devido a sua maior versatilidade e simplicidade de utilização.

#### 5.4.2 Fase II - Simulações numéricas para análise da influência de parâmetros físicos nas oscilações em chaminés de equilíbrio

Para o estudo da influência de determinados parâmetros físicos nas oscilações de nível em uma chaminé de equilíbrio durante um regime transiente, estabeleceu-se como simulação padrão, a simulação realizada no programa CHAMINE-IPH referente à rejeição de carga de 1° de outubro de 2004, cujas características encontram-se no Quadro 14. Esta simulação foi escolhida, pois conta com dados de entrada reais da Usina de Serra da Mesa, com discretização de tempo satisfatória.

**Quadro 14** - Características da simulação padrão.

|   |   |
|---|---|
| <b>Vazão</b>  | Variável, conforme a registrada                                       |
| <b>Nível no canal de fuga</b>                       | Variável conforme o real  |
| <b>Coefficiente de atrito</b>                       | Variável, conforme equação experimental obtida no Item 7.3.1.         |
| <b>Coefficientes de perdas de carga localizadas</b> | Saída da chaminé = 0,04<br>Curva 62,5° = 0,08<br>Saída do túnel = 0,1 |
| <b>Área da Chaminé</b>                              | 1360 m <sup>2</sup>   |
| <b>Área do túnel de fuga</b>                        | 293 m <sup>2</sup> , baseada no "as-built"                            |
| <b>Perímetro molhado do túnel de fuga</b>           | 66,56 m, baseado no "as-built"  |
| <b>Comprimento do túnel de fuga</b>                 | 525 m   |
| <b>Tempo de manobra do distribuidor</b>             | 10 s, baseado no registrado na Usina de Serra da Mesa                 |

Apresenta-se a seguir, as simulações realizadas no programa CHAMINE-IPH, onde se variou um parâmetro por vez, computando as alterações das oscilações em relação a simulação padrão.

Os resultados de períodos e amplitudes foram comparados com as indicações de ELETROBRÁS (1999) apresentadas no Item 3.3.4.2, e o fator de amortecimento foi calculado pela Equação (26) exposta no mesmo item.

##### 5.4.2.1 Geometria

As variações de geometria, ligadas não à forma, mas sim às dimensões das estruturas, foram referentes à variação da área da chaminé de equilíbrio e da área e comprimento do túnel de fuga.

#### 5.4.2.1.1 Área da Chaminé

As áreas consideradas nas simulações encontram-se apresentadas no Quadro 15.

**Quadro 15** - Áreas aplicadas à chaminé de equilíbrio nas simulações.

| Simulação | Área da chaminé (m <sup>2</sup> ) | Obs:                          |
|-----------|-----------------------------------|-------------------------------|
| Padrão    | 1360,00                           |                               |
| A1        | 1428,00                           | 5% maior que a área padrão    |
| A2        | 2040,00                           | 50% maior que a área padrão   |
| A3        | 1292,00                           | 5% menor que a área padrão    |
| A4        | 680,00                            | 50% menor que a área padrão   |
| A5        | 293,00                            | Igual a área do túnel de fuga |
| A6        | 560,00                            | Igual a área de Thoma         |

Na Figura 93 apresenta-se os gráficos que comparam os resultados da simulação padrão com os resultados das demais simulações citadas no Quadro 15. A análise dos efeitos da variação de área da chaminé pode ser feita com o auxílio do Quadro 16 que fornece informações quantitativas sobre as três primeiras ondas de cada simulação, além das Figuras 94, 95 e 96 que mostram o comportamento das amplitudes, períodos e fator de amortecimento, respectivamente.

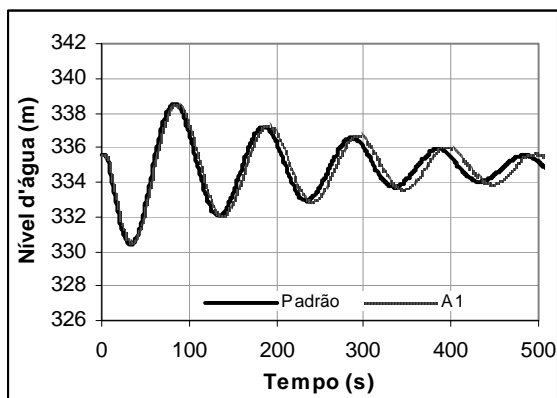
Apresentam-se dois gráficos de amplitude e período, um com os valores registrados e outro com os valores adimensionalizados. Esta adimensionalização foi feita em relação à simulação padrão, ou seja, relação entre a amplitude ou o período de determinada oscilação das simulações com a amplitude ou o período da respectiva oscilação da simulação padrão.

**Quadro 16** - Dados característicos das oscilações, para variação de área da chaminé.

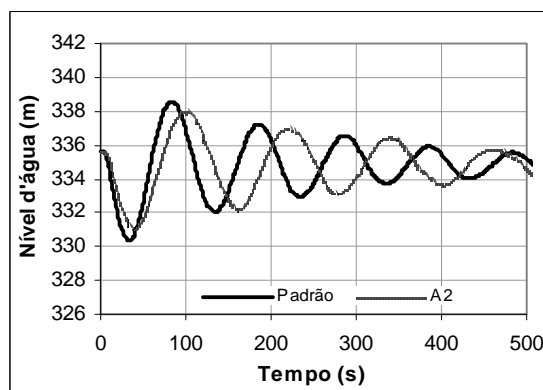
| Simulação<br>Oscilação | Padrão    |         | A1        |         | A2        |         | A3        |         |
|------------------------|-----------|---------|-----------|---------|-----------|---------|-----------|---------|
|                        | Amplitude | Período | Amplitude | Período | Amplitude | Período | Amplitude | Período |
|                        | (m)       | (s)     | (m)       | (s)     | (m)       | (s)     | (m)       | (s)     |
| 1ª                     | 8,2       | 109     | 8,04      | 111,5   | 6,95      | 130,75  | 8,37      | 106,75  |
| 2ª                     | 5,16      | 101,5   | 5,22      | 102,25  | 4,77      | 117,5   | 5,1       | 97,75   |
| 3ª                     | 3,65      | 99,5    | 3,65      | 104,25  | 3,4       | 122,75  | 3,45      | 97,5    |

| Simulação<br>Oscilação | Padrão    |         | A4        |         | A5        |         | A6        |         |
|------------------------|-----------|---------|-----------|---------|-----------|---------|-----------|---------|
|                        | Amplitude | Período | Amplitude | Período | Amplitude | Período | Amplitude | Período |
|                        | (m)       | (s)     | (m)       | (s)     | (m)       | (s)     | (m)       | (s)     |
| 1ª                     | 8,2       | 109     | 10,66     | 77,75   | 15,9      | 52,5    | 11,56     | 71      |
| 2ª                     | 5,16      | 101,5   | 7,36      | 68,75   | 14,05     | 46      | 8,77      | 63      |
| 3ª                     | 3,65      | 99,5    | 7,26      | 71,5    | 11,01     | 46      | 8         | 64,5    |

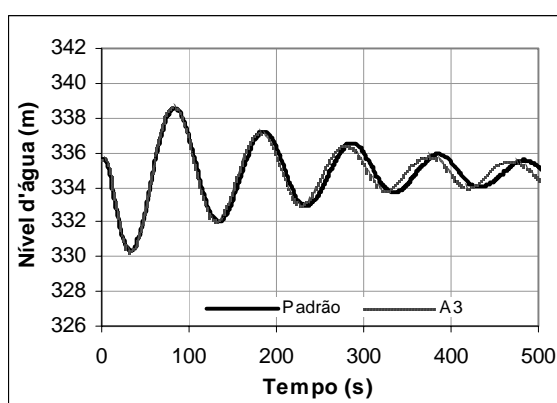




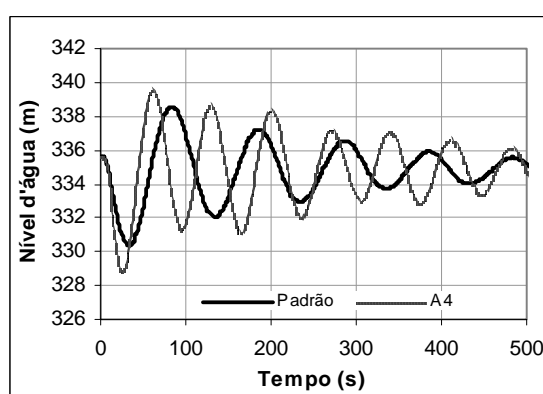
(a)



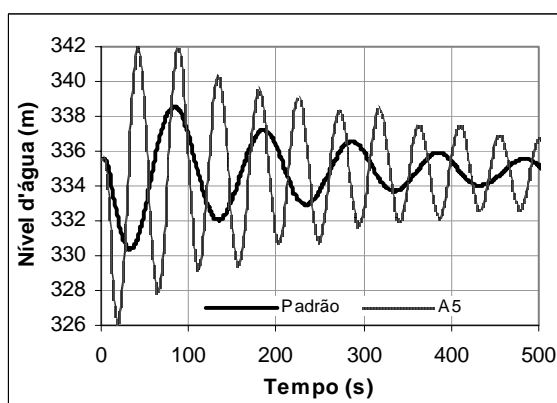
(b)



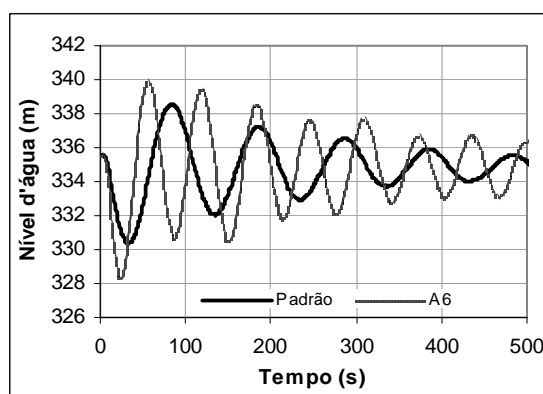
(c)



(d)

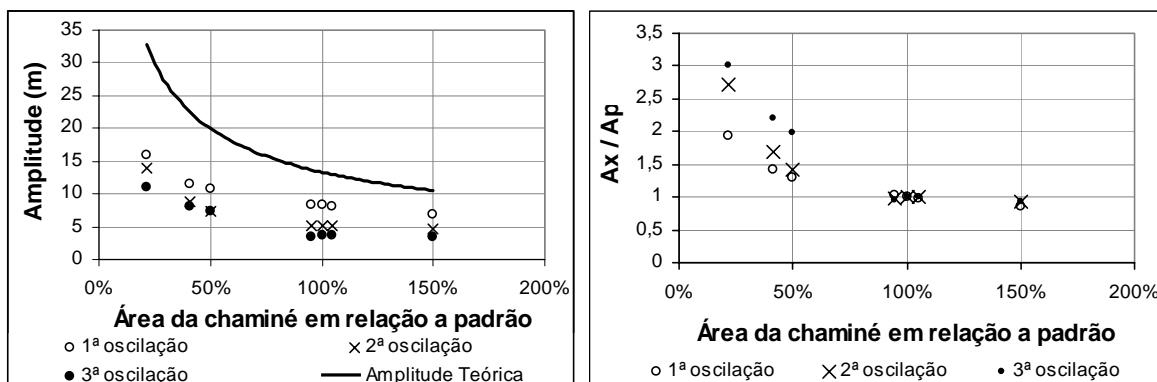


(e)

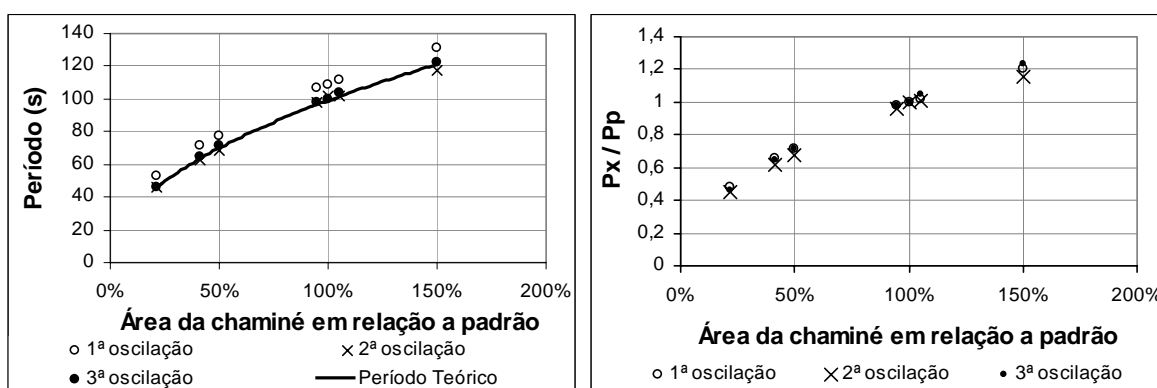


(f)

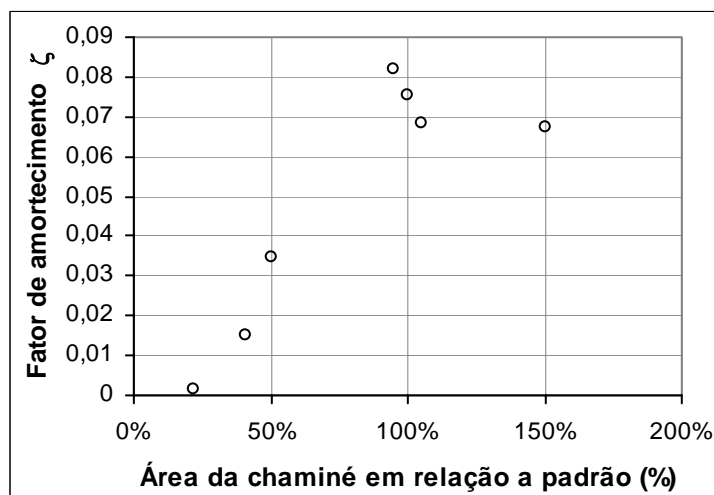
**Figura 93** – Comportamento da oscilação de nível na chaminé de equilíbrio variando sua área. (a) Simulação padrão vs. A1; (b) Simulação padrão vs. A2; (c) Simulação padrão vs. A3; (d) Simulação padrão vs. A4, (e) Simulação padrão vs. A5, (f) Simulação padrão vs. A6.



**Figura 94** – Comportamento das amplitudes das oscilações de nível na chaminé de equilíbrio segundo a variação de sua área.



**Figura 95** – Comportamento dos períodos das oscilações de nível na chaminé de equilíbrio considerando a variação da área da mesma.



**Figura 96** – Comportamento do fator de amortecimento considerando a variação da área da chaminé.

Analisando os gráficos das figuras anteriores e os dados do Quadro 16, percebe-se que a variação da área da chaminé influenciou as amplitudes, o período e o fator de amortecimento das oscilações de nível d'água.

Observa-se que as amplitudes foram afetadas de uma forma assintótica pela variação da área, sendo tanto maiores quanto menor a área da chaminé.

Os períodos cresceram com o aumento da área da chaminé. A Equação (24) foi capaz de representar bastante bem os períodos das 2ª e 3ª ondas. O período da primeira oscilação apresentou valores ligeiramente superiores aos demais devido à característica inicial do movimento.

Verifica-se o crescimento do fator de amortecimento com o aumento da área da chaminé até um ponto com um posterior decaimento, o que representaria a existência de uma área com máxima eficiência no amortecimento das oscilações.

As variações de 5% na área da chaminé, em relação à área da simulação padrão, não causam diferenças significativas, principalmente na primeira oscilação que é a de maior importância no momento do desenvolvimento do projeto de uma chaminé de equilíbrio. Assim, para chaminés com área da mesma ordem de grandeza da aqui estudada, variações da ordem de 5% entre a área construída e a área de projeto não comprometeriam a segurança da estrutura.

#### 5.4.2.1.2 Comprimento do túnel de fuga

No Quadro 17 apresentam-se os comprimentos considerados nas simulações.

**Quadro 17** - Comprimentos aplicados ao túnel de fuga nas simulações.

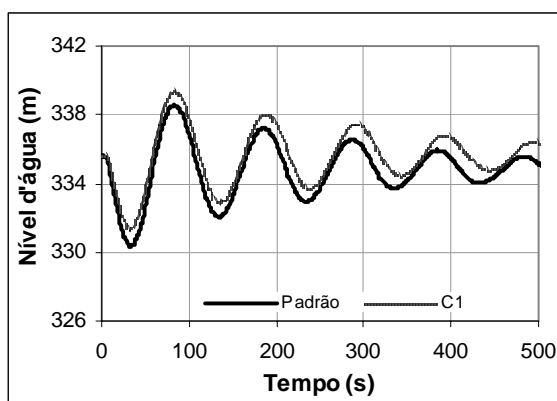
| Simulação | Comprimento do túnel de fuga (m) | Obs:                      |
|-----------|----------------------------------|---------------------------|
| Padrão    | 525,00                           |                           |
| C1        | 551,25                           | 5% maior que o do padrão  |
| C2        | 603,75                           | 15% maior que o do padrão |
| C3        | 498,75                           | 5% menor que o do padrão  |
| C4        | 446,25                           | 15% menor que o do padrão |

Os gráficos que comparam os resultados da simulação padrão com os resultados das demais simulações citadas no Quadro 17 encontram-se na Figura 97. O Quadro 18 fornece informações quantitativas sobre as três primeiras ondas de cada simulação e as Figuras 98, 99 e 100 mostram o comportamento das amplitudes, períodos e fator de amortecimento, respectivamente.

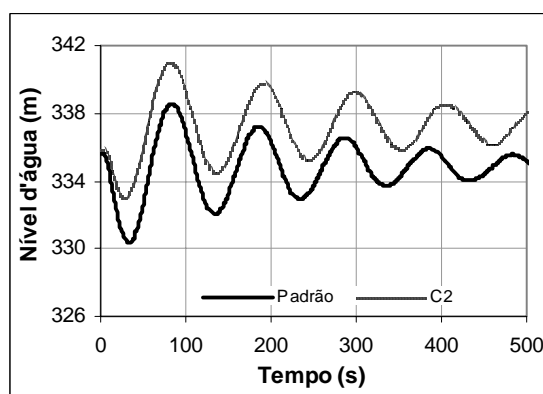
**Quadro 18** - Dados característicos das oscilações, para variação do comprimento do túnel de fuga.

| Simulação<br>Oscilação | Padrão    |         | C1        |         | C2        |         |
|------------------------|-----------|---------|-----------|---------|-----------|---------|
|                        | Amplitude | Período | Amplitude | Período | Amplitude | Período |
|                        | (m)       | (s)     | (m)       | (s)     | (m)       | (s)     |
| 1 <sup>a</sup>         | 8,2       | 109     | 8,04      | 109     | 7,99      | 108,5   |
| 2 <sup>a</sup>         | 5,16      | 101,5   | 5,19      | 102,5   | 5,3       | 109     |
| 3 <sup>a</sup>         | 3,65      | 99,5    | 3,77      | 105,5   | 3,99      | 108     |

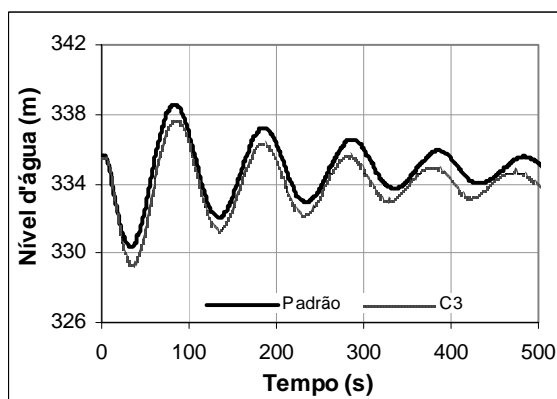
| Simulação<br>Oscilação | Padrão    |         | C3        |         | C4        |         |
|------------------------|-----------|---------|-----------|---------|-----------|---------|
|                        | Amplitude | Período | Amplitude | Período | Amplitude | Período |
|                        | (m)       | (s)     | (m)       | (s)     | (m)       | (s)     |
| 1 <sup>a</sup>         | 8,2       | 109     | 8,37      | 109     | 9,11      | 107     |
| 2 <sup>a</sup>         | 5,16      | 101,5   | 5,01      | 100     | 4,78      | 94      |
| 3 <sup>a</sup>         | 3,65      | 99,5    | 3,43      | 95      | 3,1       | 91      |



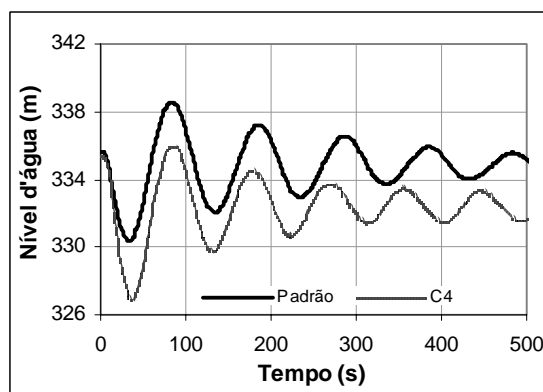
(a)



(b)

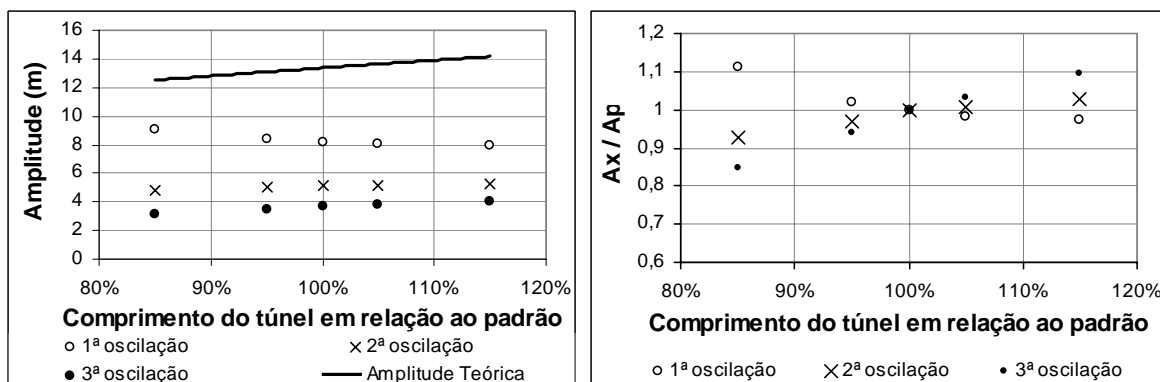


(c)

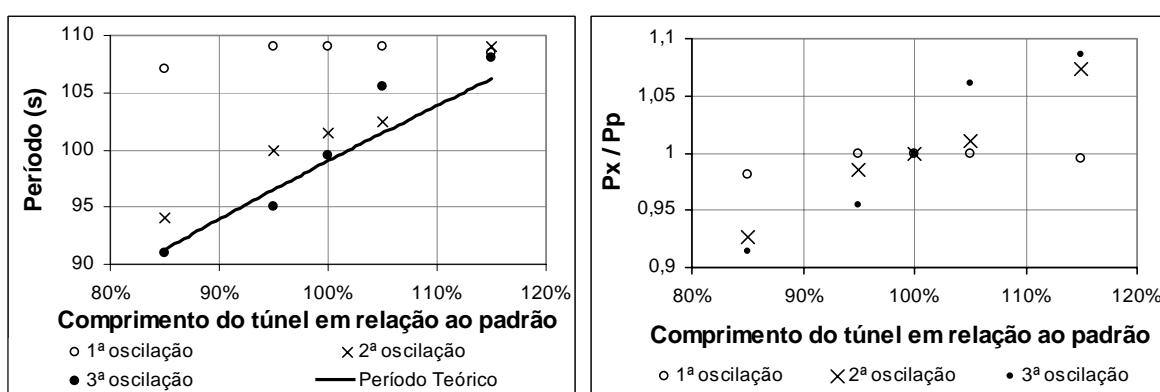


(d)

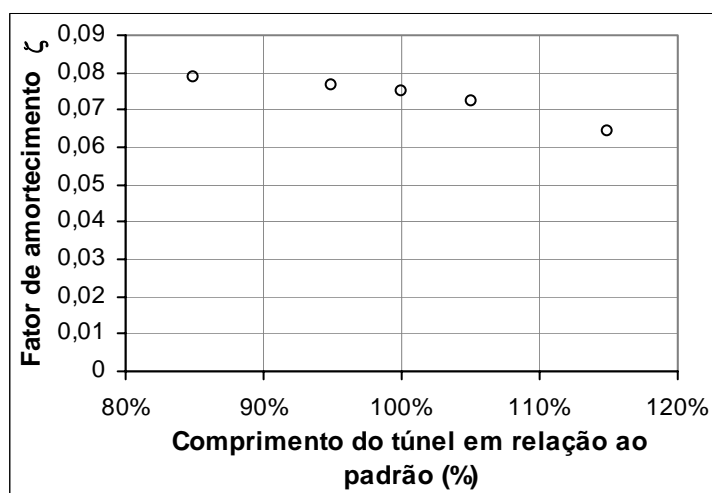
**Figura 97** – Comportamento da oscilação de nível na chaminé de equilíbrio variando o comprimento do túnel de fuga. (a) Simulação padrão vs. C1; (b) Simulação padrão vs. C2; (c) Simulação padrão vs. C3; (d) Simulação padrão vs. C4.



**Figura 98** – Comportamento das amplitudes das oscilações de nível na chaminé de equilíbrio segundo a variação do comprimento do túnel de fuga.



**Figura 99** – Comportamento dos períodos das oscilações de nível na chaminé de equilíbrio considerando a variação do comprimento do túnel de fuga.



**Figura 100** – Comportamento do fator de amortecimento das oscilações de nível na chaminé de equilíbrio considerando a variação do comprimento do túnel de fuga.

Analisando os resultados apresentados, percebe-se que a variação do comprimento alterou os períodos, as amplitudes e o fator de amortecimento das oscilações de nível d'água na chaminé.

A amplitude da primeira onda variou inversamente ao aumento do comprimento sendo que para as demais oscilações, as amplitudes cresceram com o comprimento do túnel de fuga.

Os períodos da primeira oscilação variaram menos que os das ondas seguintes, os quais cresceram com o aumento do comprimento ficando próximos aos períodos estimados pela fórmula teórica indicada para sua determinação.

Junto com o aumento do comprimento do túnel de fuga, ocorreu o aumento da perda de carga e a conseqüente elevação do nível d'água na chaminé. Assim, acredita-se que no caso da primeira onda a perda de carga seja o fator preponderante reduzindo então a amplitude da oscilação, lembrando que a vazão no túnel durante esta oscilação é superior as demais. Com a redução da vazão para as demais ondas, a perda de carga deixaria de ser o fator preponderante, passando a importar mais a diferença de nível entre a chaminé e o canal de fuga, o que provocaria aumento relativo das amplitudes destas ondas. Assim, quanto menor o comprimento, mais próximas estariam as cotas dos níveis na chaminé e canal de fuga, acelerando o amortecimento.

As variações de 5% no comprimento do túnel, em relação à área da simulação padrão, causaram diferenças significativas nos resultados das simulações. Logo um erro desta magnitude comprometeria o projeto de uma chaminé de equilíbrio no que diz respeito à segurança da estrutura.

#### 5.4.2.1.3 Área do túnel de fuga:

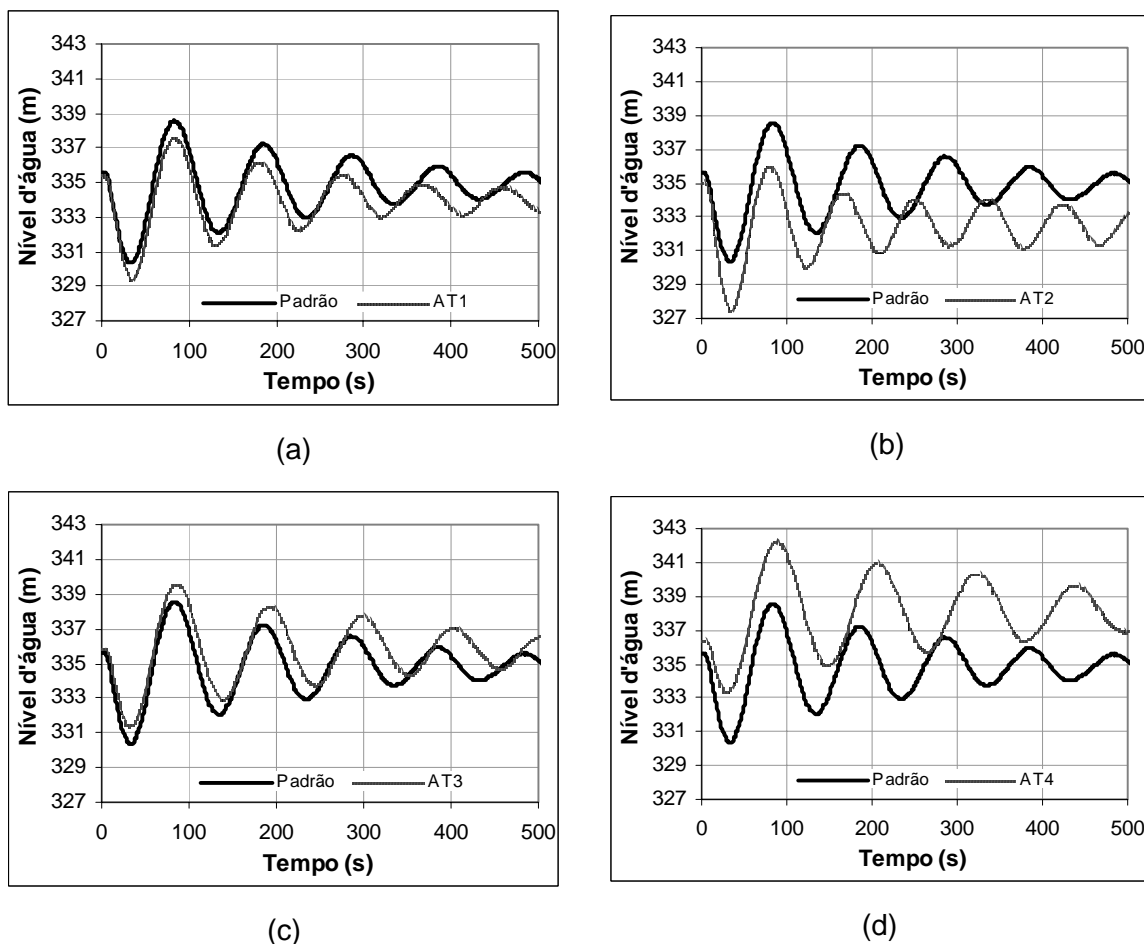
No Quadro 19 apresentam-se as áreas consideradas nas simulações para o túnel de fuga.

**Quadro 19** - Áreas aplicadas ao túnel de fuga nas simulações.

| Simulação | Comprimento do túnel de fuga (m) | Obs:                      |
|-----------|----------------------------------|---------------------------|
| Padrão    | 293,00                           |                           |
| AT1       | 307,00                           | 5% maior que o do padrão  |
| AT2       | 336,25                           | 15% maior que o do padrão |
| AT3       | 278,77                           | 5% menor que o do padrão  |
| AT4       | 249,05                           | 15% menor que o do padrão |

A comparação dos resultados da simulação padrão com os resultados das demais simulações citadas no Quadro 19 encontram-se na Figura 101. O Quadro 20 fornece informações quantitativas sobre as três primeiras oscilações de cada simulação bem

como as Figuras 102, 103 e 104 que mostram o comportamento das amplitudes, períodos e fator de amortecimento, respectivamente.



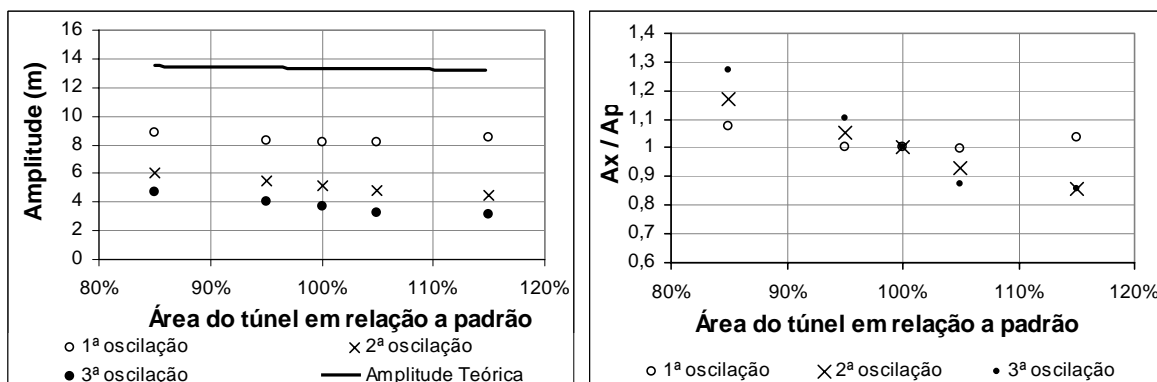
**Figura 101** – Comportamento da oscilação de nível na chaminé de equilíbrio variando a área do túnel de fuga. (a) Simulação padrão vs. AT1; (b) Simulação padrão vs. AT2; (c) Simulação padrão vs. AT3; (d) Simulação padrão vs. AT4.

**Quadro 20** - Dados característicos das oscilações, para variação da área do túnel de fuga.

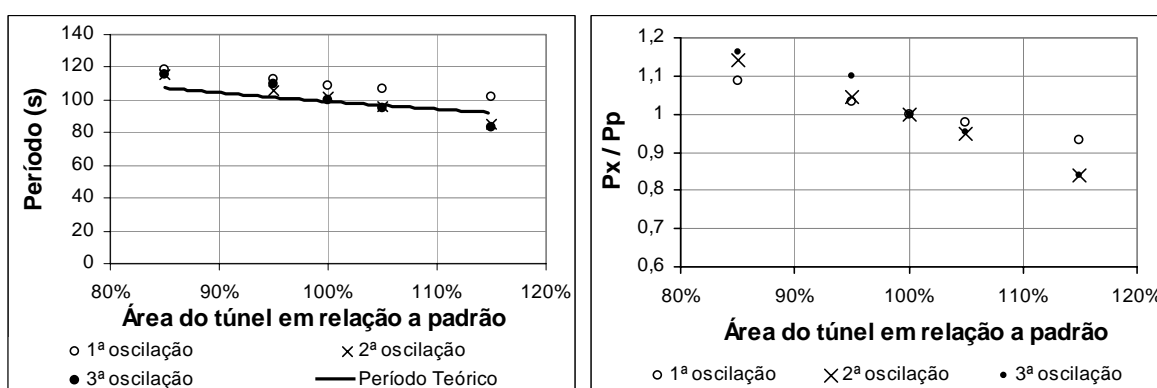
| Simulação \ Oscilação | Padrão        |             | AT1           |             | AT2           |             |
|-----------------------|---------------|-------------|---------------|-------------|---------------|-------------|
|                       | Amplitude (m) | Período (s) | Amplitude (m) | Período (s) | Amplitude (m) | Período (s) |
| 1 <sup>a</sup>        | 8,2           | 109         | 8,19          | 106,75      | 8,52          | 101,5       |
| 2 <sup>a</sup>        | 5,16          | 101,5       | 4,8           | 96,25       | 4,43          | 85          |
| 3 <sup>a</sup>        | 3,65          | 99,5        | 3,2           | 94,75       | 3,12          | 83,5        |

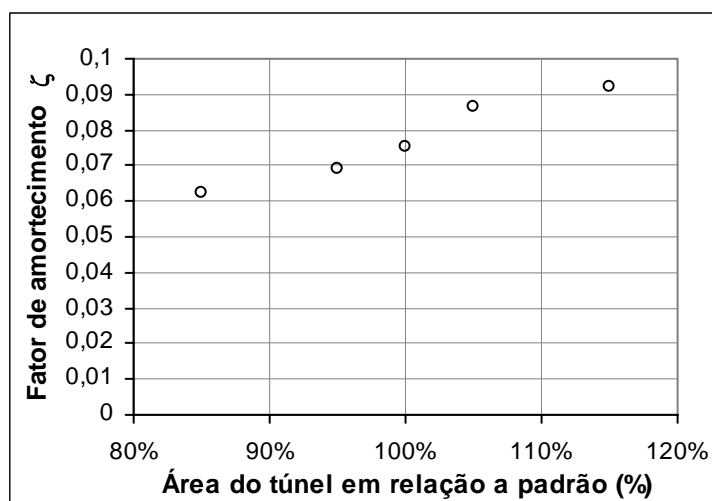
| Simulação \ Oscilação | Padrão        |             | AT3           |             | AT4           |             |
|-----------------------|---------------|-------------|---------------|-------------|---------------|-------------|
|                       | Amplitude (m) | Período (s) | Amplitude (m) | Período (s) | Amplitude (m) | Período (s) |
| 1 <sup>a</sup>        | 8,2           | 109         | 8,23          | 112,5       | 8,84          | 118,5       |
| 2 <sup>a</sup>        | 5,16          | 101,5       | 5,44          | 106         | 6,04          | 116         |
| 3 <sup>a</sup>        | 3,65          | 99,5        | 4,03          | 109,25      | 4,65          | 115,75      |



**Figura 102** – Comportamento das amplitudes das oscilações de nível na chaminé de equilíbrio segundo a variação da área do túnel de fuga.



**Figura 103** – Comportamento dos períodos das oscilações de nível na chaminé de equilíbrio considerando a variação da área do túnel.



**Figura 104** – Comportamento do fator de amortecimento das oscilações de nível na chaminé de equilíbrio considerando a variação da área do túnel.

Verifica-se que a variação da área do túnel de fuga influenciou os períodos, as amplitudes e o fator de amortecimento das oscilações de nível d'água na chaminé de equilíbrio.

Observa-se que com o aumento da área do túnel os períodos das oscilações de nível d'água sofreram redução, sendo mais suave para a primeira oscilação. As amplitudes



da 2ª e 3ª ondas diminuíram com o aumento da área do túnel, enquanto a amplitude da primeira oscilação reduziu e tornou a aumentar com o aumento da área do túnel.

Mais uma vez a perda de carga tem importância nos resultados, pois, com o aumento da área do túnel ocorre a redução da velocidade do escoamento e o aumento do diâmetro hidráulico, reduzindo a perda de carga e o nível d'água na chaminé. Pode-se, então, ter um raciocínio similar ao feito para o comprimento do túnel de fuga e quanto maior a área do túnel, menor a diferença entre as cotas dos níveis na chaminé e canal de fuga e maior o amortecimento.

As variações de 5% na área do túnel causaram diferenças significativas nos resultados das simulações, principalmente com relação aos níveis atingidos nas oscilações, um erro que poderia comprometer o projeto de uma chaminé de equilíbrio no que diz respeito à segurança da estrutura.

#### 5.4.2.2 Perda de carga

Para se determinar a influência da perda de carga nas oscilações de nível na chaminé de equilíbrio, realizaram-se simulações com coeficientes de atrito fixos e variáveis segundo o número de Reynolds, e coeficientes de perda de carga localizada diferentes. Os coeficientes de atrito variáveis referem-se à aplicação de equações ajustadas aos dados experimentais para sua determinação no decorrer de toda a simulação. No Quadro 21 apresentam-se os coeficientes de perda de carga considerados nas simulações.

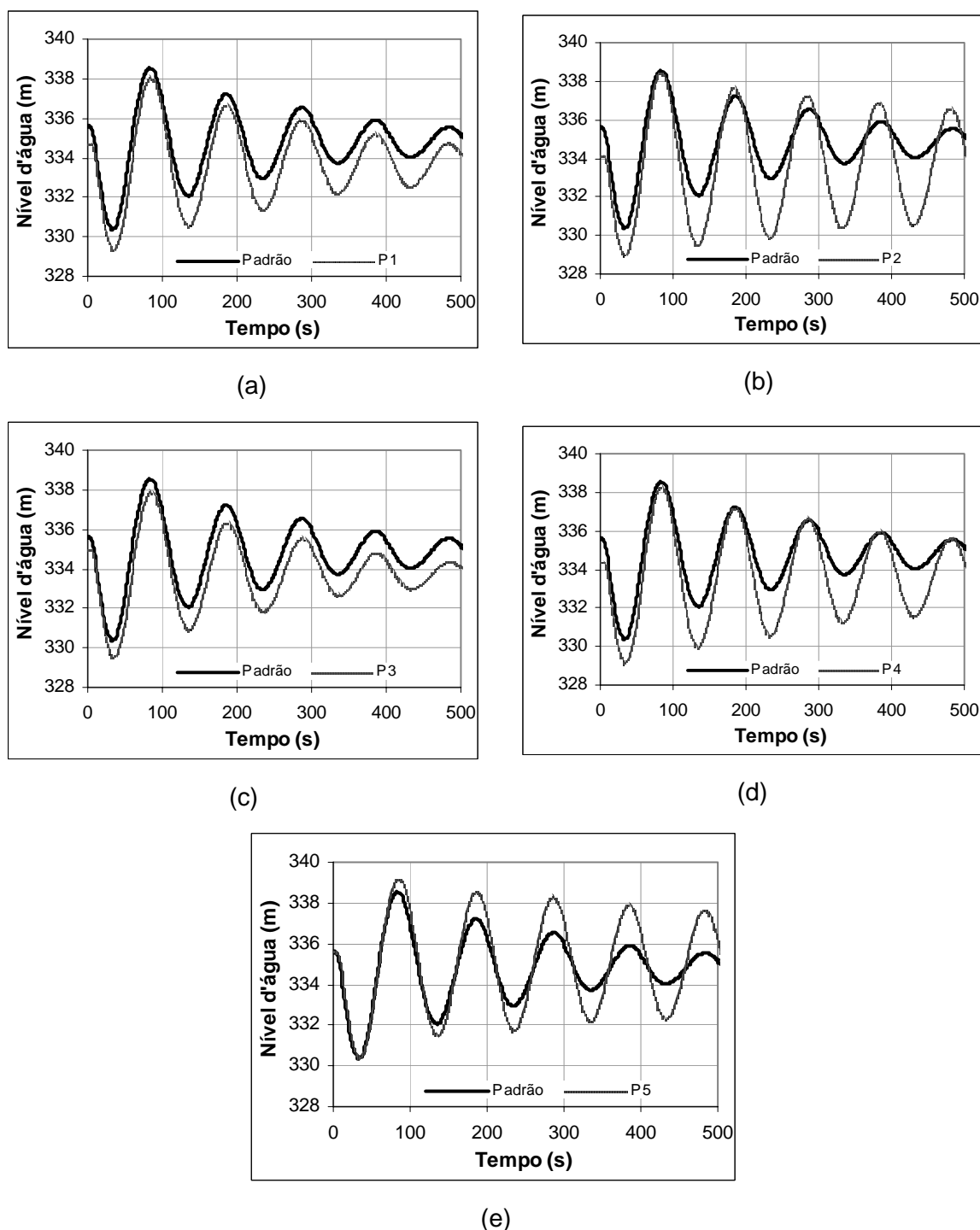
**Quadro 21** – Coeficientes de perda de carga aplicados nas simulações.

| Simulação  | $\Sigma$ dos coeficientes de perda de carga localizada. | Coefficiente de atrito       |
|------------|---|------------------------------|
| Padrão (P) | 0,22  | $f = 5,3657E12 Re^{-1,7645}$ |
| P1         | 0,22  | 0,073 (Czarnota)             |
| P2         | 0,22  | 0,0106 (Manning mínimo)      |
| P3         | 1,0   | 0,073 (Czarnota)             |
| P4         | 1,0   | 0,0106 (Manning mínimo)      |
| P5         | 1,0   | $f = 5,6885E14 Re^{-2,039}$  |

A equação do coeficiente de atrito utilizada na simulação padrão provém da análise feita no Item 5.3.1, onde os coeficientes de perda de carga localizada adotados foram: Saída da chaminé = 0,04, Curva de 62,5 = 0,08 e Saída do túnel = 0,1. A equação utilizada em P5 segue os mesmos padrões de obtenção aplicados no Item 5.3.1, porém foi ajustada para coeficientes de perda de carga localizada um pouco maiores: Saída da chaminé = 0,2, Curva de 62,5 = 0,1 e Saída do túnel = 0,7, valores próximos aos médios indicados na bibliografia citada em 5.3.1.

Os coeficientes de atrito escolhidos foram o maior (0,073) e o menor (0,0106) entre os coeficientes encontrados segundo a bibliografia no Item 5.3.1.

A comparação dos resultados da simulação padrão com os resultados das demais simulações citadas no Quadro 21 encontram-se na Figura 105.



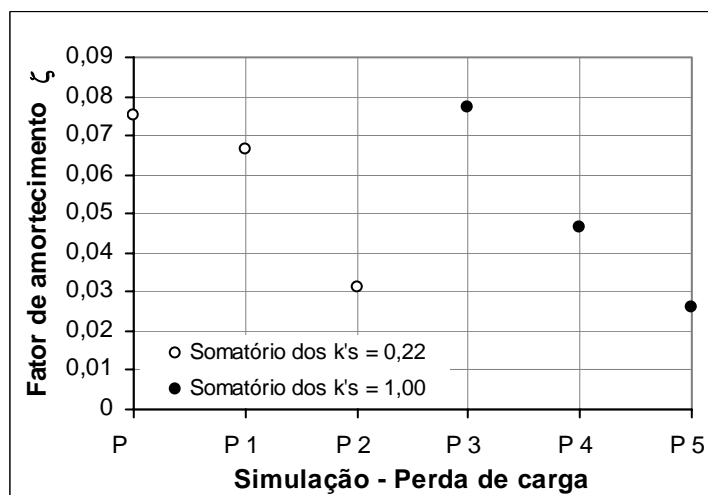
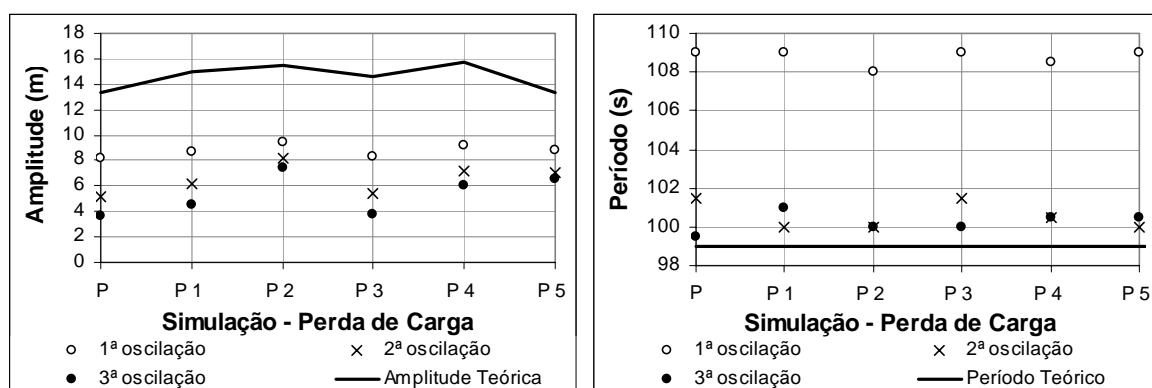
**Figura 105** – Comportamento da oscilação de nível na chaminé de equilíbrio variando os coeficientes de perda de carga. (a) Simulação padrão vs. P1; (b) Simulação padrão vs. P2; (c) Simulação padrão vs. P3; (d) Simulação padrão vs. P4; (e) Simulação padrão vs. P5.

O Quadro 22 fornece informações quantitativas sobre as três primeiras ondas de cada simulação e as Figuras 106 e 107 mostram o comportamento das amplitudes, períodos e fator de amortecimento, respectivamente.

**Quadro 22** - Dados característicos das oscilações, para variação do comprimento do túnel de fuga.

| Simulação \ Oscilação | Padrão    |         | P1        |         | P2        |         |
|-----------------------|-----------|---------|-----------|---------|-----------|---------|
|                       | Amplitude | Período | Amplitude | Período | Amplitude | Período |
|                       | (m)       | (s)     | (m)       | (s)     | (m)       | (s)     |
| 1 <sup>a</sup>        | 8,2       | 109     | 8,67      | 109     | 9,5       | 108     |
| 2 <sup>a</sup>        | 5,16      | 101,5   | 6,13      | 100     | 8,14      | 100     |
| 3 <sup>a</sup>        | 3,65      | 99,5    | 4,56      | 101     | 7,42      | 100     |

| Simulação \ Oscilação | Padrão    |         | P3        |         | P4        |         | P5        |         |
|-----------------------|-----------|---------|-----------|---------|-----------|---------|-----------|---------|
|                       | Amplitude | Período | Amplitude | Período | Amplitude | Período | Amplitude | Período |
|                       | (m)       | (s)     | (m)       | (s)     | (m)       | (s)     | (m)       | (s)     |
| 1 <sup>a</sup>        | 8,2       | 109     | 8,34      | 109     | 9,16      | 108,5   | 8,85      | 109     |
| 2 <sup>a</sup>        | 5,16      | 101,5   | 5,43      | 101,5   | 7,22      | 100,5   | 7,1       | 100     |
| 3 <sup>a</sup>        | 3,65      | 99,5    | 3,73      | 100     | 6,07      | 100,5   | 6,57      | 100,5   |



Nas simulações onde o coeficiente de atrito foi menor (P2 e P4) os períodos foram menores para a primeira oscilação em comparação com as demais simulações. Em todos os casos, os períodos simulados foram maiores que os períodos teóricos, que não consideram a perda de carga em seu cálculo.

As amplitudes registradas nas simulações foram menores do que as teóricas, porém apresentaram o mesmo comportamento, lembrando que no cálculo da amplitude teórica leva-se em consideração a perda de carga.

As amplitudes foram maiores nas simulações com menores coeficientes de perda de carga e quanto menores estes coeficientes, menor o amortecimento, como era de se esperar.

Como mostrado no item 5.4.1, a simulação, aqui adotada como padrão, consegue representar o fenômeno transitório ocorrido na Usina de Serra da Mesa. Analisando os gráficos da Figura 105, percebe-se que somente a simulação P5 conseguiu representar o nível inicial na chaminé de equilíbrio conforme a simulação Padrão, isto por ter seu ajuste baseado em dados experimentais, no entanto o amortecimento foi menor, devido à utilização, na determinação da equação do coeficiente de atrito, de valores maiores para os coeficientes de perda de carga localizada. Nos casos das outras simulações que adotam coeficientes de atrito teóricos fixos, nem os níveis nem as amplitudes se assemelharam ao ocorrido na simulação padrão e, portanto, ao ocorrido na Usina. Isto chama atenção para a forma de consideração dos coeficientes de perda de carga a ser utilizada no momento do dimensionamento das chaminés de equilíbrio, devendo então ser estudado o escoamento no circuito hidráulico em questão, para a escolha de um coeficiente fixo ou de uma equação em função do número de Reynolds.

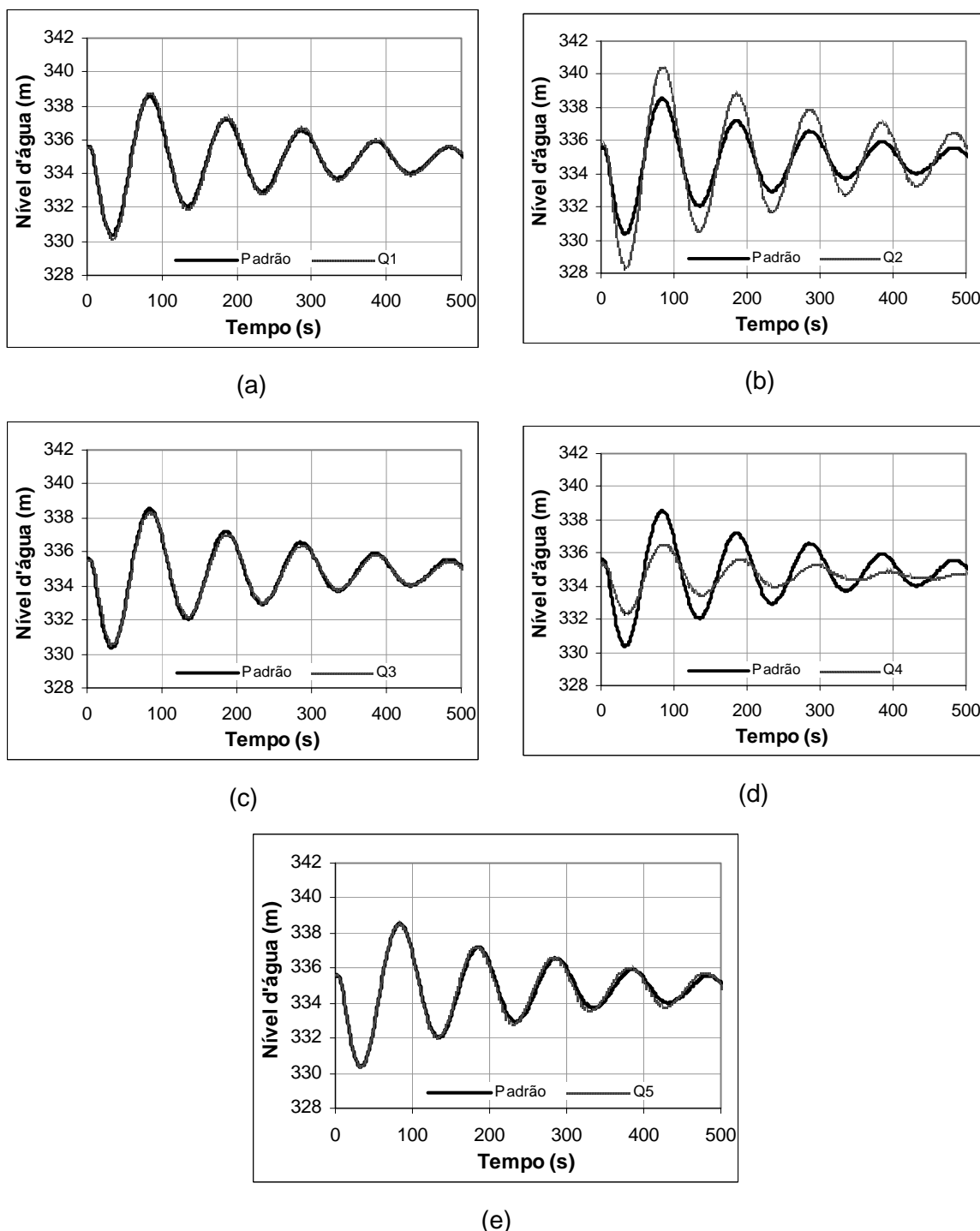
#### 5.4.2.3 Vazão

No Quadro 23 apresentam-se as vazões consideradas nas simulações.

**Quadro 23** - Vazões aplicadas nas simulações.

| Simulação | Vazão  |
|-----------|--|
| Padrão    | Igual a real da rejeição de 01/10/2004 ocorrida em Serra da Mesa   |
| Q1        | 5% maior que o do padrão   |
| Q2        | 50% maior que o do padrão  |
| Q3        | 5% menor que o do padrão   |
| Q4        | 50% menor que o do padrão  |
| Q5        | Variando linearmente, com vazões inicial ( $721,4\text{m}^3/\text{s}$ ) e final ( $321,5\text{m}^3/\text{s}$ ) iguais as da simulação padrão, com mesmo tempo para a redução da vazão. |

A comparação dos resultados da simulação padrão com os resultados das demais simulações citadas no Quadro 23 encontram-se na Figura 108, e o Quadro 24 fornece informações quantitativas sobre as três primeiras oscilações de cada simulação.



**Figura 108** – Comportamento da oscilação de nível na chaminé de equilíbrio variando a vazão. (a) Simulação padrão vs. Q1; (b) Simulação padrão vs. Q2; (c) Simulação padrão vs. Q3; (d) Simulação padrão vs. Q4; (e) Simulação padrão vs. Q5.

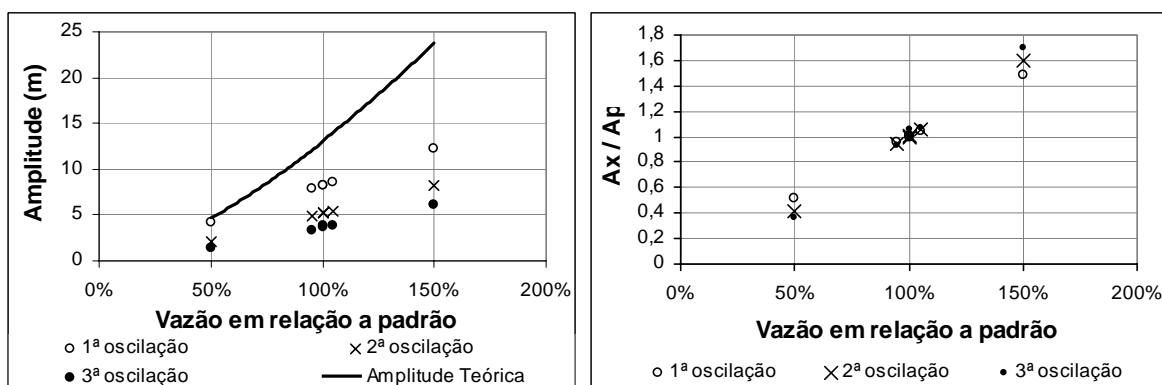
**Quadro 24** - Dados característicos das oscilações, para variação da vazão.

| Oscilação \ Simulação | Padrão    |         | Q1        |         | Q2        |         |
|-----------------------|-----------|---------|-----------|---------|-----------|---------|
|                       | Amplitude | Período | Amplitude | Período | Amplitude | Período |
|                       | (m)       | (s)     | (m)       | (s)     | (m)       | (s)     |
| 1ª                    | 8,2       | 109     | 8,6       | 109     | 12,18     | 109     |
| 2ª                    | 5,16      | 101,5   | 5,47      | 101,5   | 8,28      | 100     |
| 3ª                    | 3,65      | 99,5    | 3,9       | 99,5    | 6,2       | 101     |

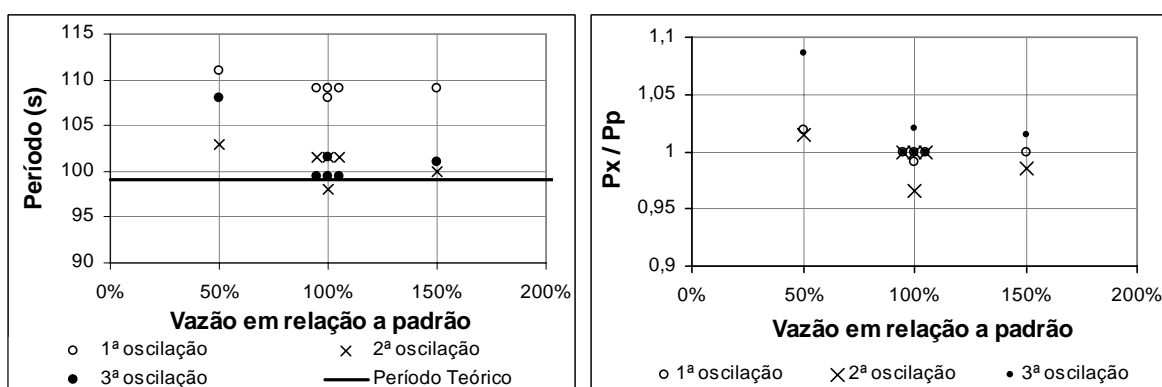
  

| Oscilação \ Simulação | Padrão    |         | Q3        |         | Q4        |         | Q5        |         |
|-----------------------|-----------|---------|-----------|---------|-----------|---------|-----------|---------|
|                       | Amplitude | Período | Amplitude | Período | Amplitude | Período | Amplitude | Período |
|                       | (m)       | (s)     | (m)       | (s)     | (m)       | (s)     | (m)       | (s)     |
| 1ª                    | 8,2       | 109     | 7,8       | 109     | 4,2       | 111     | 8,21      | 108     |
| 2ª                    | 5,16      | 101,5   | 4,86      | 101,5   | 2,14      | 103     | 5,2       | 98      |
| 3ª                    | 3,65      | 99,5    | 3,4       | 99,5    | 1,35      | 108     | 3,84      | 101,5   |

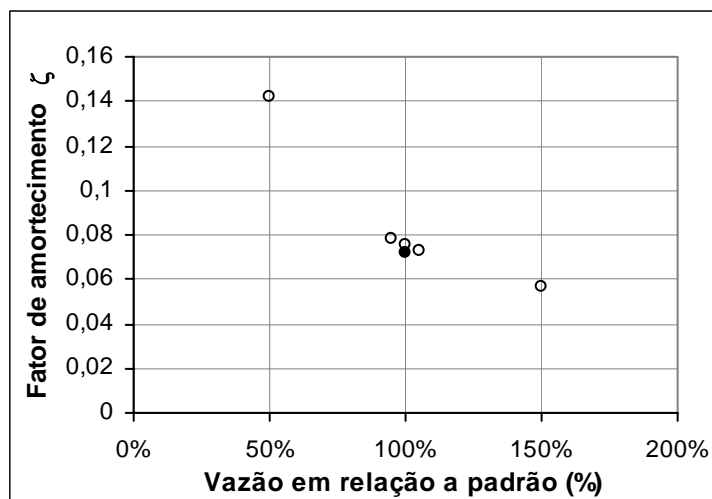
As Figuras 109, 110 e 111 mostram o comportamento das amplitudes, períodos e fator de amortecimento, respectivamente.



**Figura 109** – Comportamento das amplitudes das oscilações de nível na chaminé de equilíbrio considerando a variação da vazão.



**Figura 110** – Comportamento dos períodos das oscilações de nível na chaminé de equilíbrio considerando a variação da vazão.



**Figura 111** – Comportamento dos períodos das oscilações de nível na chaminé de equilíbrio considerando a variação da vazão.

Percebe-se claramente a tendência do aumento das amplitudes com o aumento da vazão, sendo, proporcionalmente, menos afetada a primeira oscilação, fazendo com que o fator de amortecimento seja tanto menor quanto maior a vazão.

Os períodos sofreram um aumento com a redução da vazão, possuindo praticamente todos, valores maiores que os determinados teoricamente, onde não se considera a vazão no cálculo. Os pontos discrepantes existentes sobre a relação 100% são referentes a Q5 que não considera uma vazão oscilante.

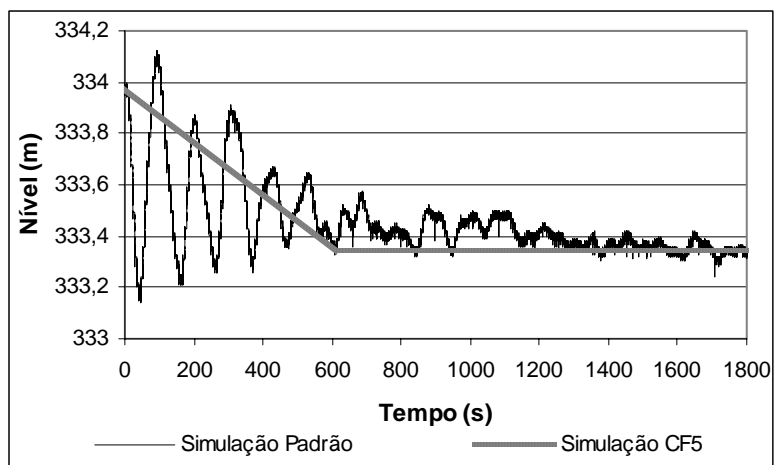
As variações de 5% na vazão e a consideração de sua variação entre dois pontos em linha reta (Q5) não causaram diferenças significativas nos resultados das simulações, sendo então, erros ou simplificações admissíveis em um projeto, não causando prejuízo à confiança do mesmo.

#### 5.4.2.4 Nível de jusante

No Quadro 25 apresentam-se os níveis considerados nas simulações para o canal de fuga.

**Quadro 25** - Níveis aplicados nas simulações para o canal de fuga.

| Simulação    | Nível no canal de fuga  |
|--------------|---|
| Padrão (CF0) | Igual ao real da rejeição de 01/10/2004 ocorrida em Serra da Mesa   |
| CF1          | Nível fixo e igual ao inicial da rejeição (333,98 m)  |
| CF2          | Nível fixo e igual ao final da rejeição (333,34 m)  |
| CF3          | Similar ao da rejeição, porém deslocado 1 m para cima   |
| CF4          | Similar ao da rejeição, porém deslocado 1 m para baixo  |
| CF5          | Variando linearmente entre dois pontos, o inicial e o final da rejeição, respeitando o tempo de estabilização (Figura 112). |



**Figura 112** – Níveis d'água no canal de fuga aplicados nas simulações Padrão e CF5.

A comparação dos resultados da simulação padrão com os resultados das demais simulações citadas no Quadro 25 encontram-se na Figura 113, e o Quadro 26 fornece informações quantitativas sobre as três primeiras oscilações de cada simulação.

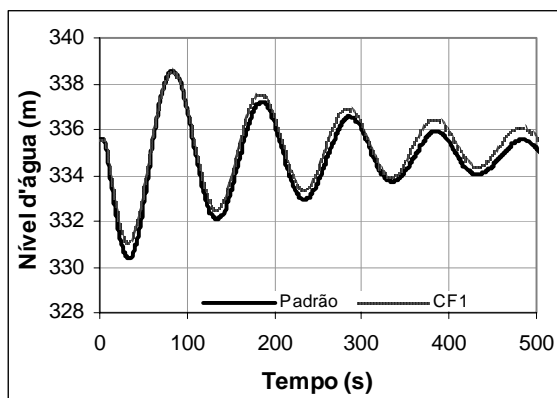
**Quadro 26** - Dados característicos das oscilações, para variação de nível no canal de fuga.

| Simulação / Oscilação | Padrão        |             | CF1           |             | CF2           |             |
|-----------------------|---------------|-------------|---------------|-------------|---------------|-------------|
|                       | Amplitude (m) | Período (s) | Amplitude (m) | Período (s) | Amplitude (m) | Período (s) |
| 1ª                    | 8,2           | 109         | 7,47          | 107,75      | 7,47          | 107,75      |
| 2ª                    | 5,16          | 101,5       | 5,08          | 100,5       | 5,08          | 100,5       |
| 3ª                    | 3,65          | 99,5        | 3,54          | 99,5        | 3,54          | 99,75       |

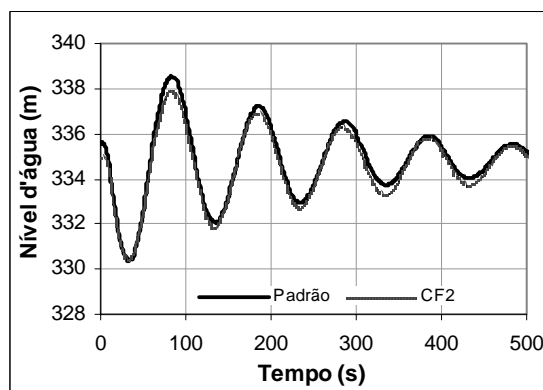
| Simulação / Oscilação | Padrão        |             | CF3           |             | CF4           |             | CF5           |             |
|-----------------------|---------------|-------------|---------------|-------------|---------------|-------------|---------------|-------------|
|                       | Amplitude (m) | Período (s) | Amplitude (m) | Período (s) | Amplitude (m) | Período (s) | Amplitude (m) | Período (s) |
| 1ª                    | 8,2           | 109         | 8,2           | 109         | 8,2           | 109         | 7,42          | 107,75      |
| 2ª                    | 5,16          | 101,5       | 5,16          | 101,5       | 5,16          | 101,5       | 5,02          | 100,25      |
| 3ª                    | 3,65          | 99,5        | 3,65          | 99,5        | 3,65          | 99,5        | 3,49          | 100,25      |

As Figuras 114 e 115 apresentam o comportamento de amplitudes, períodos e fator de amortecimento das oscilações de nível, de acordo com o nível no canal de fuga.

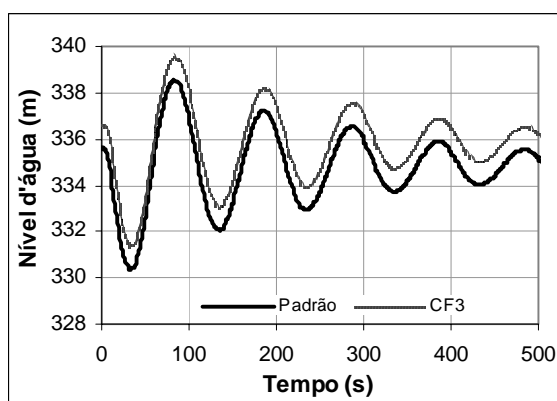




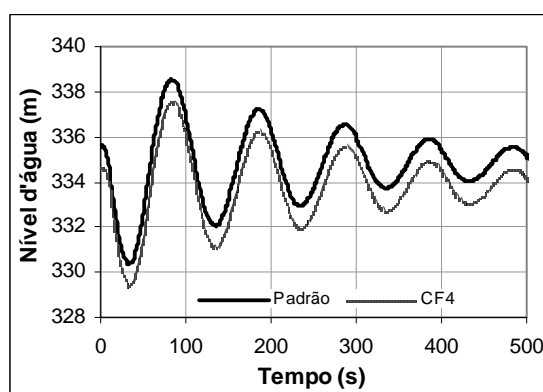
(a)



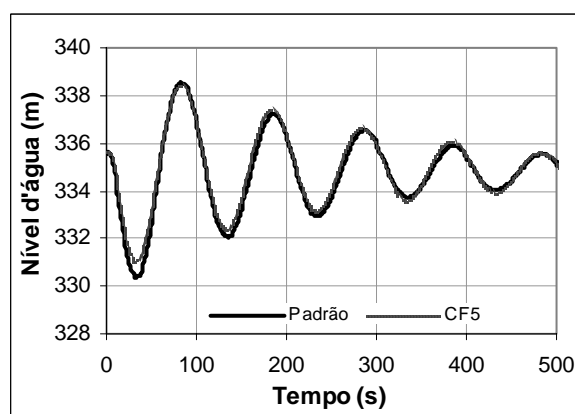
(b)



(c)

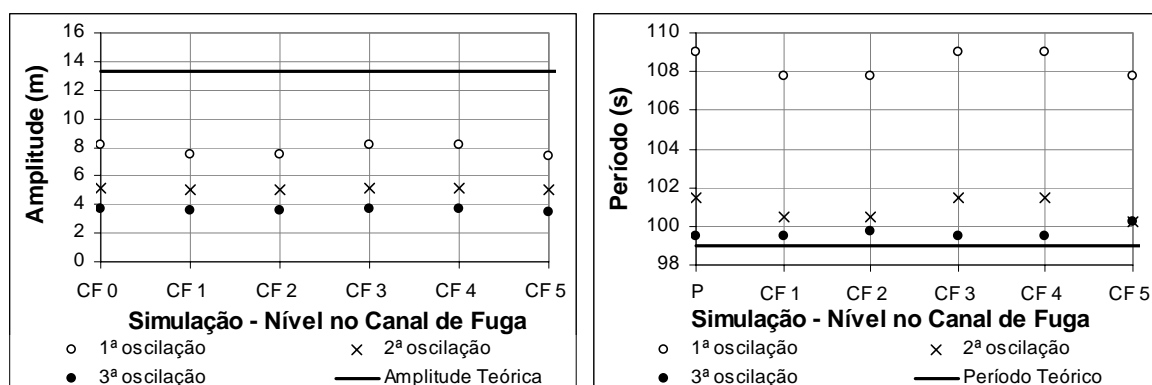


(d)

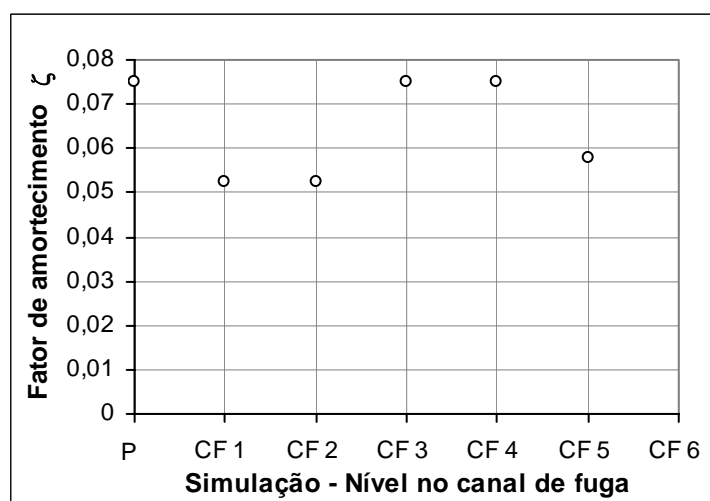


(e)

**Figura 113** – Comportamento da oscilação de nível na chaminé de equilíbrio variando o nível no canal de fuga. (a) Simulação padrão vs. CF1; (b) Simulação padrão vs. CF2; (c) Simulação padrão vs. CF3; (d) Simulação padrão vs. CF4; (e) Simulação padrão vs. CF5.



**Figura 114** – Comportamento das amplitudes das oscilações de nível na chaminé de equilíbrio segundo o nível no canal de fuga.



**Figura 115** – Comportamento do fator de amortecimento das oscilações de nível na chaminé de equilíbrio variando o nível no canal de fuga.

Observa-se que os períodos e as amplitudes foram maiores com a consideração da oscilação do nível no canal de fuga. A consideração destas oscilações afeta os períodos e amplitudes das oscilações, pois o nível no canal faz parte do cálculo do nível d'água na chaminé.

Como o nível d'água na chaminé encontra-se definido pela perda de carga existente, a elevação ou redução do nível no canal de fuga provoca um conseqüente deslocamento do nível na chaminé. Comparando os dados de CF3 e CF4, percebe-se que a única alteração foi a cota, pois períodos e amplitudes se mantiveram. Assim, verifica-se que o simples deslocamento do nível no canal de fuga não provoca alteração no amortecimento, no entanto, sua forma de consideração sim, sendo que o fator de amortecimento foi maior com a consideração da variação do nível no canal de fuga.

Uma consideração comum em projetos encontra-se representada pela simulação CF5. Percebe-se que os resultados de CF5 não se afastaram muito dos da simulação

Padrão, no entanto, se observa uma redução da amplitude das oscilações que, no caso de um canal com oscilações de maiores proporções relativas a chaminé, poderia causar uma subestimação importante das cotas extremas das variações de nível na chaminé.

#### 5.4.2.5 Tempo de fechamento do distribuidor

Para analisar a influência do tempo de fechamento do distribuidor uma nova simulação padrão foi estabelecida. Escolheu-se a Q5, pois esta simulação considerou a vazão variando linearmente entre dois instantes de tempo. Assim, a consideração da vazão foi feita da mesma forma nas simulações onde se varia o tempo de fechamento do distribuidor, o que impede que considerações subjetivas sobre o comportamento da curva de vazão, que oscilava na simulação padrão, provocassem efeitos que seriam confundidos com a influencia do parâmetro estudado neste item.

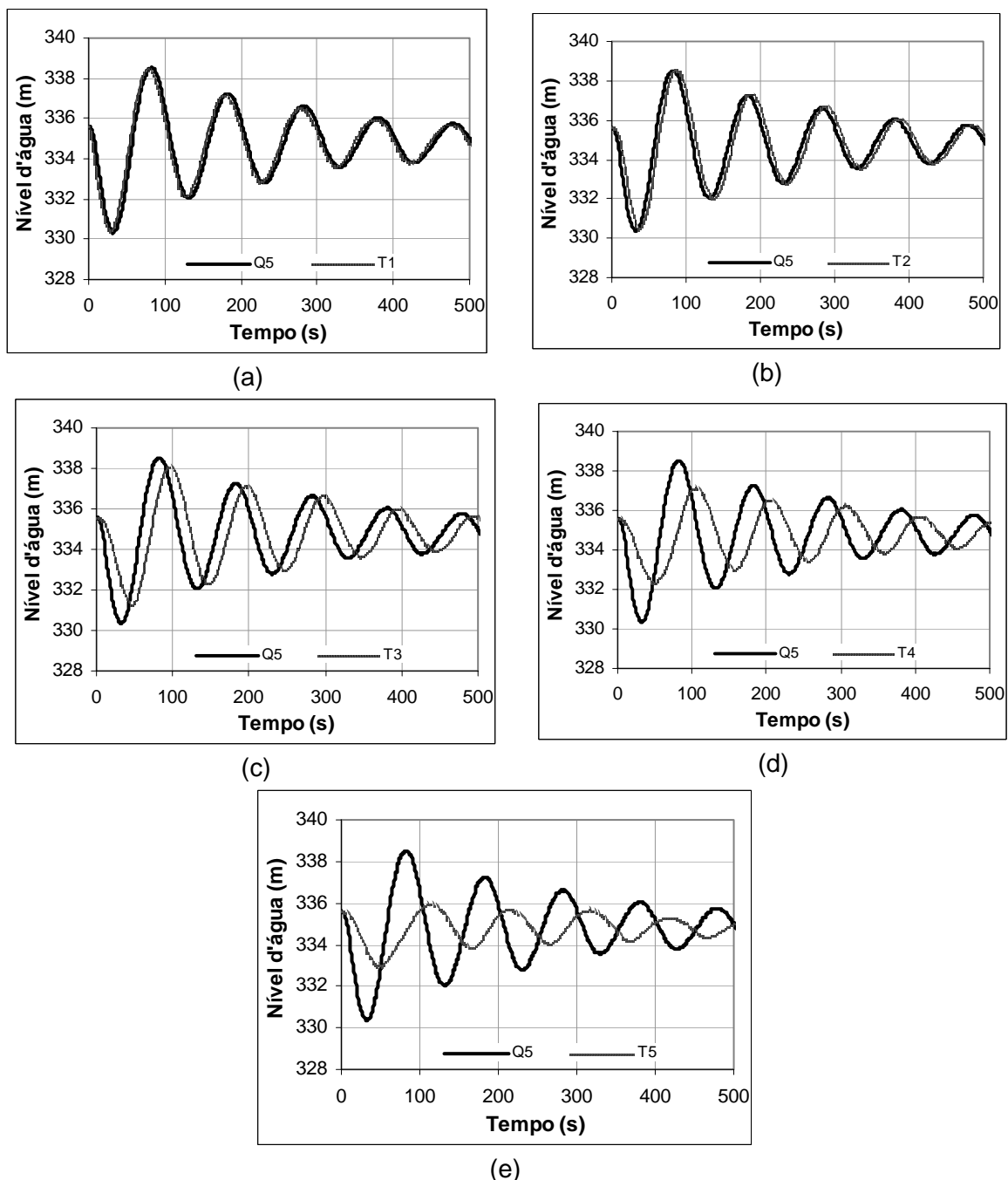
No Quadro 27 apresentam-se os tempos de fechamento do distribuidor considerados nas simulações.

**Quadro 27** - Tempos de fechamento do distribuidor considerados nas simulações.

| <b>Simulação</b> | <b>Tempo de fechamento do distribuidor</b> |
|------------------|--|
| Q5               | Igual a 10s                                |
| T1               | Igual a 0,1s                               |
| T2               | Igual a 20s                                |
| T3               | Igual a 40s                                |
| T4               | Igual a 60s                                |
| T5               | Igual a 80s                                |

O tempo aplicado em Q5 (10s) foi o tempo de fechamento do distribuidor registrado na rejeição de carga de 1º de outubro de 2004 ocorrida na Usina de Serra da Mesa, os demais valores foram estipulados para analisar a influência do parâmetro em questão, não condizendo com o tempo real de manobra do distribuidor da turbina na situação de uma rejeição de carga.

A comparação dos resultados da simulação padrão com os resultados das demais simulações citadas no Quadro 27 encontram-se na Figura 116.



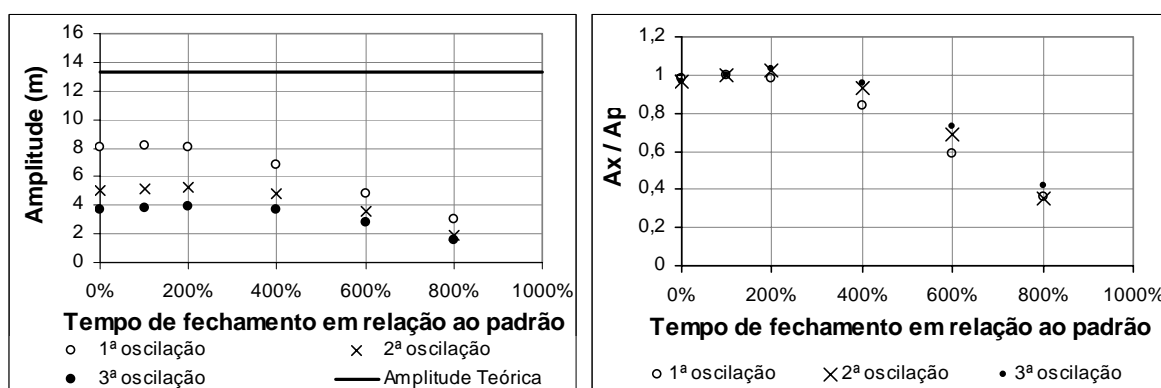
**Figura 116** – Comportamento da oscilação de nível na chaminé de equilíbrio variando o tempo de manobra. (a) Simulação Q5 vs. T1; (b) Simulação Q5 vs. T2; (c) Simulação Q5 vs. T3, (d) Simulação Q5 vs. T4, (e) Simulação Q5 vs. T5.

O Quadro 28 fornece informações quantitativas sobre as três primeiras oscilações de cada simulação e as Figuras 117, 118 e 119 apresentam o comportamento de amplitudes, períodos e fator de amortecimento das oscilações de nível, de acordo com o tempo de fechamento do distribuidor.

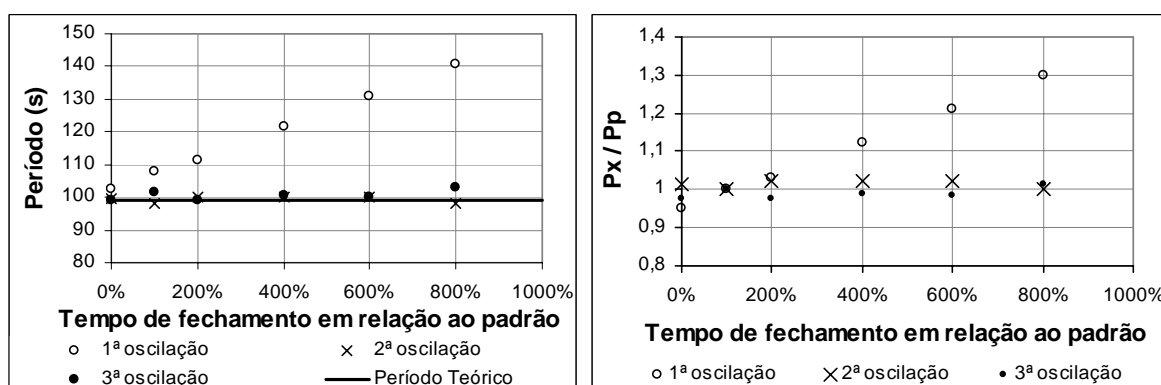
**Quadro 28** - Dados característicos das oscilações, para variação do tempo de fechamento do distribuidor.

| Simulação / Oscilação | Q5        |         | T1        |         | T2        |         |
|-----------------------|-----------|---------|-----------|---------|-----------|---------|
|                       | Amplitude | Período | Amplitude | Período | Amplitude | Período |
|                       | (m)       | (s)     | (m)       | (s)     | (m)       | (s)     |
| 1ª                    | 8,21      | 108     | 8,04      | 102,5   | 8,09      | 111,5   |
| 2ª                    | 5,2       | 98      | 5,03      | 99,5    | 5,31      | 100     |
| 3ª                    | 3,84      | 101,5   | 3,71      | 99      | 3,95      | 99      |

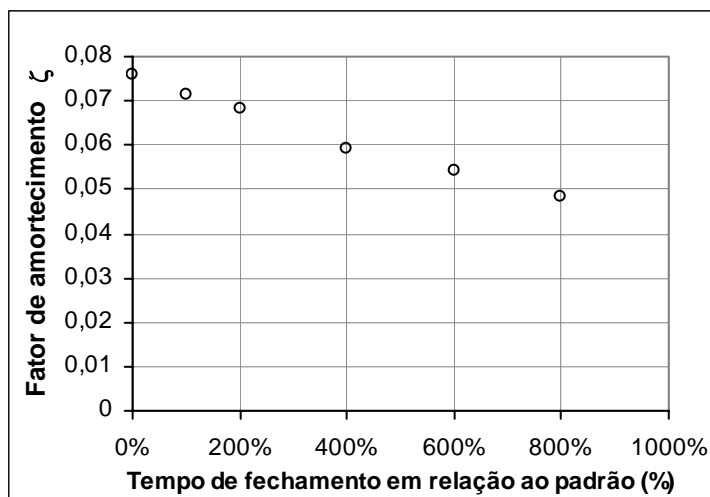
| Simulação / Oscilação | Q5        |         | T3        |         | T4        |         | T5        |         |
|-----------------------|-----------|---------|-----------|---------|-----------|---------|-----------|---------|
|                       | Amplitude | Período | Amplitude | Período | Amplitude | Período | Amplitude | Período |
|                       | (m)       | (s)     | (m)       | (s)     | (m)       | (s)     | (m)       | (s)     |
| 1ª                    | 8,21      | 108     | 6,86      | 121,5   | 4,79      | 131     | 2,97      | 140,5   |
| 2ª                    | 5,2       | 98      | 4,84      | 100     | 3,56      | 100     | 1,85      | 98      |
| 3ª                    | 3,84      | 101,5   | 3,67      | 100,5   | 2,8       | 100     | 1,62      | 103     |



**Figura 117** – Comportamento das amplitudes das oscilações de nível na chaminé de equilíbrio para as simulações que variam o tempo de fechamento do distribuidor.



**Figura 118** – Comportamento dos períodos das oscilações de nível na chaminé de equilíbrio para as simulações que variam o tempo de fechamento do distribuidor.



**Figura 119** – Comportamento do fator de amortecimento das oscilações de nível na chaminé de equilíbrio para as simulações que variam o tempo de fechamento do distribuidor.

As amplitudes, assim como o fator de amortecimento, foram tanto menores quanto maior o tempo de fechamento do distribuidor, o que era de se esperar, pois a manobra mesmo brusca propicia a variação mais lenta na vazão, solicitando menos água da chaminé para estabilização do sistema.

Com aumento do tempo de fechamento do distribuidor ocorreu o aumento do período da primeira oscilação, o que se justifica pelo fato da primeira oscilação ocorrer em paralelo com a manobra.

#### **5.4.3 Fase III - Simulação numérica de situações usuais de projeto – aplicado à Usina Hidrelétrica de Serra da Mesa**

As simulações realizadas nesta fase aplicaram parâmetros teóricos, que provavelmente seriam escolhidos na fase de dimensionamento da chaminé de equilíbrio, e os parâmetros obtidos com esta pesquisa. O objetivo foi a verificação da confiança dos projetos quando da utilização dos parâmetros teóricos no que diz respeito ao estabelecimento de dimensões para que a chaminé cumpra adequadamente suas funções.

Os parâmetros experimentais foram aplicados nas simulações com índice “a” e seus resultados, provavelmente, representariam os valores reais tendo em vista as análises feitas ao longo deste trabalho.

Para estabelecimento das condições de operação, ou seja, para determinação de potência e vazão máximas operantes, foi utilizado o diagrama de operação das turbinas e respeitadas as regiões de cavitação, onde as turbinas não devem trabalhar.

O primeiro par de simulações (1a e 1b) referem-se a rejeição de carga total das turbinas com operação inicial a plena carga, para uma situação normal sem extravasamento pelo vertedouro, nível de jusante igual a 333,75m. As características destas simulações encontram-se no Quadro 29.

**Quadro 29** – Características das simulações de situações de projeto – Nível inicial no canal de fuga igual a 333,75m – Rejeição de 1275MW

| <b>Simulação</b>                                   | <b>Simulação 1a</b>   | <b>Simulação 1b</b>   |
|--|---|---|
| <b>Vazão total inicial</b>                         | 1167,0 m <sup>3</sup> /s  | 1167,0 m <sup>3</sup> /s  |
| <b>Vazão total final</b>                           | 117,0 m <sup>3</sup> /s*  | 0,0 m <sup>3</sup> /s   |
| <b>Nível no canal de fuga</b>                      | 333,75 m – variável conforme ensaio do LAHE                           | Fixo = 333,75 m   |
| <b>Coeficiente de atrito</b>                       | Variável  | Fixo (0,0562)   |
| <b>Coeficientes de perdas de carga localizadas</b> | Saída da chaminé = 0,04<br>Curva 62,5° = 0,08<br>Saída do túnel = 0,1 | Saída da chaminé = 0,2<br>Curva 62,5° = 0,1<br>Saída do túnel = 0,7 |
| <b>Área da Chaminé</b>                             | 1360 m <sup>2</sup>   | 1360 m <sup>2</sup>   |
| <b>Área do túnel de fuga</b>                       | 293 m <sup>2</sup> , baseada no “as-built”                            | 288,37 m <sup>2</sup> , baseada no projeto                          |
| <b>Perímetro molhado do túnel de fuga</b>          | 66,56 m, baseado no “as-built”  | 65,15 m, baseado no projeto   |
| <b>Comprimento do túnel de fuga</b>                | 525 m   | 525 m   |
| <b>Tempo de manobra do distribuidor</b>            | 10 s, baseado nos registros experimentais                             | 8 s, baseado nas informações do fabricante*                         |

\* o tempo mínimo de fechamento sugerido por ELETROBRÁS (1985 e 1999) é igual a 6 s.

Para a geração da potência máxima unitária de 425 MW o ponto limite de funcionamento, antes da entrada na zona de cavitação da turbina, corresponde à vazão de 389,0 m<sup>3</sup>/s por unidade (Figura 33).

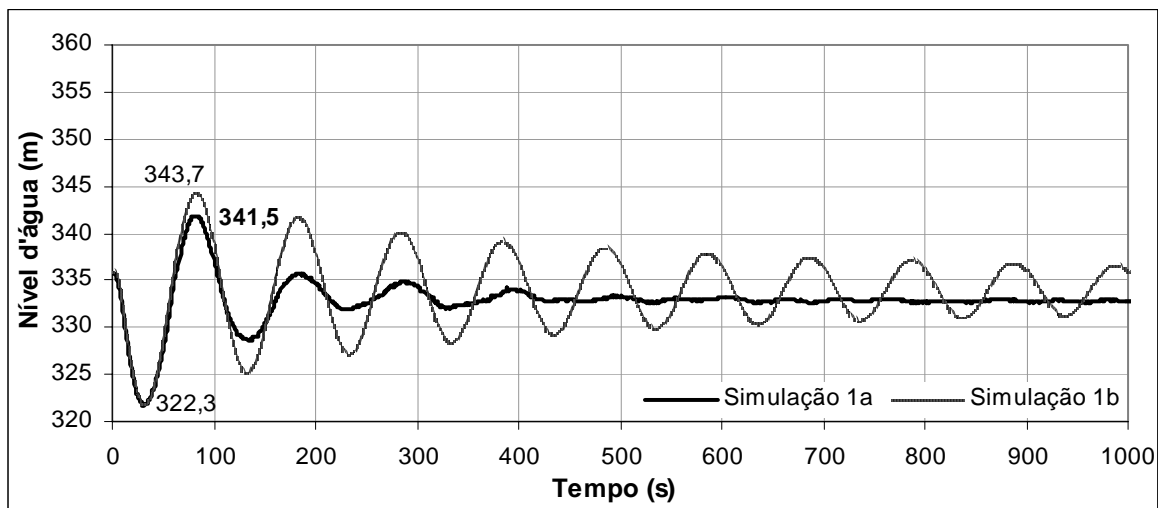
A vazão residual adotada na Simulação 1a corresponde a 10% da vazão inicial e foi estipulada, pois, sabe-se que as turbinas não vedam completamente quando da ocorrência de uma rejeição, fato que foi verificado através dos dados registrados durante a rejeição de 1° de outubro de 2004 na Usina de Serra da Mesa. Para a Simulação 1b adotou-se vazão final igual a zero, pois seria esta a situação normal de projeto.

Na Estrutura do LAHE foram realizados ensaios com o nível no canal de fuga em cota que corresponderia a 333,75 m e também 342,23 m com vazões também correspondentes as utilizadas nas simulações. Com base na comparação apresentada na Figura 90 e nos resultados obtidos quando da simulação da rejeição de 4 de julho de 1999, decidiu-se aplicar as oscilações de nível no canal de fuga da Estrutura do LAHE, corrigindo-se escala geométrica e temporal, nas simulações de índice “a”, como uma aproximação do que ocorreria na usina.

Quanto aos coeficientes de perda de carga, na Simulação 1a foram aplicados os coeficientes ajustados no Item 5.3.1, enquanto na Simulação 1b foram utilizados o

coeficiente de atrito obtido pelo Método de Colebrook e os coeficientes de perda de carga localizada médios sugeridos pela bibliografia.

A Figura 120 apresenta a comparação entre as Simulações 1a e 1b.



**Figura 120** – Comparação das oscilações de nível na chaminé de equilíbrio para as Simulações 1a e 1b.

Considerando que os resultados da Simulação 1a representem a realidade, as oscilações estariam entre 322,3 m e 341,5 m.

Na Simulação 1b ocorreu a combinação de efeitos de diversos parâmetros. O coeficiente de atrito fixo proporcionou um amortecimento mais lento, o nível no canal de fuga fixo e igual ao inicial atenuou o valor do extremo mínimo da primeira oscilação fazendo ainda com que o eixo em torno do qual ocorrem as oscilações ficasse mais alto. Com um diferencial de vazão maior que o da Simulação 1a, as amplitudes seriam amplificadas e, devido a redução da área do túnel, ocorreria um aumento de velocidade, perda de carga e nível na chaminé, com redução do amortecimento.

Com o somatório destes efeitos, a Simulação 1b forneceu o mesmo valor mínimo e um valor máximo superior aos registrado em 1a.

As Simulações 2a e 2b tiveram suas características definidas para a operação da usina com a carga máxima para nível no canal de fuga igual a 342,23 m, que é equivalente a enchente com período de retorno de 100 anos, correspondente ao nível máximo de operação a jusante.

Neste caso, respeitando a altura de queda e a zona de cavitação da turbina, a vazão encontrada para a geração da potência máxima foi igual a 370 m<sup>3</sup>/s por turbina.

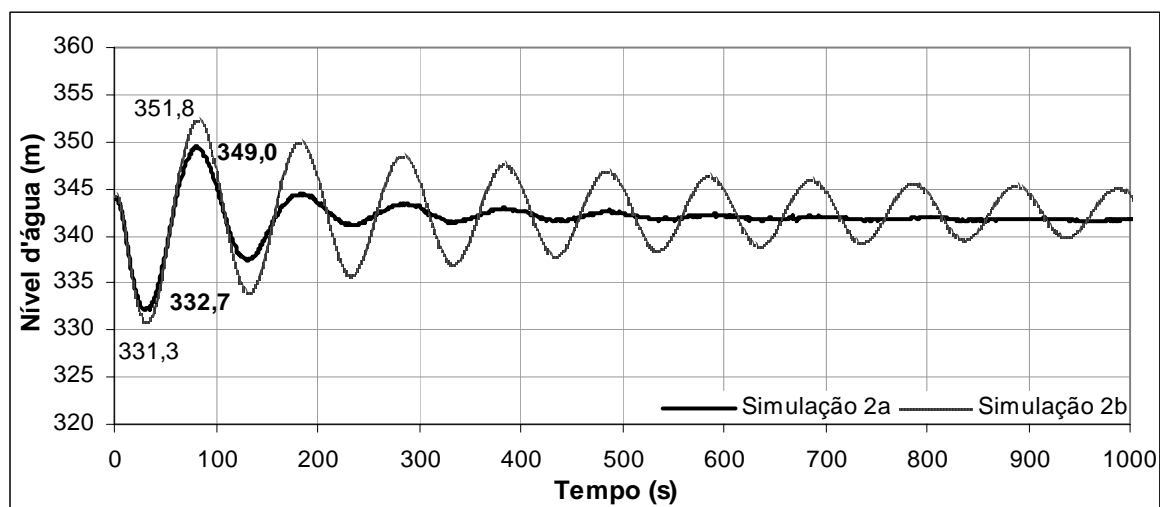
As características das Simulações 2a e 2b encontram-se na Quadro 30.



**Quadro 30** – Características das simulações de situações de projeto – Nível inicial no canal de fuga igual a 342,23 m – Rejeição de 1200 MW.

| Simulação                                   | Simulação 2a  | Simulação 2b  |
|---|---|---|
| Vazão total inicial                         | 1110,0 m <sup>3</sup> /s  | 1110,0 m <sup>3</sup> /s  |
| Vazão total final                           | 110,0 m <sup>3</sup> /s*  | 0,0 m <sup>3</sup> /s   |
| Nível no canal de fuga                      | 342,23 m – variável conforme ensaio do LAHE                           | Fixo = 342,23 m   |
| Coeficiente de atrito                       | Variável  | Fixo (0,0562)   |
| Coeficientes de perdas de carga localizadas | Saída da chaminé = 0,04<br>Curva 62,5° = 0,08<br>Saída do túnel = 0,1 | Saída da chaminé = 0,2<br>Curva 62,5° = 0,1<br>Saída do túnel = 0,7 |
| Área da Chaminé                             | 1360 m <sup>2</sup>   | 1360 m <sup>2</sup>   |
| Área do túnel de fuga                       | 293m <sup>2</sup> , baseada no “as-built”                             | 288,37 m <sup>2</sup> , baseada no projeto                          |
| Perímetro molhado do túnel de fuga          | 66,56 m, baseado no “as-built”  | 65,15 m, baseado no projeto   |
| Comprimento do túnel de fuga                | 525 m   | 525 m   |
| Tempo de manobra do distribuidor            | 10 s, baseado nos registros experimentais                             | 8 s, baseado nas informação do fabricante                           |

Os resultados das Simulações 2a e 2b encontram-se na Figura 121.



**Figura 121** – Comparação das oscilações de nível na chaminé de equilíbrio para as Simulações 2a e 2b.

A análise destas e das próximas simulações é bastante parecida com a das Simulações 1a e 1b. A diferença foi que o canal de fuga estando em cota mais elevada possui oscilações mais suaves, pois a sua superfície aumentou. Assim, o aumento da amplitude a primeira onda é menor em relação a simulação 1a.

As últimas simulações realizadas (3a e 3b) foram as correspondentes ao nível no canal de fuga igual a 349,79 m que seria a máxima enchente provável (aproximadamente

10.000 anos), uma situação excepcional que auxilia na determinação do nível máximo na chaminé de equilíbrio.

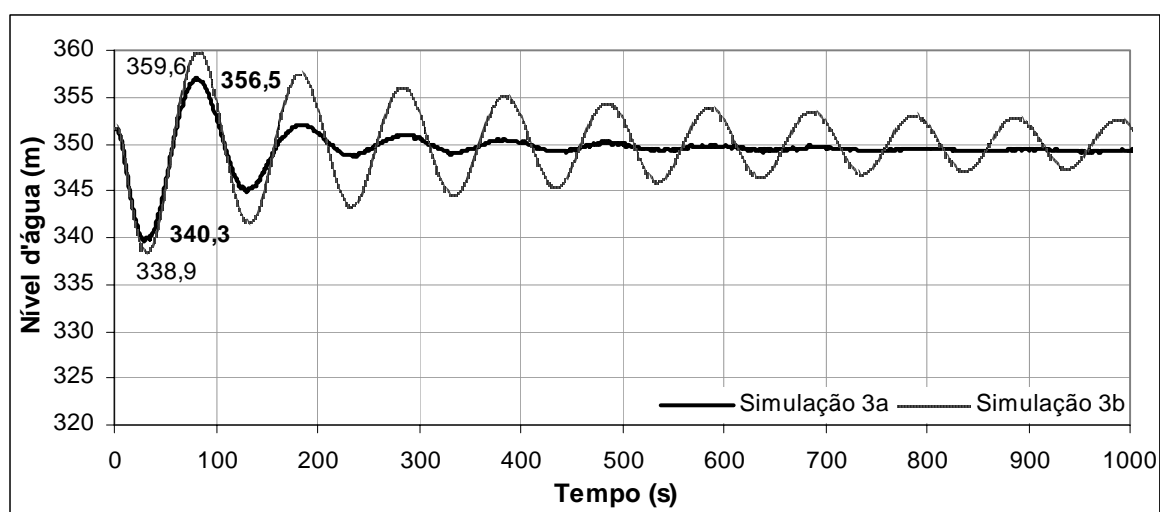
As características das Simulações 3a e 3b encontram-se na Quadro 31.

**Quadro 31** – Características das simulações de situações de projeto – Nível inicial no canal de fuga igual a 349,79 m. – Rejeição de 1325 MW.

| Simulação                                   | Simulação 3a  | Simulação 3b  |
|---|---|---|
| Vazão total inicial                         | 1110,0 m <sup>3</sup> /s  | 1110,0 m <sup>3</sup> /s  |
| Vazão total final                           | 110,0 m <sup>3</sup> /s*  | 0,0 m <sup>3</sup> /s   |
| Nível no canal de fuga                      | 349,79 m – variável conforme ensaio do LAHE                           | Fixo = 349,79 m   |
| Coeficiente de atrito                       | Variável  | Fixo (0,0562)   |
| Coeficientes de perdas de carga localizadas | Saída da chaminé = 0,04<br>Curva 62,5° = 0,08<br>Saída do túnel = 0,1 | Saída da chaminé = 0,2<br>Curva 62,5° = 0,1<br>Saída do túnel = 0,7 |
| Área da Chaminé                             | 1360m <sup>2</sup>  | 1360m <sup>2</sup>  |
| Área do túnel de fuga                       | 293 m <sup>2</sup> , baseada no “as-built”                            | 288,37 m <sup>2</sup> , baseada no projeto                          |
| Perímetro molhado do túnel de fuga          | 66,56 m, baseado no “as-built”  | 65,15 m, baseado no projeto   |
| Comprimento do túnel de fuga                | 525 m   | 525 m   |
| Tempo de manobra do distribuidor            | 10 s, baseado nos registros experimentais                             | 8 s, baseado nas informação do fabricante                           |

A condição da Simulação 3a não possuía um ensaio correspondente na Estrutura do LAHE, aplicou-se então a variação utilizada na Simulação 2a só que deslocada para a cota 349,79 m, introduzindo erros nos resultados, pois, com o nível mais alto no canal de fuga, suas oscilações seriam mais suaves e a amplitude na chaminé seria menor.

Os resultados das Simulações 3a e 3b encontram-se na Figura 122.



**Figura 122** – Comparação das oscilações de nível na chaminé de equilíbrio para as Simulações 3a e 3b.

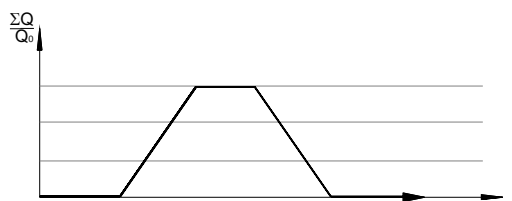
Supondo que as Simulações 1a, 2a e 3a reproduzam a realidade, principalmente no que diz respeito a amplitude da primeira onda, as oscilações se manteriam entre 322,3 m e 356,5 m para os casos simulados. Através das simulações que utilizam parâmetros comuns de projeto, estas oscilações estariam previstas entre 322,3 m e 359,6 m.

As simulações de índice “b” se mostraram a favor da segurança para determinação do nível d’água máximo na chaminé e também para determinação do nível mínimo nas simulações 2b e 3b, com os parâmetros teóricos escolhidos. No entanto, a Simulação 1b, importante na determinação do nível mínimo, não seguiu a tendência de superestimar os valores, o que sugere cuidado na escolha dos parâmetros para determinação deste nível.

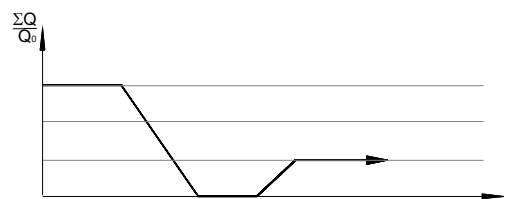
Com estes resultados, verificou-se que as simulações que adotam parâmetros teóricos podem ser utilizadas, desde que se apliquem valores adequados ao caso. Deve-se efetuar uma análise da possível faixa de variação de cada parâmetro, para ajudar escolha dos níveis extremos a serem considerados para a adoção da borda de segurança.

Cabe lembrar que não são estas as únicas situações críticas de funcionamento que devem ser utilizadas no dimensionamento das chaminés (Norma DIN 19704). Pode-se citar alguns exemplos:

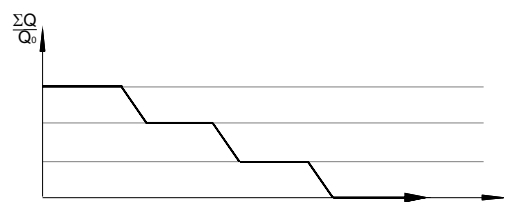
Partida das unidades para a carga plena e, após lapso de tempo mais desfavorável, rejeição total de carga das unidades.



Rejeição total de carga das unidades e, após lapso de tempo mais desfavorável, partida de uma das unidades.



Rejeição de carga total, uma unidade por vez, de forma consecutiva, com os lapsos de tempo mais desfavoráveis entre si.



## 6 CONCLUSÕES

Tendo em vista que o objetivo geral deste trabalho foi a avaliação da influência dos parâmetros físicos no dimensionamento de chaminés de equilíbrio simples, caso aplicado à Usina Hidrelétrica de Serra da Mesa, diversas etapas tiveram de ser desenvolvidas.

Inicialmente, realizou-se a aquisição de dados experimentais na Usina Hidrelétrica de Serra da Mesa e na Estrutura do LAHE, pertencentes a FURNAS. Estes dados foram referentes a situações de regimes permanentes, operação normal, e de regimes transientes, sendo utilizados no estudo da perda de carga linear em seus túneis e das características das oscilações em suas chaminés de equilíbrio. Os dados adquiridos apresentaram qualidade satisfatória aos objetivos desta pesquisa e, como os sinais registrados são bastante característicos, os ruídos foram facilmente identificados e filtrados.

Também foram feitas medições, em regime permanente, na Usina hidrelétrica de Salto Forqueta - CERTEL para o estudo da perda de carga em seu túnel. Neste caso, devido aos equipamentos utilizados, os dados registrados apresentaram um aumento na dispersão com o aumento da vazão, influenciados pelo movimento oscilatório decorrente da turbulência do escoamento na base da chaminé.

A quarta estrutura utilizada no estudo da perda de carga linear em túneis foi a Usina Hidrelétrica Bugres, cujos dados foram fornecidos pela sua proprietária a CEEE. Estes dados apresentaram dispersão constante e foram considerados de qualidade satisfatória.

A pesquisa sobre a perda de carga linear mostrou que os coeficientes de atrito em túneis podem variar segundo o número de Reynolds, mesmo sendo seu escoamento turbulento hidraulicamente rugoso, o que ocorreu nos casos onde o escoamento não chega a se desenvolver completamente, o que foi verificado com os dados de Serra da Mesa e Salto Forqueta. No entanto, os resultados apresentaram uma tendência a estabilização com o aumento do número de Reynolds.

O túnel da Hidrelétrica Bugres tem seção transversal circular e comprimento suficiente para o desenvolvimento do escoamento. Seus resultados aparentemente oscilariam em torno de um valor fixo para o coeficiente de atrito com a variação do número de Reynolds, passando sobre a linha correspondente a sua relação rugosidade/diâmetro no diagrama de Moody, como o esperado.

No túnel da Estrutura do LAHE, dois tipos de escoamento foram identificados. Para números de Reynolds ( $Re$ ) menores que  $1,2 \times 10^5$ , verificou-se que o escoamento era

de transição e o coeficiente de atrito se mostrou função do  $Re$ . A partir deste valor, o escoamento se apresentou turbulento hidraulicamente rugoso e coeficiente de atrito registrou valores estáveis.

Os dados experimentais das oscilações de nível d'água na chaminé de equilíbrio da Usina de Serra da Mesa durante rejeições de carga nela ocorridas, proporcionaram a validação dos modelos numéricos disponíveis. Com a comparação entre os dados experimentais e os resultados numéricos, confirmou-se que quanto maior a introdução de dados reais aos programas, maior a sua semelhança com os dados reais.

Estando os modelos numéricos aptos à previsão do comportamento do nível d'água em chaminés de equilíbrio simples durante regimes transientes, elegeu-se o CHAMINE-IPH para a utilização no decorrer da pesquisa, devido a sua maior simplicidade de uso frente aos modelos ESTRANHE e ESTRANHE-IPH e a sua maior versatilidade diante do modelo CHAMINE.

Analisando a influência dos parâmetros físicos no comportamento do nível d'água na chaminé de equilíbrio durante um regime transiente a partir dos resultados das simulações propostas, obtiveram-se as seguintes conclusões:

- Quanto à área da chaminé de equilíbrio:

Com o aumento da área da chaminé ocorreu a redução das amplitudes e o crescimento dos períodos das oscilações. Verificou-se que, para chaminés com área da ordem de grandeza da chaminé estudada, variações de 5% nesta área não causam erros que venham a comprometer a segurança dos projetos.

- Quanto ao comprimento do túnel:

A amplitude da primeira oscilação, importante para o projeto, aumentou inversamente ao aumento do comprimento do túnel enquanto seu período não sofreu grandes alterações. A análise da influência do comprimento do túnel de fuga está diretamente ligada a análise da influência da variação da perda de carga e conseqüentemente da diferença de nível entre a chaminé e o canal de fuga.

Variações de 5% no comprimento do túnel, tendo como base as características da estrutura estudada, causam erros que poderiam vir a comprometer a segurança do projeto. No entanto, erros desta ordem são raros de acontecer com este parâmetro.

- Quanto à área do túnel:

O aumento da área do túnel de fuga provocou redução dos períodos das oscilações e pequenas variações na amplitude da primeira oscilação. O aumento da área do túnel reduz a velocidade do escoamento e, portanto, a perda de carga, causando a diminuição da diferença de nível entre a chaminé e o canal de fuga,

assim, como no caso do comprimento do túnel de fuga, a análise da influência deve ser feita em conjunto com a destes fatores.

Variações de 5% na área do túnel causaram erros que poderiam comprometer a segurança do projeto, logo, como o processo de escavação dos túneis pode gerar áreas diferentes da estipulada em projeto, faz-se necessária a medição da área média construída e a verificação do projeto.

- Quanto à perda de carga:

Confirmou-se que menores coeficientes de perda de carga proporcionam amplitudes maiores, menor amortecimento e verificou-se que causam aumento do período para a primeira oscilação.

Constatou-se que, para o caso em estudo, a aplicação de coeficientes de atrito fixos e teóricos não permitiu a reprodução do transitório registrado na Usina de Serra da Mesa. Como os dados experimentais mostraram que o coeficiente de atrito do túnel desta usina varia com o número de Reynolds, conclui-se que, em uma situação de projeto, deve ser estudado o escoamento no circuito hidráulico em questão, para a escolha da forma mais adequada de consideração do coeficiente de atrito: fixo ou em função do número de Reynolds.

- Quanto à vazão:

Com o aumento da vazão as amplitudes foram maiores, os períodos menores e o fator de amortecimento teve seu valor reduzido.

As variações de 5% na vazão e a consideração de sua variação linear entre dois pontos não causaram diferenças significativas nos resultados das simulações, sendo então, erros ou simplificações admissíveis em um projeto, não causando prejuízo à segurança do mesmo.

- Quanto ao nível no canal de fuga:

Os períodos, as amplitudes e o fator de amortecimento foram maiores com a consideração das oscilações do nível no canal de fuga.

A consideração do nível no canal de fuga variando entre dois pontos, comum em projetos, apresentou redução da amplitude das oscilações. No caso de um canal com oscilações de maiores proporções relativas a chaminé, isso poderia causar uma subestimação importante das cotas extremas das variações de nível na chaminé, prejudicando o projeto. Porém, verificou-se que a utilização de dados de laboratório para o canal de fuga apresentou bons resultados, lembrando que no caso deste estudo as estruturas possuíam semelhança geométrica e de Froude.

- Quanto ao tempo de fechamento do distribuidor:

Para maiores tempos de fechamento do distribuidor, o transiente é mais lento, ocasionando amplitudes e fator de amortecimento menores, enquanto o período da primeira oscilação cresceu com o tempo de manobra, pois ambos ocorrem em paralelo.

Através dos resultados dos ensaios realizados na Estrutura do LAHE, verificou-se que para as situações de fechamento as amplitudes tenderam a crescer com o aumento do diferencial de vazão, ocorrendo o mesmo com a amplitude da primeira oscilação nos ensaios de abertura. Os períodos tenderam a ser estáveis.

Em praticamente todos os casos estudados, a amplitude teórica sugerida por ELETROBRÁS (1985 e 1999), foi superior aos resultados encontrados de forma numérica ou experimental. Quanto aos períodos, foi mais comum a aproximação dos valores da segunda e terceira oscilações com o período teórico.

Com o resultados das simulações de alguns casos considerados em projeto, aplicados a Usina de Serra da Mesa, utilizando parâmetros o mais próximo possível dos reais e parâmetros teóricos, verificou-se que as simulações que adotam parâmetros teóricos podem ser utilizadas no dimensionamento das chaminés de equilíbrio, desde que apliquem valores adequados ao caso em estudo, devendo ser verificados, dentro das possibilidades, no decorrer da obra.

## RECOMENDAÇÕES

Como os dados experimentais de protótipos são bastante importantes e raros, sugere-se que a Usina de Serra da Mesa continue sendo monitorada e que mais usinas instalem sistemas de aquisição de dados, disponibilizando os mesmo para estudos que venham futuramente a aperfeiçoar os atuais métodos de dimensionamento.

Para a Estrutura de LAHE, acredita-se que a substituição das válvulas existentes por “mini-turbinas” poderia vir a contribuir com a continuidade dos estudos sobre regimes transientes.

Recomenda-se, devido a sua grande utilização como condutores, que os túneis seção ferradura tenham suas características hidráulicas estudadas mais a fundo.

Conhecendo a aplicação de túneis com grande área transversal e comprimento reduzido para o desenvolvimento pleno do escoamento aconselha-se, mesmo conhecendo as dificuldades, que o escoamento não desenvolvido seja estudado para estas estruturas, a fim do aprimoramento dos projetos.

Como ocorreram semelhanças entre o comportamento do coeficiente de atrito dos túneis da Estrutura do LAHE e de Serra da Mesa, incentiva-se a pesquisa de relações para este coeficiente entre estruturas que trabalhem com semelhança de Froude e geométrica.

Recomenda-se, frente a adoção de parâmetros teóricos para o desenvolvimento do projeto de uma chaminé de equilíbrio simples, que toda a faixa de valores sugeridos pela bibliografia para os coeficientes de perda de carga seja inicialmente testada, que se apliquem a oscilações de nível no canal de fuga a partir de uma estrutura laboratorial semelhante, e que durante a execução da obra os parâmetros geométricos sejam ajustados a realidade e os coeficientes de perda de carga recalculados.



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. BAPTISTA, M.B., COELHO, M.M.L.P., CIRILO, J.A., MASCARENHAS, F.C.B. **Hidráulica aplicada**. 2ed. Porto Alegre: ABRH, 2003. 621p.
2. CASALAS, A.B. **Notas de aula: Métodos numéricos**. Programa de pós-graduação em recursos hídricos e saneamento ambiental do Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre: 2003.
3. CHAUDHRY, M.H. **Applied hydraulic transients**. Van Nostrand Reinhold Company, New York, 1979.
4. ELETROBRÁS, M.M.E. & D.N.A.E.E. **Manual de minicentraís hidrelétricas**. Ed. Especial para VI Simpósio Brasileiro de Hidrologia e Recursos Hídricos. São Paulo: 1985.
5. ELETROBRÁS. **Centrais hidrelétricas**. CD. 1999.
6. FRANCE, P.W. **A comparasion between experimental and numerical investigations of the motion of the water surface in a model surge tank**. Bangkok, Thailand: International conference on Water Resources Engineering, January, 1978.
7. GARNAYAK, M.K. **Hydraulic head losses in an unlined pressure tunnel of a high head power plant**. 2001.: [http://lchwww.epfl.ch/enseignement/postgrade/Diplome/1999-2001/Resumes/Resume\\_Garnayak.pdf](http://lchwww.epfl.ch/enseignement/postgrade/Diplome/1999-2001/Resumes/Resume_Garnayak.pdf) Acessado em 2003.
8. GILL, M.A., ASCE, M. **Oscillations in surge tanks**. Journal of the hydraulics divison, HY10, October, 1974.
9. GULLIVER, J.S., ARNDT, R.E.A. **Hidropower engineering handbook**. Magraw-hill, 1991.
10. HALLIWELL, A.R. **Velocity of a water-hammer in an elastic pipe**. Journal of the hydraulics divison, HY4, July, 1963.
11. IDELCHIK, I.E. **Handbook of hydraulic resistance**. 3ed.New York: Begell House, Inc., 1996. 790p.
12. JAEGER, C. **Fluid Transients in a Hydro-Eletric Engineering Practice**. London: Blackie, 1977. 413p.
13. LEOPARDI, M. **On roughness similarity of hydraulic models**. Journal of Hydraulic Research, vol. 42, n° 3, 2004. pp. 239-245.
14. LIU, M. & ZHU D.Z. **Study of tunnel outlet head-loss coefficient**. Canadian Journal of Civil Engineering, 27(6), 2000. 1306-1310.

15. MAESTRI, R.D. **Transientes hidráulicos em condutos fechados**. Dissertação de mestrado. Porto Alegre - RS: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1985.
16. MEIROVITCH, L. **Fundamentals of vibrations**. McGraw-Hill, United States, 2001. 806p.
17. MENÉNDEZ, P.C.Z. **Análise numérica de transientes hidráulicos com microcomputador usando o método dos elementos finitos**. Dissertação de mestrado. Porto Alegre - RS: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1985.
18. MUNSON, B.R., YOUNG, D.F., OKIISHI, T.H. **Fundamentos de mecânica dos fluidos**. Tradução da 2ed. Americana, vol. 2. São Paulo: Edgard Blücher Ltda, 1997.
19. NABER, G. **Mass oscillations in surge tanks**. Water Power, Vol 16, June, 1964, pp. 264-270.
20. NETTO, A., FERNANDEZ, M.F., ARAÚJO, R., ITO, A.E. **Manual de Hidráulica**. 8ed. São Paulo: Edgard Blücher Ltda, 1998.
21. PENNINGTON M.S. **Hydraulic roughness of bored tunnel**. Paper on internet, IPENZ Transactions, Vol.25, No. 1/CE,1998.:<http://www.ipenz.org.nz/ipenz/publications/indexes/transaction/transactions98/civil/2pennington.pdf> Acessado em 2003.
22. PORTO, R.M. **Hidráulica básica**. 2ed. São Paulo, 2001.
23. RAHM, L. **Friction losses in Swedish rock tunnels**. Water Power, December,1958. pp. 457-464.
24. REINIUS E. **Head losses in unlined rock tunnels**. Water Power July / August 1970.
25. SANTOS, R.M.N., CASTRO, M.A.H. **Modelagem Computacional de Transientes Hidráulicos em Sistemas de Recalque**, IV SEREA - Seminário Hispano-Brasileiro sobre Sistemas de Abastecimento Urbano de Água. João Pessoa - PB, 2004. [http://www.lrh.ct.ufpb.br/serea/trabalhos/A19\\_33.pdf](http://www.lrh.ct.ufpb.br/serea/trabalhos/A19_33.pdf) Acessado em 2003.
26. SCHREIBER, G.P. **Usinas hidrelétricas**. São Paulo: Edgard Blücher, 1977. 238p.
27. SCHIOZER, D. **Mecânica dos fluidos**. 2ed.Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 1996.
28. SILVA, I.A., SILVA, T.C. **Aplicação de uma formulação simplificada para cálculo do coeficiente de atrito de escoamento em condutos não circulares**. In: XII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Anais, Vitória-ES, 1997.

29. SINNIGER, R.O., HAGER, W.H. **Constructions hydrauliques : écoulements stationnaires**. Lausanne : Presses Polytechniques Romandes, 1989. 439 p.
30. STREETER, V.L., LAI, C. **Water-hammer analysis including fluid friction**. Journal of the hydraulics division, HY3, May, 1962.
31. U. S. ARMY CORPS OF ENGINEERS. Waterways Experiment Station, **Hydraulic Design Criteria**. Vicksburg, Mississippi, 1973.
32. VIEIRA, R.M. **Uma investigação dos fenômenos transitórios em usinas hidrelétricas reversíveis**. Dissertação de mestrado. Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro, 1991.
33. WYLIE, E.B., STREETER, V. L. **Fluid transients in systems**. New Jersey: Prentice-hall, Inc., 1993. 463p.
34. YE, F., YANG, X., WANG, S. **Turbine governing and surge-tank stability**. Journal of hydraulic research, vol.30, 1992, Nº.1.
35. ZULCY, S., FUCHS, R.D., SANTOS, A.H.M. **Centrais hidro e termelétricas**. São Paulo: Edgard Blücher; Itajubá, MG: Escola Federal de Engenharia, 1983. 241p.
36. ZULCY, S., SANTOS, A.H.M., BORTONI, E.C. **Centrais hidrelétricas: estudos para implementação**. Rio de Janeiro: ELETROBRÁS, 1999. 425p.