

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL**

**Eliane Conterato**

**ESCOAMENTO SOBRE VERTEDOIRO EM DEGRAUS COM  
DECLIVIDADE 1V:0,75H: CARACTERIZAÇÃO DAS  
PRESSÕES E CONDIÇÕES DE AERAÇÃO**

Porto Alegre  
dezembro 2011

**ELIANE CONTERATO**

**ESCOAMENTO SOBRE VERTEDOURO EM DEGRAUS COM  
DECLIVIDADE 1V:0,75H: CARACTERIZAÇÃO DAS  
PRESSÕES E CONDIÇÕES DE AERAÇÃO**

Trabalho de Diplomação apresentado ao Departamento de Engenharia Civil da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do título de Engenheiro Civil

**Orientador: Marcelo Giulian Marques**  
**Coorientador: Alexandre Augusto Mees Alves**

Porto Alegre  
dezembro 2011

**ELIANE CONTERATO**

**ESCOAMENTO SOBRE VERTEDOIRO EM DEGRAU COM  
DECLIVIDADE 1V:0,75H: CARACTERIZAÇÃO DAS  
PRESSÕES E CONDIÇÕES DE AERAÇÃO**

Este Trabalho de Diplomação foi julgado adequado como pré-requisito para a obtenção do título de ENGENHEIRO CIVIL e aprovado em sua forma final pelos Professores Orientadores e pela Coordenadora da disciplina Trabalho de Diplomação Engenharia Civil II (ENG01040) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, 19 de dezembro de 2011

Prof. Marcelo Giulian Marques  
PhD. pela Université Laval  
Orientador

Alexandre Augusto Mees Alves  
Mc. pela UFRGS  
Co-orientador

Profa. Carin Maria Schmitt  
Coordenadora

**BANCA EXAMINADORA**

**Marcelo Giulian Marques**  
PhD. pela Université Laval

**Luiz Augusto Magalhães Endres**  
Dr. pela UFRGS

**Maurício Dai Prá**  
Dr. pela UFRGS

**Alexandre Augusto Mees Alves**  
Mc. pela UFRGS

Dedico este trabalho a meus pais, Antonio (*in memoriam*)  
e Ana, que me ensinaram o que eu nunca encontraria em  
livros.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço à minha família, pelo incentivo, pela motivação, pelo consolo e ajuda em todos os momentos de minha vida.

Ao Prof. Marcelo Marques, orientador deste trabalho, pela dedicação, compreensão e valiosos ensinamentos desde o início de meu trabalho como bolsista no Laboratório de Obras Hidráulicas. Por estar sempre presente, tanto com apoio técnico e científico quanto com amizade e incentivo.

Ao Prof. Luiz Endres pelas sugestões e atenção ao longo do tempo que fui bolsista de iniciação científica no laboratório.

Ao Mc. Alexandre Mees, coorientador deste trabalho e doutorando na mesma linha de pesquisa, pela atenção, colaboração e principalmente pela amizade e companheirismo.

Ao Prof. Maurício Dai Prá, que trabalhou na mesma linha de pesquisa, pela colaboração com material e sugestões.

Aos colegas do Laboratório de Obras Hidráulicas pelo companheirismo e atenção. Especialmente aos colegas que trabalharam na mesma linha de pesquisa: Camila, João e Max, pela ajuda na realização dos ensaios.

Ao Franco, minha gratidão pela motivação e apoio, tornando os momentos difíceis mais amenos. Pela compreensão, carinho e cumplicidade sempre que precisei e principalmente pela serenidade que sempre me transmitiu.

À Prof. Carin Maria Schmitt, coordenadora das disciplinas de Trabalho de Diplomação, pela dedicação.

À Dona Francisca Energética S/A e CNPQ pelo financiamento do projeto de pesquisa e bolsa de iniciação científica.

Não se pode ensinar nada a um homem; só é possível ajudá-lo a encontrar a resposta dentro de si mesmo.

*Galileu Galilei*

## RESUMO

O vertedouro em degraus tem se tornado uma boa opção quando se utiliza o concreto compactado a rolo (CCR), principalmente por apresentar uma dissipação de energia ao longo do perfil do vertedouro, o que faz com que diminua a parcela de energia que precisa ser dissipada à jusante do barramento, ocasionando uma significativa redução no tamanho da estrutura de dissipação. Entretanto, com a ocorrência de variações de pressões significativas, os degraus podem sofrer danos por arrancamento do concreto e cavitação. Este trabalho visa determinar as características das pressões ao longo do perfil de um vertedouros em degraus com declividade 1V:0,75H e degraus com altura de 6 cm, de maneira a orientar o dimensionamento dos mesmos na fase de projeto. Durante os ensaios de laboratório foram obtidos dados de pressões médias e instantâneas e posições de início da aeração ao longo da calha. Com os dados obtidos, foi possível determinar o comportamento das pressões médias e pressões com probabilidade de não serem excedidas de 0,1%, 1%, 99% e 99,9% a fim de caracterizar o comportamento das pressões médias, mínimas e máximas.

Palavras-chave: Vertedouro em Degraus. Aeração do escoamento. Pressões nos Degraus. Cavitação.

## LISTA DE FIGURAS

|   |    |
|---|----|
| Figura 1 – Esquema do desenvolvimento das etapas do trabalho .....  | 17 |
| Figura 2 – Barragem de Arkananian, Grécia, datada de 1.300 a.C. ....  | 20 |
| Figura 3 – Barragem da UHE Dona Francisca, RS, Brasil .....   | 20 |
| Figura 4 – escoamento em quedas sucessivas sobre vertedouro em degraus .....  | 22 |
| Figura 5 – escoamento deslizante sobre turbilhões em vertedouro em degraus .....  | 23 |
| Figura 6 – Caracterização da aeração no escoamento .....  | 24 |
| Figura 7 – Dimensões da calha em degrau .....   | 26 |
| Figura 8 – Envoltória de resultados de posições de início de aeração de diversos autores .....  | 27 |
| Figura 9 – Envoltória de resultados de profundidade de escoamento de diversos autores .....   | 27 |
| Figura 10 – Comparação de posições de início de aeração coletados por diversos autores .....  | 28 |
| Figura 11 – Comparação entre profundidade do escoamento coletados por diversos autores .....  | 28 |
| Figura 12 – Dissipação de energia em relação à energia de montante – comparações entre vários autores .....   | 29 |
| Figura 13 – Dissipação de energia em relação a um vertedouro liso – pontos sem preenchimento correspondem a escoamentos em vertedouros em degraus ..... | 30 |
| Figura 14 – Coeficientes de pressão média ( $C_{pm}$ ) para o espelho .....   | 33 |
| Figura 15 – Coeficientes de pressões extremas para o espelho .....  | 33 |
| Figura 16 – Coeficientes de pressão média ( $C_{pm}$ ) para o patamar .....   | 34 |
| Figura 17 – Coeficientes de pressões extremas para o patamar .....  | 34 |
| Figura 18 – Pressões adimensionalizadas com relação à energia cinética do escoamento .....  | 35 |
| Figura 19 – Comportamento do coeficiente de pressão ( $K$ ) para a calha com degrau de 9 cm de altura .....   | 35 |
| Figura 20 – Evolução do parâmetro crítico de incipiência de cavitação ( $\sigma_{cr}$ ) ao longo do escoamento .....                                    | 38 |
| Figura 21 – Vazões específicas críticas obtidas pela transposição dos resultados .....  | 38 |
| Figura 22 – Velocidades médias críticas obtidas pela transposição dos resultados .....  | 39 |
| Figura 23 – Ilustração do modelo utilizado .....  | 41 |
| Figura 24 – Detalhe do vertedouro em degraus .....  | 41 |
| Figura 25 – Curva de descarga do vertedouro e resultados do medidor eletromagnético .....   | 42 |
| Figura 26 – Detalhe dos equipamentos de medição .....   | 44 |
| Figura 27 – Numeração dos transdutores .....  | 45 |
| Figura 28 – Disposição dos transdutores .....   | 45 |
| Figura 29 – Início da aeração do escoamento .....   | 46 |
| Figura 30 – Resultados de posições de início de aeração de diversos autores .....   | 49 |

|  |    |
|--|----|
| Figura 31 – Valores de $L_a/k$ para diversos autores e equação proposta.....   | 50 |
| Figura 32 – Valores de $h_a/k$ de diferentes autores e equação de ajuste .....   | 51 |
| Figura 33 – Valores de pressão média para o patamar para a vazão de 40L/s e $F^*$ de 5,23 <b>Erro!</b><br><b>Indicador não definido.</b> |    |
| Figura 34 – Valores de pressão média para o espelho para a vazão de 40L/s e $F^*$ de 5,23 <b>Erro!</b><br><b>Indicador não definido.</b> |    |
| Figura 35 – Esquema das pressões positivas e negativas agindo no patamar e espelho<br>respectivamente.....                               | 52 |
| Figura 36 – $C_p$ para pressão média para o espelho .....  | 53 |
| Figura 37 – $C_p$ para pressão com probabilidade de não ser excedida de 1% para o espelho ...  | 54 |
| Figura 38 – $C_p$ para pressão com probabilidade de não ser excedida de 0,1% para o espelho  | 54 |
| Figura 39 – $C_p$ para pressão média para o patamar.....   | 55 |
| Figura 40 – $C_p$ para pressão com probabilidade de não ser excedida de 1% para o patamar ..   | 56 |
| Figura 41 – $C_p$ para pressão com probabilidade de não ser excedida de 0,1% para o patamar  | 56 |
| Figura 42 – $C_p$ para pressão com probabilidade de não ser excedida de 99% para o patamar   | 57 |
| Figura 43 – $C_p$ para pressão com probabilidade de não ser excedida de 99,9% no patamar ...   | 57 |

## **LISTA DE QUADROS**

|  |    |
|--|----|
| Quadro 1 – Equações sugeridas por diversos autores para posições de início de aeração e profundidade do escoamento nessa posição ..... | 25 |
|--|----|

## LISTA DE TABELAS

|  |    |
|--|----|
| Tabela 1 – Valores de comprimento de aeração e $F^*$ ..... | 48 |
|--|----|

## SUMÁRIO

|  |           |
|--|-----------|
| <b>1 INTRODUÇÃO</b> .....  | <b>13</b> |
| <b>2 DIRETRIZES DA PESQUISA</b> .....  | <b>15</b> |
| 2.1 QUESTÃO DE PESQUISA .....  | 15        |
| 2.2 OBJETIVOS DO TRABALHO.....   | 15        |
| <b>2.2.1 Objetivo principal</b> .....  | <b>15</b> |
| <b>2.2.2 Objetivos secundários</b> .....   | <b>15</b> |
| 2.3 PREMISSA.....  | 16        |
| 2.4 DELIMITAÇÕES .....   | 16        |
| 2.5 LIMITAÇÕES .....   | 16        |
| 2.6 DELINEAMENTO .....   | 16        |
| <b>3 ESTRUTURAS EM DEGRAUS</b> .....   | <b>19</b> |
| 3.1 APLICAÇÃO DE ESTRUTURAS EM DEGRAUS .....                                       | 19        |
| 3.2 HISTÓRICO DA UTILIZAÇÃO DE ESTRUTURAS EM DEGRAUS.....                          | 19        |
| <b>4 CARACTERIZAÇÃO DO ESCOAMENTO SOBRE CALHAS DE VERTEDOUROS EM DEGRAUS</b> ..... | <b>21</b> |
| 4.1 TIPOS DE ESCOAMENTO.....   | 21        |
| <b>4.1.1 Escoamento em quedas sucessivas</b> .....                                 | <b>21</b> |
| <b>4.1.2 Escoamento de transição</b> .....   | <b>22</b> |
| <b>4.1.3 Escoamento deslizante sobre turbilhões</b> .....                          | <b>22</b> |
| 4.2 AERAÇÃO DO ESCOAMENTO .....  | 23        |
| 4.3 DISSIPACÃO DE ENERGIA .....  | 29        |
| 4.4 PRESSÕES AO LONGO DA CALHA .....   | 30        |
| 4.5 CAVITAÇÃO .....  | 36        |
| <b>5 METODOLOGIA EXPERIMENTAL</b> .....  | <b>40</b> |
| 5.1 INSTALAÇÃO EXPERIMENTAL.....   | 40        |
| <b>5.1.1 Descrição do Modelo</b> .....   | <b>40</b> |
| <b>5.1.2 Critério de semelhança</b> .....  | <b>42</b> |
| 5.2 SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS.....   | 43        |
| <b>5.2.1 Aquisição de Dados de Pressão ao Longo da Calha</b> .....                 | <b>43</b> |
| <b>5.2.2 Aquisição de Dados de Aeração do Escoamento ao Longo da Calha</b> .....   | <b>46</b> |
| 5.3 CONSIDERAÇÕES GERAIS DE ENSAIO.....  | 46        |
| <b>6 RESULTADOS E ANÁLISE</b> .....  | <b>48</b> |
| 6.1 RESULTADOS REFERENTES À AERAÇÃO DO ESCOAMENTO.....                             | 48        |

|   |           |
|---|-----------|
| 6.2 RESULTADOS REFERENTES ÀS PRESSÕES NOS DEGRAUS .....   | 52        |
| <b>7 CONCLUSÕES.....</b>                                  | <b>59</b> |
| 7.1 CONCLUSÕES QUANTO AO INÍCIO DA AERAÇÃO.....           | 59        |
| 7.2 CONCLUSÕES QUANTO AO COMPORTAMENTO DAS PRESSÕES ..... | 59        |
| <b>7.2.1 Características das pressões no espelho.....</b> | <b>59</b> |
| <b>7.2.1 Características das pressões no patamar.....</b> | <b>60</b> |
| 7.3 RECOMENDAÇÕES .....                                   | 60        |



## 1 INTRODUÇÃO

Vertedouros são estruturas de proteção de barragens, que permitem a descarga segura do excesso de água das enchentes. Uma das preocupações na construção é transpor o escoamento de forma que não cause danos a jusante do barramento. A utilização da técnica de construção do vertedouro por degraus ao longo do perfil da calha possibilita uma maior dissipação da energia do escoamento durante a queda em relação a um vertedouro convencional (calha lisa). Isto permite a diminuição das dimensões da estrutura de dissipação à jusante do sistema extravasor. Atualmente, a execução da calha em degraus é considerada viável tecnicamente e economicamente.

Por uma questão estrutural vertedouros e canais em degraus são estruturas utilizadas desde a Antiguidade. Porém, até 1970, as informações sobre vertedouros em degraus não eram suficientes para um adequado dimensionamento desse tipo de estrutura. A partir dessa década, com o desenvolvimento do concreto compactado a rolo (CCR), começaram a ser utilizados com mais frequência e os estudos em modelos experimentais vêm sendo utilizados para tentar entender as características do escoamento sobre calhas em degraus com o objetivo de estabelecer critérios de dimensionamento.

Vários autores como Tozzi (1992), Mattos (1999), Chanson (2001), Sanagiotto (2003), Dai Prá (2004), Gomes (2006) desenvolveram métodos e critérios para dimensionamento de vertedouros em degraus. Cada autor abrange em seu trabalho um ou mais aspectos do escoamento como início de aeração, dissipação de energia, pressões extremas nos degraus, zonas de cavitação, por exemplo.

A maioria dos trabalhos aborda a energia residual no pé do vertedouro, de maneira a possibilitar o dimensionamento da estrutura de dissipação a jusante. O estudo do comportamento das pressões sobre a calha é aspecto menos abordado pela bibliografia. Porém, esse fator merece atenção, principalmente nos casos nos quais não se detecta aeração, devido à possibilidade de haver a ocorrência de pressões negativas que possam vir a provocar cavitação. Esse fenômeno pode vir a danificar a estrutura do descarregador devido a forte onda de pressão causada pela implosão das bolhas de ar formadas devido ao descolamento do escoamento junto a quina do degrau.

Atualmente, a tendência é se construir vertedouros com maiores vazões específicas (vazão por unidade de comprimento), propiciando o aumento do risco de cavitação. Portanto, conhecer o comportamento das pressões ao longo da calha é de fundamental importância para estabelecer limites de utilização dentro da eficiência e segurança esperada.

Esse trabalho aborda a distribuição longitudinal das pressões dinâmicas ao longo da calha do vertedouro em degraus com declividade 1V:0,75H e degraus de 6 cm de altura. Fatores como comportamento das pressões e aeração do escoamento foram estudados e comparados com a bibliografia. Com os resultados pretende-se contribuir para a melhor compreensão das características do escoamento e melhorar os critérios de dimensionamento desse tipo de estrutura.

No capítulo seguinte serão abordados os objetivos da pesquisa considerando as limitações impostas pela estrutura, tempo e custo. Serão apresentadas as etapas do trabalho que foram organizadas previamente para o bom desenvolvimento da pesquisa.

O terceiro capítulo aborda uma breve descrição sobre estruturas em degraus, sua aplicação nos mais variados tipos de obras hidráulicas ou obras com fins paisagísticos comprovando que cada vez mais, no Brasil e no mundo, sua utilização vem aumentando.

O quarto capítulo apresenta as características do escoamento sobre um vertedouro em degraus, abordando os diferentes tipos de escoamento, o desenvolvimento da aeração ao longo da calha e o comportamento das pressões nos degraus. Também é apresentada uma abordagem sobre a dissipação de energia em relação a um vertedouro convencional e suas implicações no projeto de uma obra.

No quinto capítulo são apresentados a metodologia, o modelo e os equipamentos utilizados. É feita uma descrição dos ensaios, dos métodos utilizados e das vazões específicas ensaiadas, além do critério utilizado para transposição dos resultados de modelo para protótipo e as demais considerações sobre a fase de ensaios.

O sexto capítulo apresenta os resultados obtidos a validação dos dados, a posição de início de aeração e o comportamento das pressões médias, mínimas e máximas ao longo da calha do vertedouro em degrau. O sétimo capítulo aponta as principais conclusões e recomendações.

## **2 DIRETRIZES DA PESQUISA**

Neste trabalho é apresentada a distribuição longitudinal das pressões médias, mínimas e máximas em uma calha de um vertedouro em degraus com declividade 1V: 0,75H e altura de degrau de 6 cm obtidas em um modelo físico bidimensional de laboratório. Os dados foram coletados no Laboratório de Obras Hidráulicas, no Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. As diretrizes adotadas neste trabalho estão apresentadas neste capítulo.

### **2.1 QUESTÃO DE PESQUISA**

A questão de pesquisa deste trabalho é: qual o comportamento das pressões e condições de aeração para o vertedouro em degraus estudado?

### **2.2 OBJETIVOS DO TRABALHO**

Os objetivos do trabalho estão classificados em principal e secundários e serão apresentados nos próximos itens.

#### **2.2.1 Objetivo principal**

O objetivo principal deste trabalho é a caracterização do escoamento para previsão do comportamento das pressões e condições de aeração sobre a calha de vertedouros em degraus com declividade 1V:0,75H.

#### **2.2.2 Objetivos secundários**

Os objetivos secundários deste trabalho são:

- a) demarcação da posição de início da aeração do escoamento;

- b) verificação da ocorrência de pressões negativas;
- c) avaliação do comportamento das pressões médias;
- d) avaliação do comportamento das pressões com probabilidade de não serem excedidas iguais a: 0,1%, 1%, 99% e 99,9%.

### 2.3 PREMISSA

O trabalho tem por premissa que, sendo a declividade de 1V:0,75H a mais usual em vertedouros em degraus, esta é a mais adequada para o desenvolvimento de estudos em modelos e que pressões negativas nessas obras hidráulicas podem atingir valores que propiciam a ocorrência do fenômeno de cavitação.

### 2.4 DELIMITAÇÕES

O trabalho delimita-se a caracterizar o comportamento das pressões e da aeração sobre a calha de vertedouros em degraus com declividade 1V:0,75H e altura de degrau de 0,6 m em protótipo (6 cm em modelo experimental) considerando uma escala geométrica de 1:10.

### 2.5 LIMITAÇÕES

São limitações do trabalho:

- a) vazão específica mínima do modelo: 0,10 m<sup>3</sup>/s/m, (3,20 m<sup>3</sup>/s/m em protótipo);
- b) vazão específica máxima do modelo: 0,27 m<sup>3</sup>/s/m, (8,70 m<sup>3</sup>/s/m em protótipo);
- c) escala geométrica para transposição dos valores do modelo experimental para protótipo igual a 1:10.

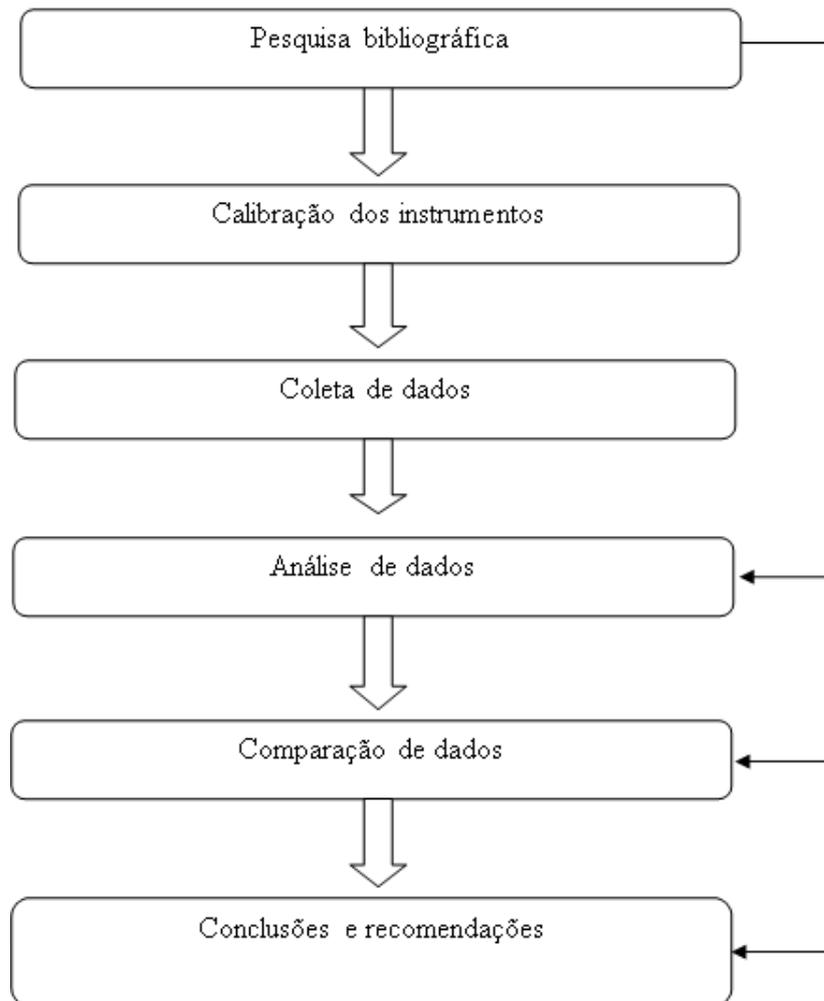
### 2.6 DELINEAMENTO

O trabalho foi realizado através das etapas apresentadas a seguir e que estão representadas na figura 1:

- a) pesquisa bibliográfica;

- b) calibração dos instrumentos;
- c) coleta de dados;
- d) análise dos dados coletados;
- e) comparação dos dados analisados;
- d) conclusões e recomendações.

Figura 1 – Esquema do desenvolvimento das etapas do trabalho



(fonte: elaborado pela autora)

As etapas são descritas nos próximos parágrafos.

A pesquisa bibliográfica foi a etapa destinada à formação do embasamento teórico do projeto. Foram selecionados e estudados trabalhos publicados sobre o assunto em questão.

A calibração dos instrumentos usados foi feita antes de dar início à coleta de dados, etapa em que foi feita aquisição das informações necessárias para analisar o comportamento do

escoamento. Essa etapa foi desenvolvida no Laboratório de Obras Hidráulicas, no Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Dados de pressão foram coletados ao longo da calha, nas quinas dos degraus, através de transdutores de pressões. Os dados referentes à aeração do escoamento foram coletados visualmente.

Na etapa de análise de dados foi estudado, a partir dos resultados obtidos no modelo, o comportamento das pressões e da posição de início da aeração para diferentes vazões específicas. Na etapa seguinte os resultados foram comparados com os de estudos anteriores para validação e complementação dos mesmos conforme o caso. A previsão do comportamento das pressões e das condições de aeração foram estudadas na última etapa.

### 3 ESTRUTURAS EM DEGRAUS

Neste capítulo será apresentada uma breve descrição da aplicação de estruturas em degraus, mostrando sua importância em diversas obras. Será mostrado um breve histórico dessa aplicação.

#### 3.1 APLICAÇÃO DE ESTRUTURAS EM DEGRAUS

Estruturas em degraus são utilizadas com frequência em diversas aplicações na Engenharia Civil. Obras de vertedouros de barragens, ensecadeiras, canais de drenagem e irrigação, proteção de taludes de enrocamento e detalhes paisagísticos são alguns exemplos.

Conforme vários autores, entre eles Daí Prá (2004), o aumento do uso de degraus em estruturas de grande porte foi consequência do desenvolvimento do concreto compactado a rolo (CCR). Esse sistema se resume em compactação em camadas de concreto com baixo teor de umidade. A espessura da camada de compactação dá origem ao degrau, facilitando a construção.

#### 3.2 HISTÓRICO DA UTILIZAÇÃO DE ESTRUTURAS EM DEGRAUS

A construção de vertedouros em degraus é uma técnica utilizada desde a Antiguidade. Exemplo disto é o vertedouro em degraus da barragem de Akarnania, Grécia, mostrado na figura 2, que data de 1.300 a.C.

Conforme Chanson (2000), acredita-se que o interesse pelo método sempre esteve associado à estabilidade, facilidade de construção e conservação da estrutura. O primeiro registro desse tipo de construção, com o objetivo de dissipação de energia, data de 1906, na barragem de *New Croton* (USA). Porém, têm-se registros que o primeiro trabalho envolvendo dissipação de energia em canais escalonados data da época de Leonardo da Vinci (1452 - 1519).

Após entrar em desuso por muito tempo, essa técnica vem despertando interesse com o desenvolvimento de tecnologias que facilitam a construção. Conforme Amador et al. (2004),

atualmente, mais de 30% das barragens em CCR utilizam vertedouros em degrau para dissipar a energia. No Brasil, apesar da utilização do CCR, a construção de vertedouros em degraus vem sendo cada vez mais utilizada quando as condições de projeto permitem. Pode-se citar como exemplo a barragem da UHE Dona Francisca, figura 3, no Rio Grande do Sul.

Figura 2 – Barragem de Arkananian, Grécia, datada de 1.300 a.C.



(fonte: CHANSON, 2001)

Figura 3 – Barragem da UHE Dona Francisca, RS, Brasil



(fonte: cedida por Enga. Lucia Miranda)

## 4 CARACTERIZAÇÃO DO ESCOAMENTO SOBRE CALHAS DE VERTEDOUROS EM DEGRAUS

Neste capítulo será caracterizado o escoamento sobre estruturas em degraus e abordadas limitações de uso apresentadas pela bibliografia.

### 4.1 TIPOS DE ESCOAMENTO

O escoamento sobre vertedouros em degraus varia conforme a geometria e a vazão vertida. O escoamento em canais e calhas podem ser classificados da seguinte maneira (CHANSON, 2001; DAÍ PRÁ, 2004; GOMES, 2006; SANAGIOTTO, 2003):

- a) em quedas sucessivas (*nappe flow*);
- b) de transição (*transition flow*);
- c) deslizante sobre turbilhões (*skimming flow*).

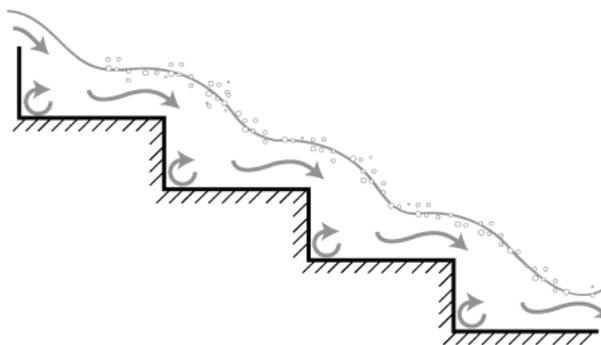
Os tipos de escoamentos citados acima serão detalhados nos itens a seguir.

#### 4.1.1 Escoamento em quedas sucessivas

O escoamento em quedas sucessivas está representado na figura 4. Esse fenômeno ocorre em estruturas com declividades menos acentuadas, vertendo menores vazões.

Segundo Chanson (2001), esse tipo de escoamento é caracterizado por quedas livres sucessivas do jato da água proveniente do degrau anterior cuja lâmina impacta total ou parcialmente sobre o piso do degrau imediatamente a jusante. A dissipação de energia ocorre através da dispersão do jato no ar, pelo impacto desse jato com a superfície do degrau subsequente e/ou através da formação de ressalto hidráulico nos degraus.

Figura 4 – escoamento em quedas sucessivas sobre vertedouro em degraus



(fonte: elaborado pela autora)

Esse tipo de escoamento, pelo impacto total do jato no degrau a jusante, pode formar ou não um pequeno ressalto hidráulico. Quando o degrau possui comprimento suficiente para formar um ressalto, o regime passa do supercrítico para o subcrítico, dissipando parte da energia durante a queda.

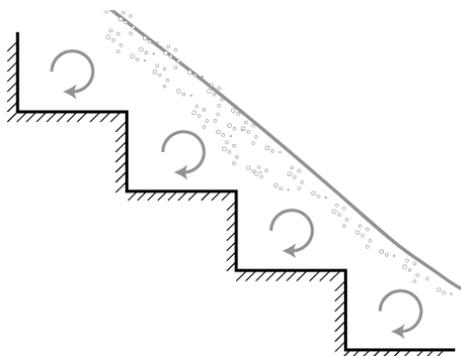
#### 4.1.2 Escoamento de transição

O escoamento de transição ocorre entre as baixas vazões do regime em quedas sucessivas e altas vazões do regime deslizante sobre turbilhões, gerando um modo de transição entre os dois. Esse regime é abordado por alguns autores, como Dai Prá (2004) e Gomes (2006), pelo fato de que a região entre o regime em quedas sucessivas e o deslizante sobre turbilhões, pode, pela instabilidade, ocasionar sérios danos à estrutura. Esses danos se devem aos esforços adicionais, às flutuações de pressões e a fadiga imposta à estrutura.

#### 4.1.3 Escoamento deslizante sobre turbilhões

O escoamento deslizante sobre turbilhões caracteriza-se por um fluxo principal deslizando sobre os turbilhões formados sobre cada degrau. Ocorre em estruturas com declividades mais acentuadas vertendo maiores vazões. Esse regime está mostrado na figura 5.

Figura 5 – escoamento deslizante sobre turbilhões em vertedouro em degraus



(fonte: elaborado pela autora)

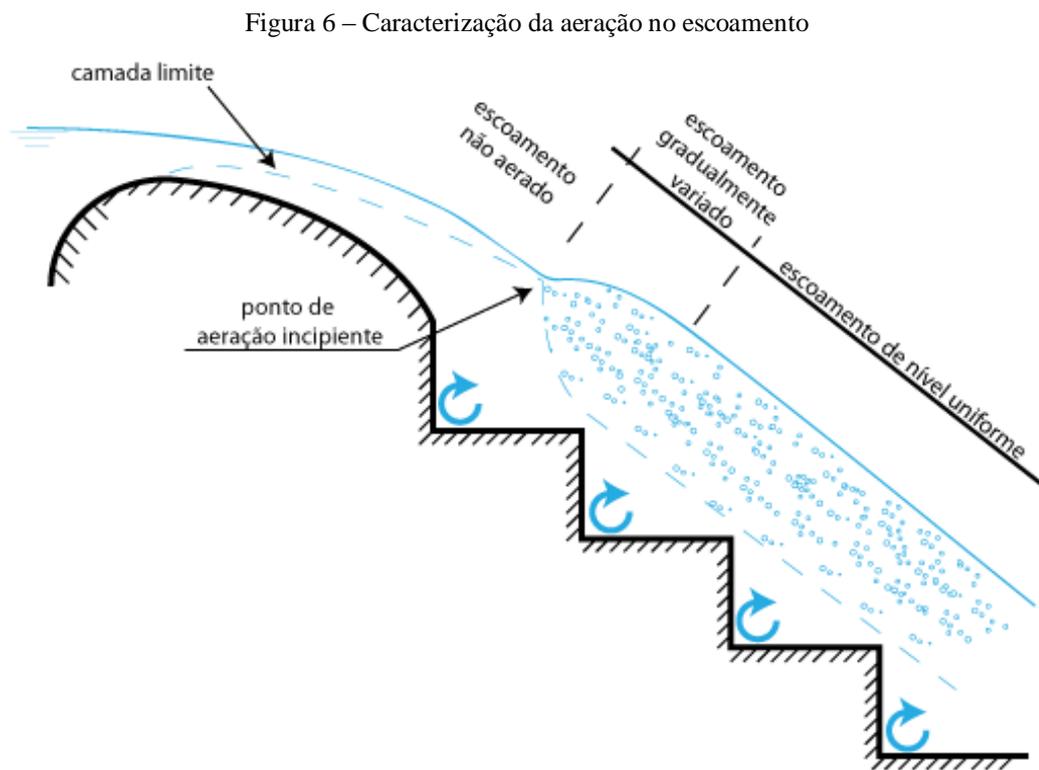
Conforme Chanson (2001), o escoamento deslizante sobre turbilhões é caracterizado por um fluxo principal deslizando sobre os degraus. Turbilhões formados pela recirculação do fluido retido na cavidade entre os degraus funcionam como rolamentos para o escoamento principal. Os cantos externos dos degraus conformam um pseudofundo no qual vórtices de recirculação de fluido se desenvolvem e se mantêm devido à transmissão da quantidade de movimento entre a corrente principal e os turbilhões.

## 4.2 AERAÇÃO DO ESCOAMENTO

Conforme Tozzi (1992), a aeração é um fenômeno típico em calhas de vertedouros e se caracteriza pela incorporação de ar ao escoamento devido ao afloramento da camada limite. A partir da posição de início da aeração o escoamento adquire características turbulentas necessárias para dissipação de energia.

Muitos autores como Tozzi (1992), Sanagiotto (2003) e Gomes (2006) consideram que, após a aeração do escoamento, a altura do escoamento se mantém constante. Assim, a velocidade média, as pressões atuantes e a quantidade de ar incorporada ao escoamento tendem a ser constantes. Essa relação é importante no estudo de vertedouros, pois elevadas velocidades podem ocasionar quedas de pressões podendo, em alguns pontos, atingir pressões negativas, favorecendo danos à estrutura. Descarregadores em degraus antecipam o ponto de afloramento da camada limite em relação ao convencional (calha lisa), devido às macrorugosidades da calha, que aumentam o grau de turbulência.

No desenvolvimento do escoamento sobre um vertedouro em degraus, observa-se escoamento não aerado até o ponto de afloramento da camada limite. Neste ponto o escoamento começa a incorporar ar. Denomina-se região de aeração incipiente esse trecho de variação entre o escoamento aerado e o não aerado. Após esse ponto, no qual o escoamento é gradualmente variado, o escoamento torna-se aerado com nível uniforme (MATOS, 1999; TOZZI, 1992). A figura 6 representa esquematicamente como ocorre esse processo.



(fonte: elaborado pela autora)

Através de medições experimentais em modelos de vertedouros em degraus, diversos autores sugeriram equações para previsão de posições de início de aeração e profundidade do escoamento nesse ponto. As equações propostas por alguns autores são apresentadas no quadro 1.

Quadro 1 – Equações sugeridas por diversos autores para posições de início de aeração e profundidade do escoamento nessa posição

| AUTOR             | Equações propostas   |             |
|-------------------|--|-------------|
| Chanson (1994)    | $\frac{L_a}{K} = 9,8(\text{sen}\alpha)^{0,08} F^{*0,71}$           | (equação 1) |
|                   | $\frac{h_a}{K} = \frac{0,40}{(\text{sen}\alpha)^{0,04}} F^{*0,64}$ | (equação 2) |
| Matos (1999)      | $\frac{L_a}{K} = 6,289 * F^{*0,734}$                               | (equação 3) |
|                   | $\frac{h_a}{K} = 0,361 * F^{*0,606}$                               | (equação 4) |
| Sanagiotto (2003) | $\frac{L_a}{K} = 9,7721 * F^{*0,7014}$                             | (equação 5) |
|                   | $\frac{h_a}{K} = 5,982 * F^{*0,5975}$                              | (equação 6) |
| Amador (2005)     | $\frac{L_a}{K} = 5,982 * F^{*0,840}$                               | (equação 7) |
|                   | $\frac{h_a}{K} = 0,385 * F^{*0,580}$                               | (equação 8) |

(fonte: elaborado pela autora)

Nas equações do quadro 1:

$L_a$  = posição de início de aeração a partir da crista ou início da ogiva do vertedouro (m);

$h_a$  = altura da lâmina d'água no ponto de início de aeração (m);

$K$  = altura de rugosidade do degrau (m) (mostrada na figura 7);

$\alpha$  = declividade da calha (°);

$F^*$  = Froude do degrau, calculado pela equação 9 (adimensional).

$$F^* = \frac{q}{\sqrt{g * K^3 * \text{sen}(\alpha)}} \quad (\text{equação 9})$$

Onde:

$l$  = comprimento do degrau (m);

$h$  = altura do degrau (m);

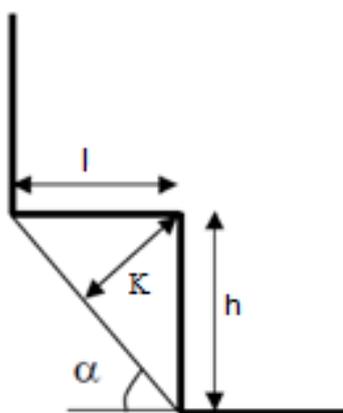
$q$  = vazão específica ( $\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$ );

$g$  = aceleração da gravidade ( $\text{m}/\text{s}^2$ );

$K$  = altura de rugosidade do degrau (m);

$\alpha$  = declividade da calha ( $^\circ$ ).

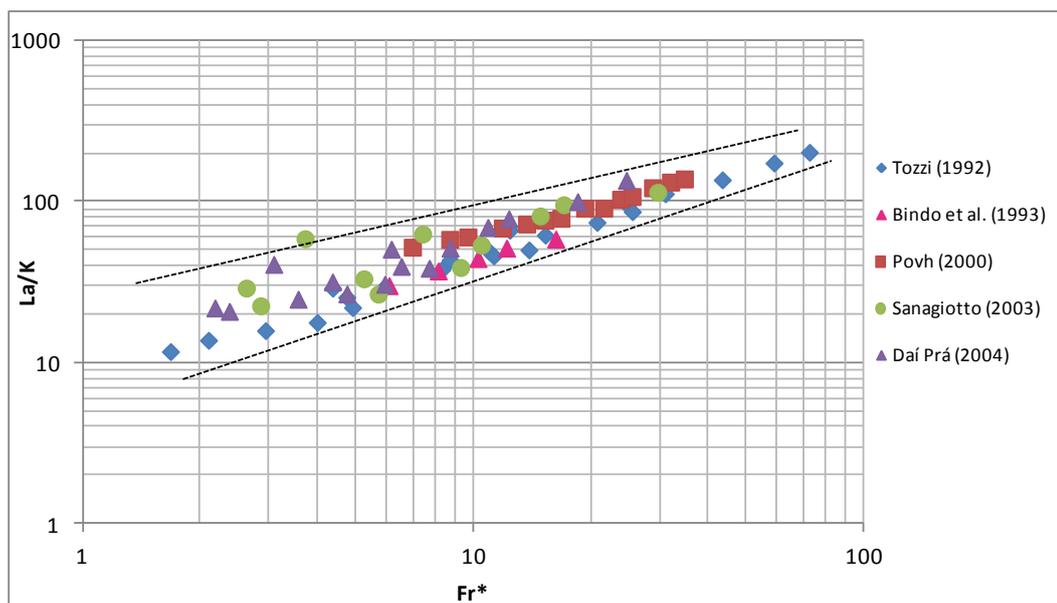
Figura 7 – Dimensões da calha em degrau



(fonte: DAI PRÁ, 2004, p.18)

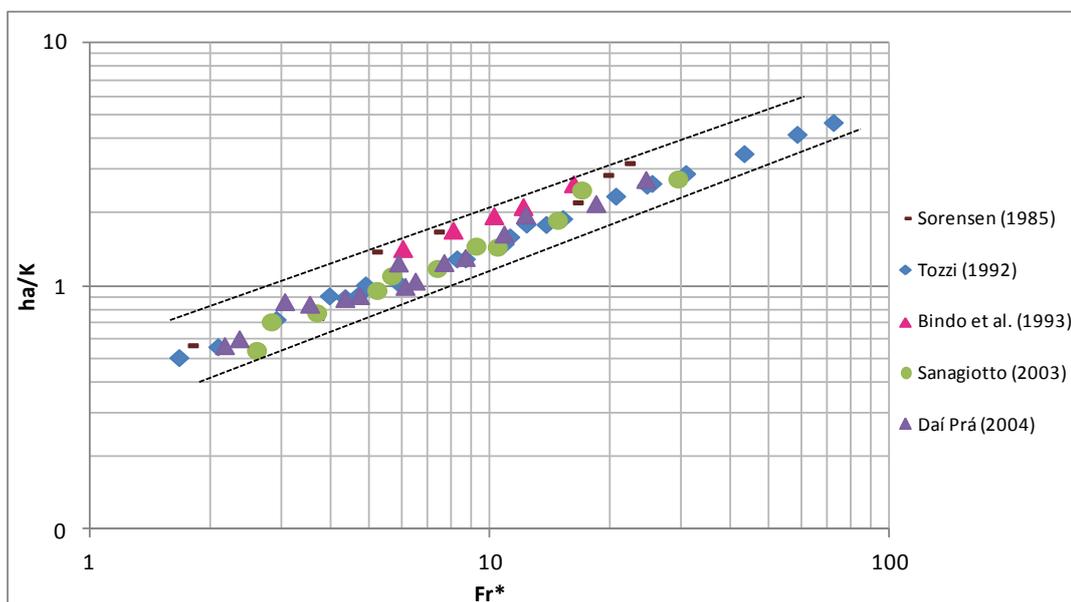
Na figura 8 é possível perceber a envoltória dos pontos de aeração medidos por diversos autores com declividades da calha e alturas de degrau diferentes. Percebe-se que a adimensionalização leva os valores a uma mesma tendência mesmo com características geométricas diferentes. Na figura 9 é possível identificar a envoltória de resultados de profundidade de escoamento na zona de aeração do escoamento. Percebe-se que a variação dos valores é coerente entre os autores.

Figura 8 – Envoltória de resultados de posições de início de aeração de diversos autores



(fonte: elaborado pela autora)

Figura 9 – Envoltória de resultados de profundidade de escoamento de diversos autores

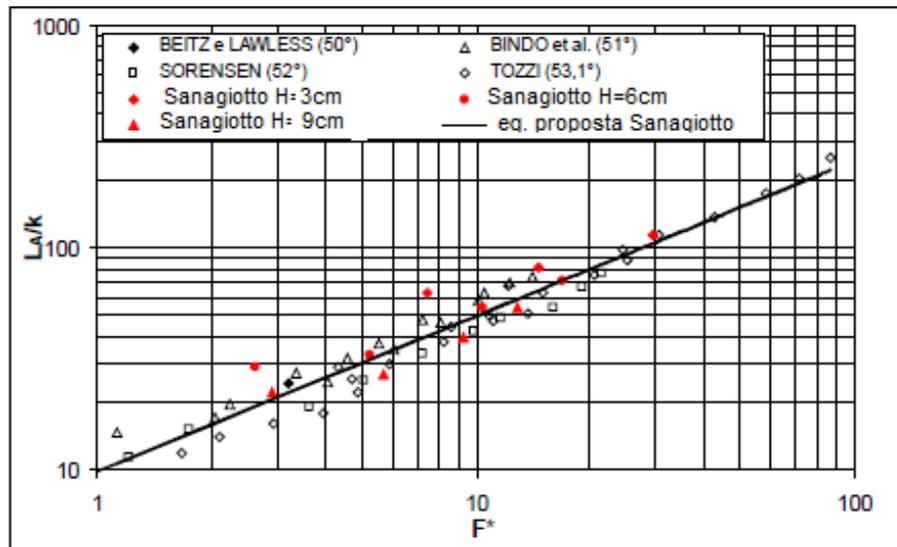


(fonte: elaborado pela autora)

Conforme Sanagiotto (2003), estudando diferentes alturas de degrau, observa-se que o aumento no tamanho do degrau conduz o início da aeração para posições mais próximas da crista do vertedouro. A figura 10, citada pela mesma autora, mostra a comparação da posição

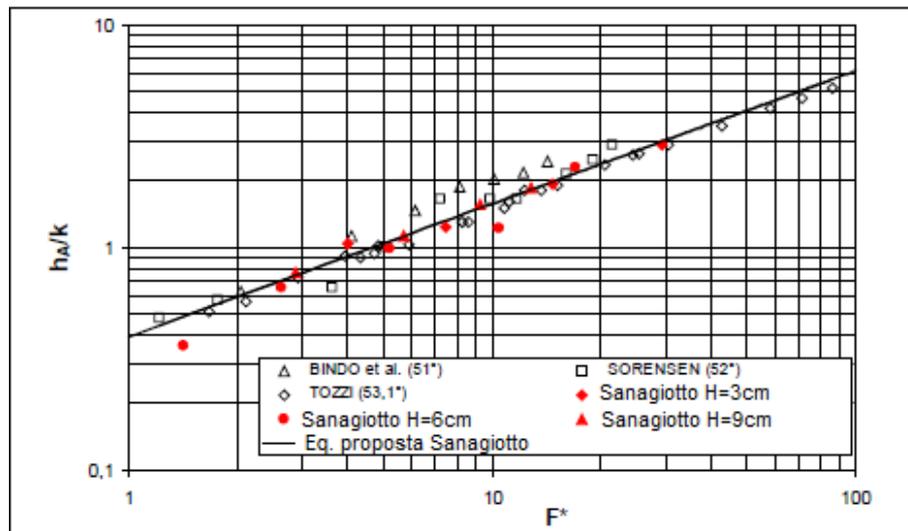
de início da aeração com os dados de diferentes autores. Percebe-se que a equação proposta está coerente com o restante dos dados. A figura 11 mostra a comparação da profundidade do escoamento, na posição de início da aeração do fluxo com diversos autores. A equação também está coerente com os dados dos demais autores.

Figura 10 – Comparação de posições de início de aeração coletados por diversos autores



(fonte: SANAGIOTTO, 2003, p. 60)

Figura 11 – Comparação entre profundidade do escoamento coletados por diversos autores



(fonte: SANAGIOTTO, 2003, p. 61)

### 4.3 DISSIPACÃO DE ENERGIA

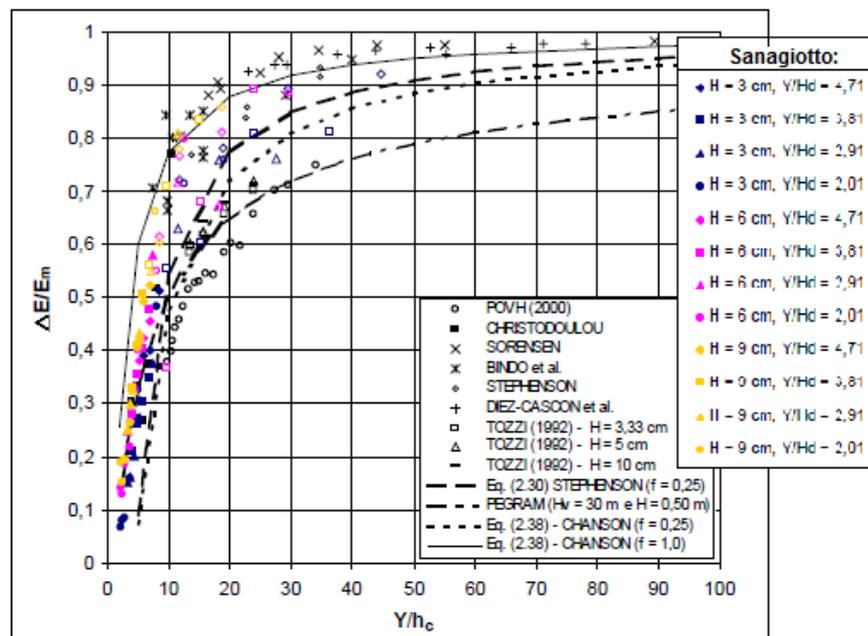
A dissipação de energia é uma das principais funções do vertedouro em degraus. Com maior dissipação na calha do vertedouro, busca-se reduzir a energia residual do escoamento no pé da barragem, diminuindo os riscos de erosão do maciço e os custos de construção de bacias de dissipação à jusante de barragens (DAI PRÁ, 2004; SANAGIOTTO, 2003).

Vários fatores interferem na dissipação de energia na calha:

- geometria dos degraus;
- declividade da calha;
- tipos de escoamento;
- aeração do escoamento.

Estudando a influência da altura do degrau e da aeração na dissipação de energia, Sanagiotto (2003), concluiu que degraus maiores dissipam mais energia em vertedouro de mesma altura. Na figura 12, a autora compara resultados da dissipação de energia em relação à energia de montante, em vertedouros com degraus de diferentes alturas, entre vários autores.

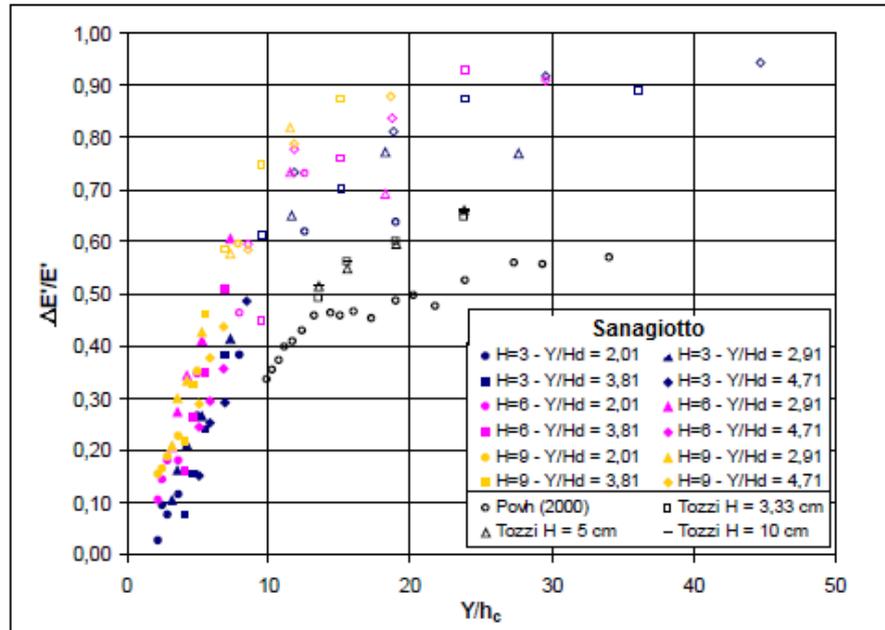
Figura 12 – Dissipação de energia em relação à energia de montante – comparações entre vários autores



(fonte: SANAGIOTTO, 2003, p. 79)

A autora concluiu também que a energia dissipada em escoamentos aerados é maior que em escoamentos não aerados. Na figura 13, a autora ilustra a dissipação de energia em relação a um vertedouro de calha lisa. Os resultados são comparados com outros autores.

Figura 13 – Dissipação de energia em relação a um vertedouro liso – pontos sem preenchimento correspondem a escoamentos em vertedouros em degraus



(fonte: SANAGIOTTO, 2003, p. 83)

#### 4.4 PRESSÕES AO LONGO DA CALHA

O estudo das pressões ao longo da calha é importante, tendo em vista a preocupação com possíveis danos, oriundos da ocorrência de faixas de pressões que propiciem a ocorrência de cavitação. Cada vez mais, a tendência é de se construir vertedouros mais altos, com degraus maiores, submetidos a maiores vazões podendo aumentar esse risco. Portanto, para o correto dimensionamento de uma estrutura é preciso conhecer o comportamento das pressões para que não seja favorecida a ocorrência de cavitação.

Analisando pressões médias em calhas com declividades de 53,3°, para diferentes alturas de degraus, Tozzi (1992) observou pressões médias positivas no patamar do degrau, próxima à quina, e pressões médias negativas no espelho, também próximas à quina. Com análise de pressões instantâneas o autor verificou a ocorrência de pressões negativas, nos espelhos de

alguns degraus, na ordem de -0,5 m.c.a. no modelo, indicando risco de ocorrência de cavitação. O autor propôs uma equação (equação 10), para adimensionalizar as pressões médias em função da energia cinética do escoamento:

$$K = \frac{P/\gamma}{v^2/2g} \quad (\text{equação 10})$$

Onde:

$K$  = coeficiente de pressão (adimensional);

$P/\gamma$  = pressão medida no modelo (m.c.a.);

$v$  = velocidade média do fluxo (m/s);

$g$  = aceleração da gravidade (m/s<sup>2</sup>).

Estudando o comportamento das pressões ao longo da calha com degraus de 9 cm, para diferentes vazões em vertedouros com declividade 1V:0,75H, Gomes (2006), ajustou modelos teórico-experimentais para prever o comportamento das pressões no espelho e no patamar baseando-se na equação 11, desenvolvida por Amador (2005). O autor usou a adimensionalização proposta por Mattos (1999) para a posição ao longo da calha do vertedouro, mostrada na equação 12.

$$C_p = \frac{P}{v_m^2/2g} \quad (\text{equação 11})$$

Onde:

$C_p$  = coeficiente de pressão (adimensional);

$P$  = valor de pressão que se deseja adimensionalizar (m.c.a.);

$v_m$  = velocidade média do escoamento obtida através de  $d_i$  (equação 13) (m/s);

$g$  = aceleração da gravidade (m/s<sup>2</sup>).

$$s' = \frac{(L - L_a)}{d_i} \quad (\text{equação 12})$$

Onde:

$s'$  = posição longitudinal (adimensional);

$L$  = posição ao longo da calha medida a partir da crista do vertedouro (m);

$L_a$  = posição do início da aeração medida a partir da crista do vertedouro (m);

$d_i$  = profundidade do escoamento no degrau (m).

$$\frac{d_i}{K} = 0,361F^{*0,606} \quad (\text{equação 13})$$

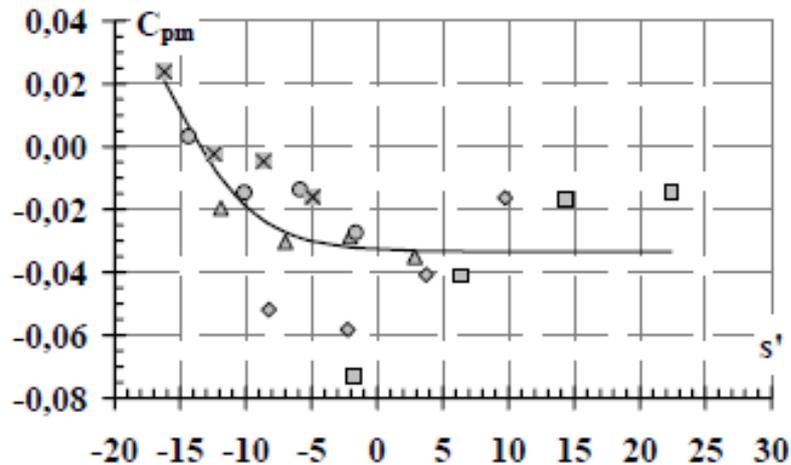
Onde:

$d_i$  = profundidade do escoamento sobre o degrau (m);

$F^*$  = número de Froude do degrau (adimensional);

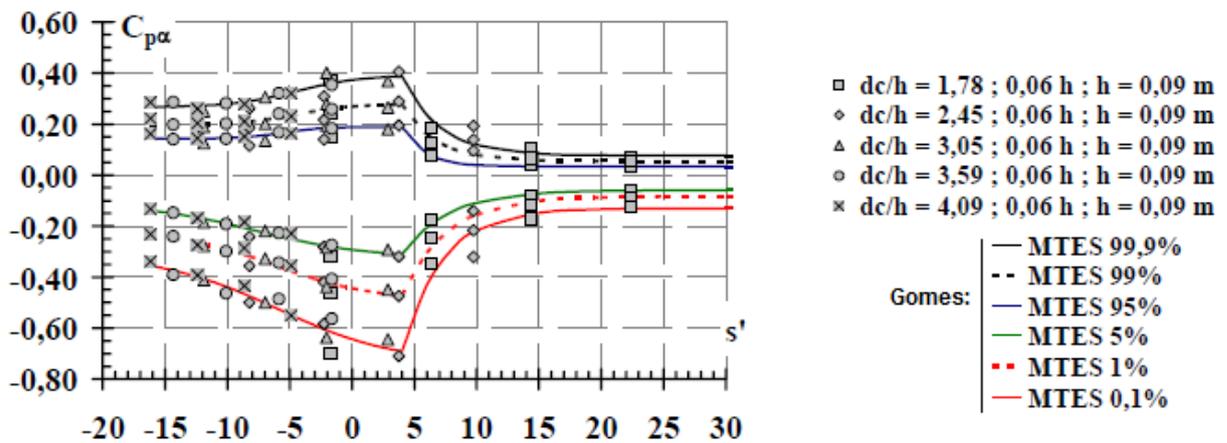
$K$  = altura de rugosidade do degrau (m).

As figuras 14 e 15 referentes ao espelho mostram o comportamento das pressões médias e extremas respectivamente com as devidas equações de ajustes por modelo teórico experimental. A adimensionalização mostra que as médias alcançam valores negativos no espelho. Cabe ressaltar que, por efeito de escala dos gráficos, ocorre uma atenuação da dispersão dos pontos calculados pela equação 11.

Figura 14 – Coeficientes de pressão média ( $C_{pm}$ ) para o espelho

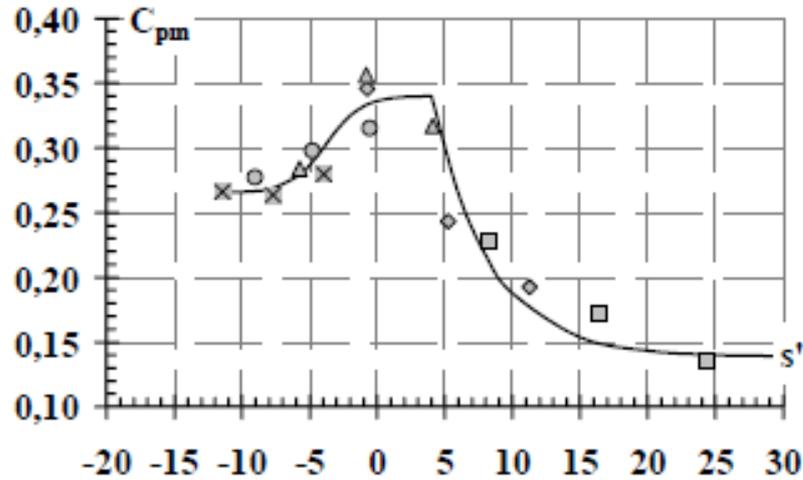
(fonte: GOMES, 2006, p. 126)

Figura 15 – Coeficientes de pressões extremas para o espelho



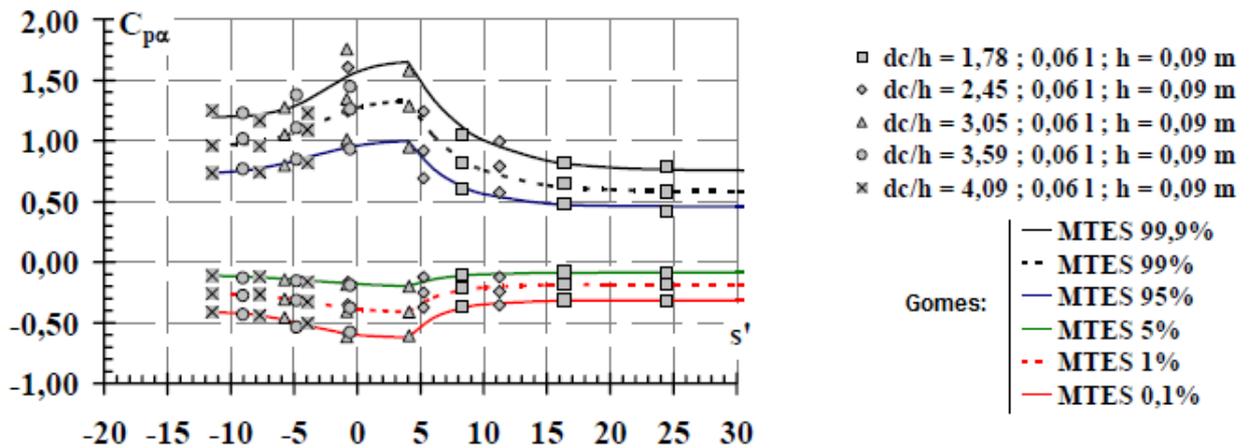
(fonte: GOMES, 2006, p. 128)

As figuras 16 e 17 referentes ao patamar mostram o comportamento das pressões médias e extremas respectivamente. O autor ressalta que os valores extremos para probabilidade de não exceder 0,1% são menos significativos que no espelho. Ressalta ainda que o patamar, sob o ponto de vista de dimensionamento, é caracterizado com um trecho de grande fragilidade estrutural devido ao maior diferencial de pressões aliado às maiores predominâncias de pressões positivas.

Figura 16 – Coeficientes de pressão média ( $C_{pm}$ ) para o patamar

(fonte: GOMES, 2006, p. 130)

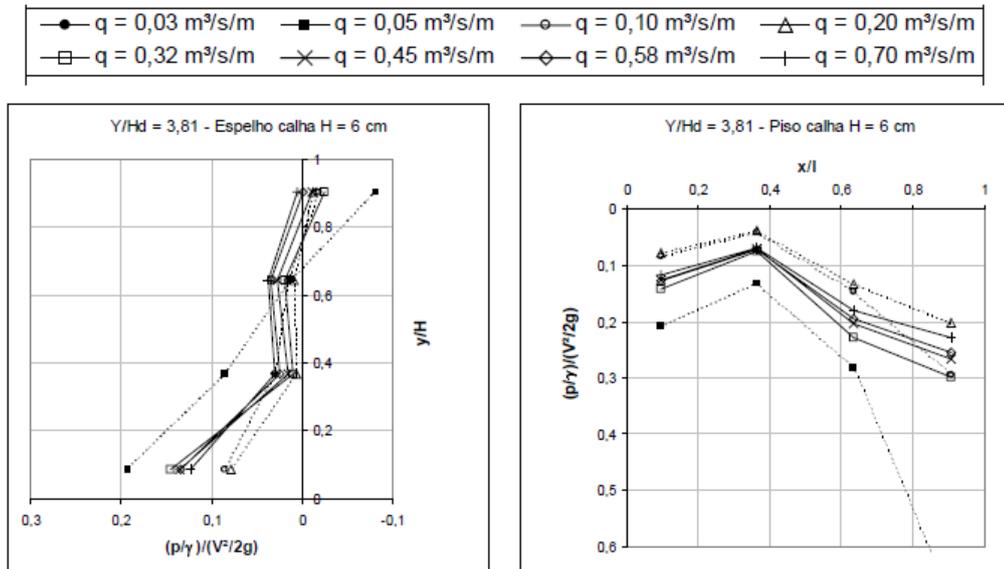
Figura 17 – Coeficientes de pressões extremas para o patamar



(fonte: GOMES, 2006, p. 131)

Avaliando o comportamento das pressões médias, em modelo, ao longo da calha para três alturas diferentes de degraus, Sanagiotto (2003), observou aumento de pressões em degraus maiores. As pressões máximas foram detectadas no patamar do degrau, próximas à quina (região mais externa). As pressões mínimas foram detectadas no espelho do degrau, também próximas à quina do degrau. A figura 18 mostra as pressões adimensionalizadas pela autora, de acordo com a equação proposta por Tozzi (1992), no espelho e no patamar (piso), para diferentes vazões específicas e degrau de 6 cm.

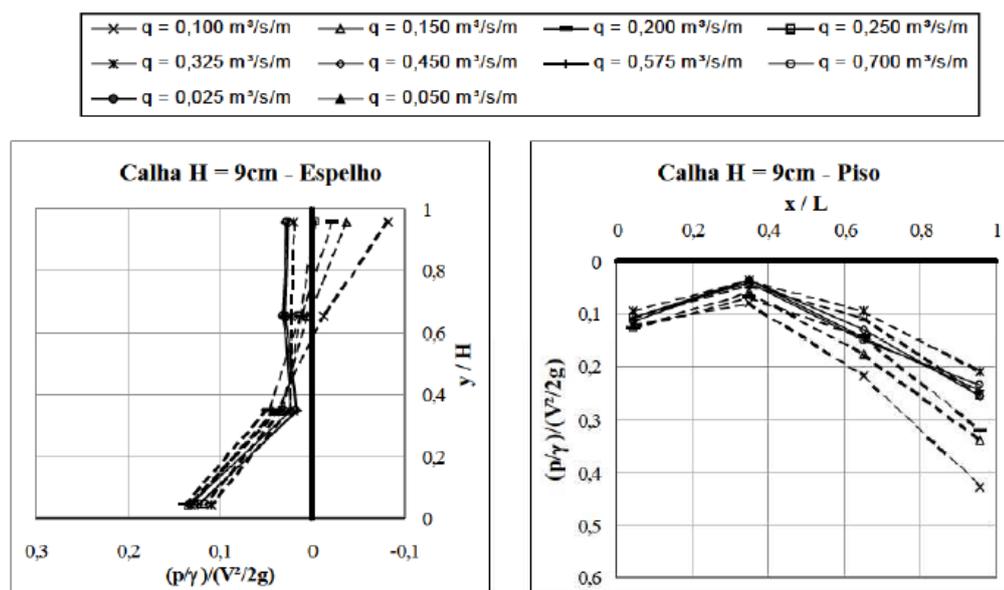
Figura 18 – Pressões adimensionalizadas com relação à energia cinética do escoamento



(fonte: SANAGIOTTO, 2003, p. 86)

Também utilizando a equação de adimensionalização proposta por Tozzi (1992), Dai Prá (2004) obteve o comportamento das pressões, em modelo, para degrau de 9 cm de altura para uma estrutura com declividade de 45°. Os resultados estão mostrados na figura 19.

Figura 19 – Comportamento do coeficiente de pressão (K) para a calha com degrau de 9 cm de altura



(fonte: DAI PRÁ, 2004, p. 84)

## 4.5 CAVITAÇÃO

Segundo Arndt (1981):

[...] a cavitação é o fenômeno dinâmico mais comum de ocorrer em escoamentos de líquidos com altas velocidades, que consiste na formação e subsequente colapso de bolhas de vapor. O colapso é muito rápido e origina ondas de choque de alta pressão, as quais, por efeito mecânico, provocam danos às superfícies.

Segundo Gomes (2006), estudos detalhados de pressões extremas e aeração natural ou forçada podem minimizar o fenômeno da cavitação. O autor salienta também que danos causados pela cavitação estão diretamente associados à intensidade e tempo de atuação do fenômeno.

Esse autor faz a análise de ocorrência de cavitação utilizando o índice crítico de cavitação, detalhado na equação 14:

$$\sigma = \frac{P_{ref} - P_{cr}}{U_{ref}^2 / 2g} \quad (\text{equação 14})$$

Onde:

$\sigma$  = índice crítico de cavitação (adimensional);

$P_{ref}$  = pressão absoluta em um ponto de referência do fluxo afastado da zona de cavitação (m.c.a.);

$P_{cr}$  = pressão crítica na qual os núcleos gasosos microscópicos se transformam em cavidades instáveis crescentes, sem que a pressão externa se altere. Este valor é normalmente considerado igual a tensão absoluta de vapor de água ( $t_v$ ), apesar dele ser dependente da concentração de gás dissolvido no líquido estudado (m.c.a.);

$U_{ref}$  = velocidade média do fluido no ponto de referência (m/s);

$g$  = aceleração da gravidade ( $m/s^2$ ).

Ainda, conforme o autor, valores de  $\sigma < \sigma_{crit}$  representam risco de cavitação. O valor de  $\sigma_{crit}$  é obtido em função da geometria da estrutura estudada e suas condições de funcionamento, conforme mostrado na equação 15:

$$\sigma_{cr} = \frac{P_{atm}/\gamma + d \cos\alpha - t_v/\gamma}{\alpha_{cr} U_{m\_cr}^2 / 2g} \quad (\text{equação 15})$$

Onde  $U_{m\_cr}^2$  é calculado pela equação 16:

$$U_{m\_cr}^2 = \sqrt{-\frac{t_{vrel}/\gamma}{C_{p0,1\%}}} \quad (\text{equação 16})$$

Onde:

$P_{atm}/\gamma$  = pressão atmosférica absoluta igual a 10,33 m.c.a. a 20°C;

$t_v/\gamma$  = tensão de vapor de água absoluta igual a 0,24 m.c.a. a 20°C;

$d$  = profundidade equivalente de água (m);

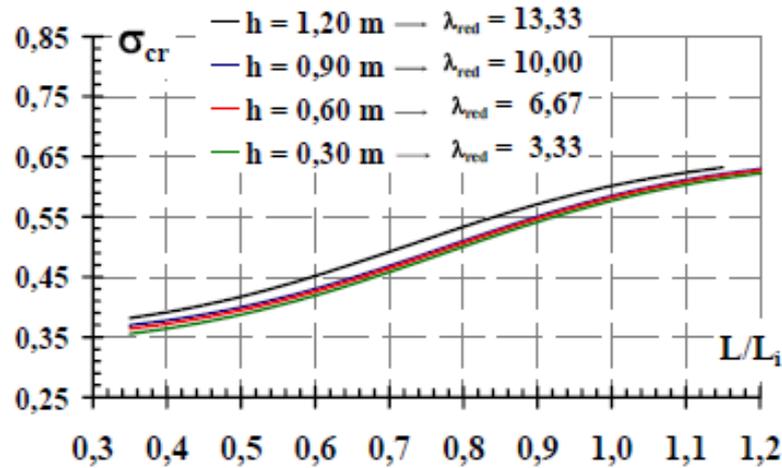
$\alpha_c$  = coeficiente de Coriolis igual a 1,16;

$t_{v\ rel}/\gamma$  = tensão relativa de vapor da água a -10,09 m.c.a. a 20°C, ao nível do mar;

$C_{p0,1\%}$  = coeficiente de pressão com 0,1% de probabilidade de ocorrência de valores inferiores.

A figura 20 mostra os resultados, já transpostos para a escala real, do índice crítico de cavitação para vertedouros com declividade 1V:0,75H e alturas diferentes de degraus.

Figura 20 – Evolução do parâmetro crítico de incipiência de cavitação ( $\sigma_{cr}$ ) ao longo do escoamento

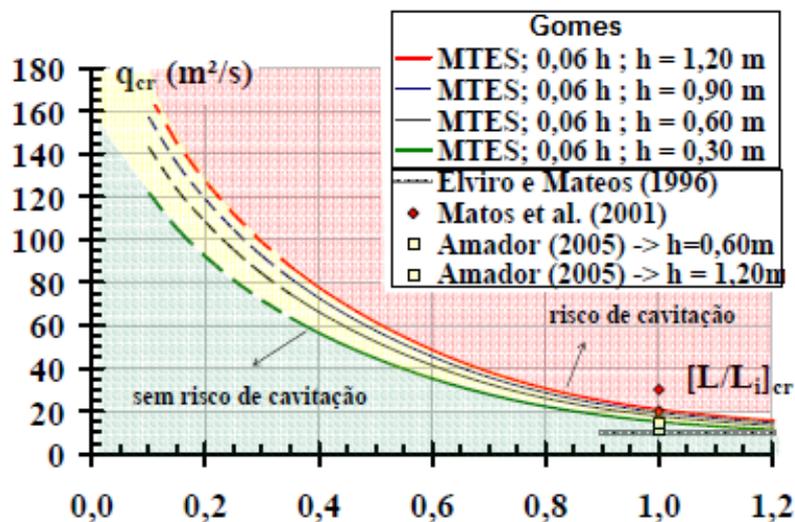


(fonte: GOMES, 2006, p. 135)

Estudando as vazões e as velocidades sobre a calha, Gomes (2006) limitou as vazões específicas e velocidades médias para a incipiência de cavitação para diversas posições de  $L/L_i$ , conforme ilustrado nas figuras 21 e 22, respectivamente.

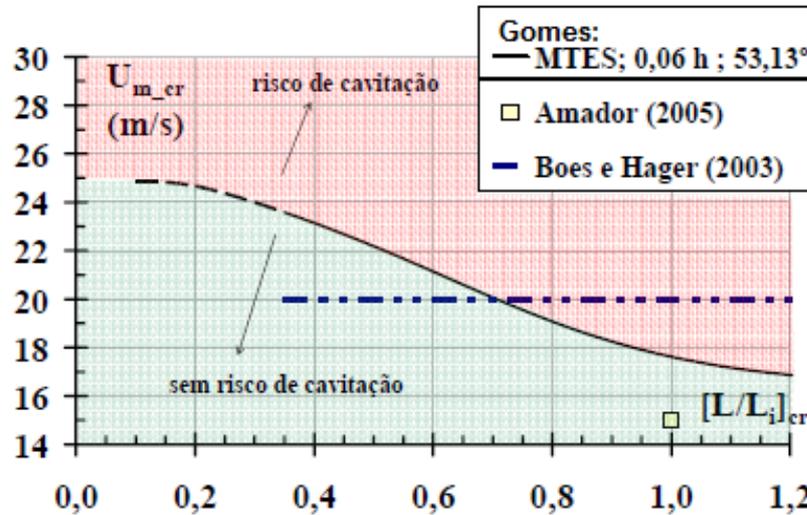
O autor propõe ainda um método baseado na velocidade média do escoamento. Se as velocidades médias do escoamento forem maiores que a velocidade crítica, calculada pela equação 17, o processo de cavitação poderá se estabelecer:

Figura 21 – Vazões específicas críticas obtidas pela transposição dos resultados



(fonte: GOMES, 2006, p. 138)

Figura 22 – Velocidades médias críticas obtidas pela transposição dos resultados



(fonte: GOMES, 2006, p. 138)

$$U_{m\_cr} (m/s) = 16,29 + \frac{9,91}{\left\{ 1 + \exp \left[ \frac{\left( \frac{L}{L_a} - 0,60 \right)}{0,23} \right] \right\}}, \text{ para } 0 \leq L/L_a \leq 1,20 \quad (\text{equação 17})$$

Onde:

$U_{m\_cr}$  = velocidade média crítica (m/s);

$L$  = posição longitudinal cuja origem é a crista da ogiva do vertedouro (m);

$L_a$  = posição longitudinal da seção de afloramento da camada limite tendo como origem a crista da ogiva do vertedouro (m).

Analisando escoamentos em modelos, Amador (2005), sugere limites que a cavitação poderá ocorrer de forma incipiente para vazões específicas de 11,5 m<sup>2</sup>/s e 14 m<sup>2</sup>/s, para degraus com alturas de 0,6 m e 1,2 m, respectivamente. Em função desses limites, o autor recomenda que velocidades médias máximas na seção de afloramento da camada limite não ultrapassem 15 m/s. Matos et al. (2001), propuseram limites de uso em função da vazão específica, esse valor estaria compreendido entre 20 m<sup>2</sup>/s e 30 m<sup>2</sup>/s.

## 5 MÉTODO EXPERIMENTAL

Neste capítulo serão apresentados o modelo e os equipamentos de medição utilizados nessa pesquisa com ensaios em modelo físico bidimensional de vertedouro em degraus. Será feita abordagem também dos equipamentos e condições de ensaio.

### 5.1 INSTALAÇÃO EXPERIMENTAL

Os ensaios foram feitos com apenas uma declividade de calha e uma altura de degrau. O estudo foi desenvolvido no Laboratório de Obras Hidráulicas do Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (IPH/UFRGS).

#### 5.1.1 Descrição do Modelo

O modelo experimental utilizado está representado na figura 23. O modelo (vertedouro e bacia de dissipação) está numa escala de 1:10, possuindo as seguintes características:

- a) declividade da calha igual a 1V:0,75H;
- b) vertedouro com 2,45 m de altura;
- c) vertedouro e canal com 40 cm de largura;
- d) 33 degraus com 6 cm de altura.

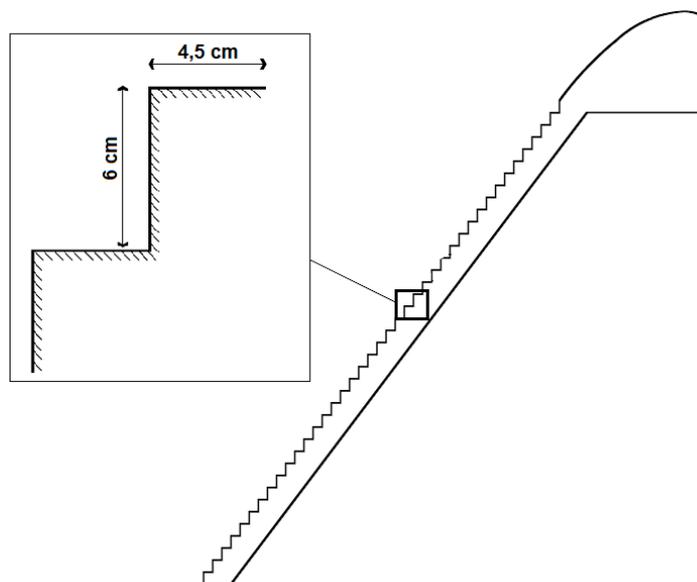
O modelo está disposto de maneira a facilitar a aquisição de dados e o manuseio de equipamentos. A estrutura é composta por perfis metálicos com as laterais do vertedouro e parte do canal a jusante em chapas de acrílico, facilitando a visualização do escoamento. A ogiva do vertedouro é do tipo Creager projetada para uma carga de 0,4 m. A figura 24 detalha a calha utilizada.

Figura 23 – Ilustração do modelo utilizado



(fonte: foto da autora)

Figura 24 – Detalhe do vertedouro em degraus

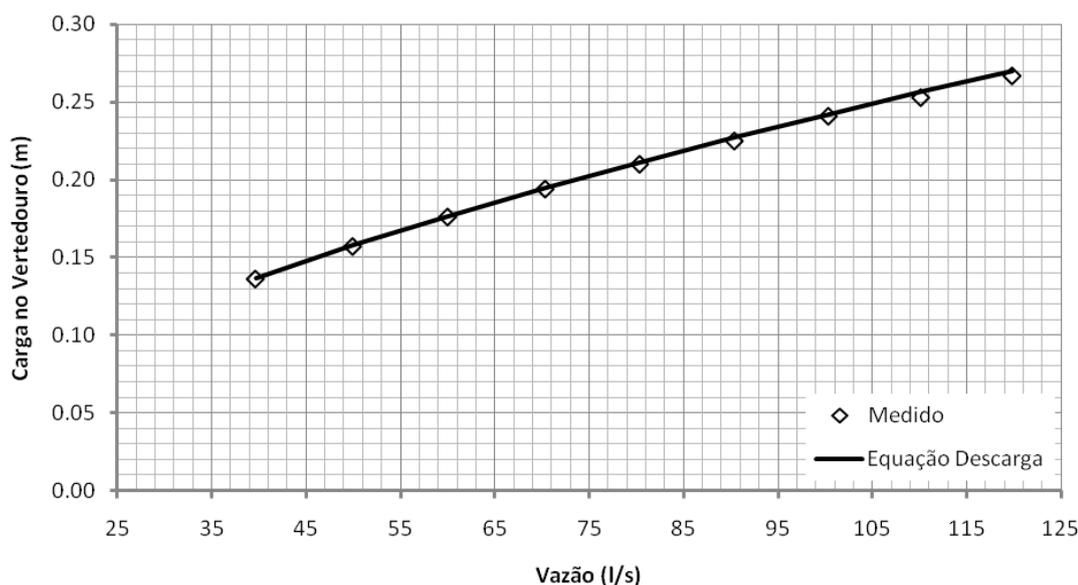


(fonte: elaborado pela autora)

O sistema de alimentação é composto por uma bomba centrífuga de 50 CV de potência, operada em conjunto com um inversor de frequência para ajustar as vazões requeridas. As vazões foram medidas através de um medidor eletromagnético incorporado à tubulação. A vazão medida foi comparada com a curva de descarga do vertedouro (conhecida através de

trabalhos anteriores) e mostrou concordância aceitável, conforme mostrado na figura 25. O sistema é abastecido por um reservatório inferior com 600 m<sup>3</sup> de capacidade e tubulações em ferro fundido de 300 mm de diâmetro.

Figura 25 – Curva de descarga do vertedouro e resultados do medidor eletromagnético



(fonte: elaborado pela autora)

### 5.1.2 Critério de semelhança

As relações de transferência das grandezas entre modelo e protótipo foram estabelecidas através do critério de semelhança de Froude, obedecendo a relação entre forças de inércia e gravidade. As equações 18, 19 e 20 estabelecem estas relações para a velocidade, a vazão e a vazão específica:

$$\frac{V_m}{V_p} = \lambda^{1/2} \quad (\text{equação 18})$$

$$\frac{Q_m}{Q_p} = \lambda^{5/2} \quad (\text{equação 19})$$

$$\frac{q_m}{q_p} = \lambda^{3/2} \quad (\text{equação 20})$$

Onde:

$V_m$  = velocidade do escoamento no modelo (m/s);

$V_p$  = velocidade do escoamento no protótipo (m/s);

$Q_m$  = vazão no modelo (m<sup>3</sup>/s);

$Q_p$  = vazão no protótipo (m<sup>3</sup>/s);

$q_m$  = vazão específica no modelo (m<sup>2</sup>/s);

$q_p$  = vazão específica no protótipo (m<sup>2</sup>/s);

$\lambda$  = razão entre as escalas geométricas de modelo e de protótipo.

## 5.2 SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS

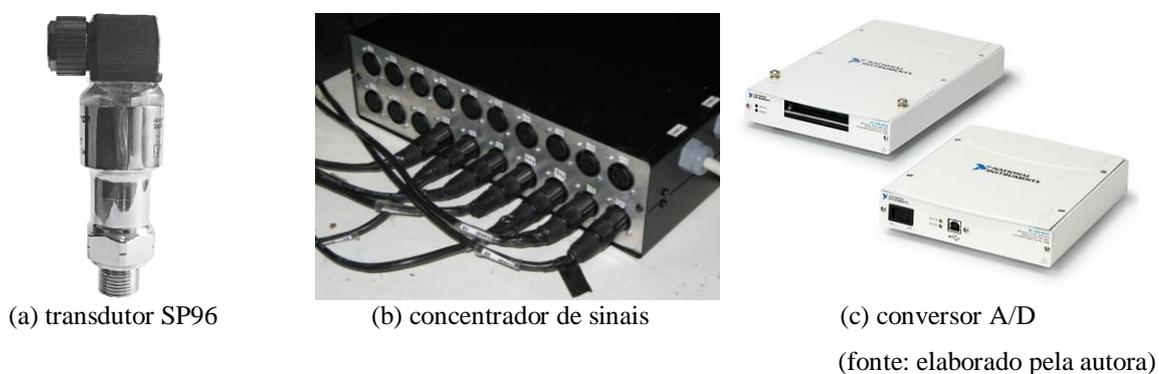
Os dados referentes a pressões sobre a calha foram coletados através de transdutores de pressão e, os referentes à aeração do escoamento, foram coletados visualmente, conforme descrito a seguir.

### 5.2.1 Aquisição de Dados de Pressão ao Longo da Calha

Os dados de pressões instantâneas ao longo da calha do vertedouro foram obtidos com 20 transdutores de pressão da marca Sitron modelo SP96, mostrados na figura 26(a) e dados de pressões médias foram coletados com 33 piezômetros. Cabe salientar que os dados dos piezômetros foram utilizados somente para verificação dos dados coletados pelos transdutores, não sendo considerados na análise.

Dos transdutores utilizados, 10 possuem faixa de operação de  $\pm 1,5$  m.c.a. e 10 de  $\pm 2,5$  m.c.a. Os dois modelos possuem erro esperado de  $\pm 0,5\%$  do fundo de escala. Os transdutores de pressão foram conectados a um concentrador de sinais, figura 26(b), que transmitia esses sinais para um conversor A/D (analógico/digital), figura 26(c). Esse conversor possui resolução digital de 16 bits e faixa de operação admissível de tensões de -10 a 10 V. Os transdutores foram calibrados previamente utilizando o modelo para a determinação da curva de pressão por tensão para cada transdutor.

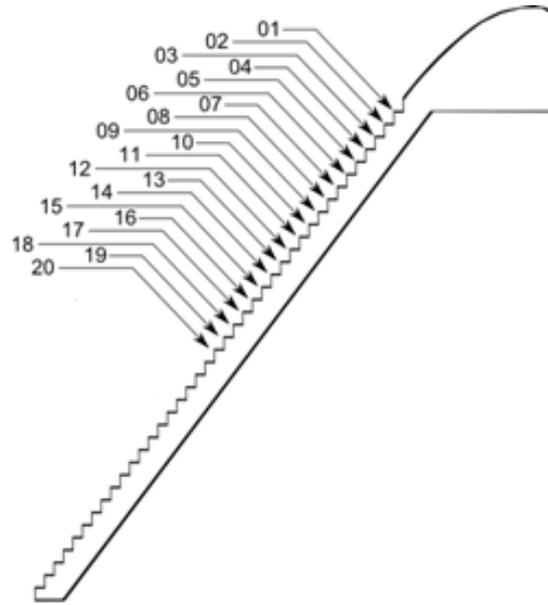
Figura 26 – Detalhe dos equipamentos de medição



Os transdutores foram instalados no patamar e no espelho dos 20 primeiros degraus, a 3 mm da quina na linha central da calha. Cada transdutor é conectado ao escoamento através de pequenos tubos, de material plástico transparente, inseridos nos orifícios das tomadas de pressão. Devido à dificuldade de instalação dos transdutores em todos os degraus simultaneamente pela pequena distância entre eles, os ensaios foram divididos em duas etapas, medindo degraus pares e ímpares separadamente por intervalos de 15 min com frequência de aquisição de 128 Hz. O esquema utilizado está representado nas figuras 27 e 28.

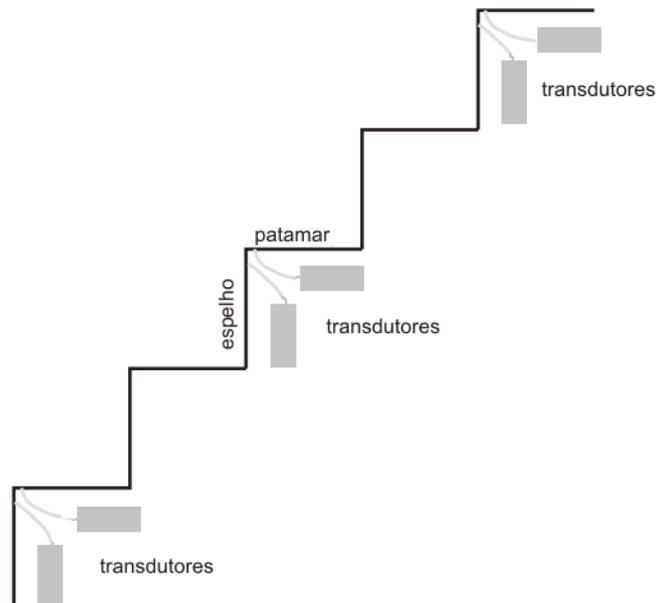
No Anexo A estão detalhadas as distâncias verticais e horizontais de cada degrau em relação ao início da calha assim como o comprimento L em relação à crista do vertedouro. Esse comprimento é paralelo ao desenvolvimento da crista e da calha e será utilizado na adimensionalizações a seguir.

Figura 27 – Numeração dos transdutores



(fonte: elaborado pela autora)

Figura 28 – Disposição dos transdutores

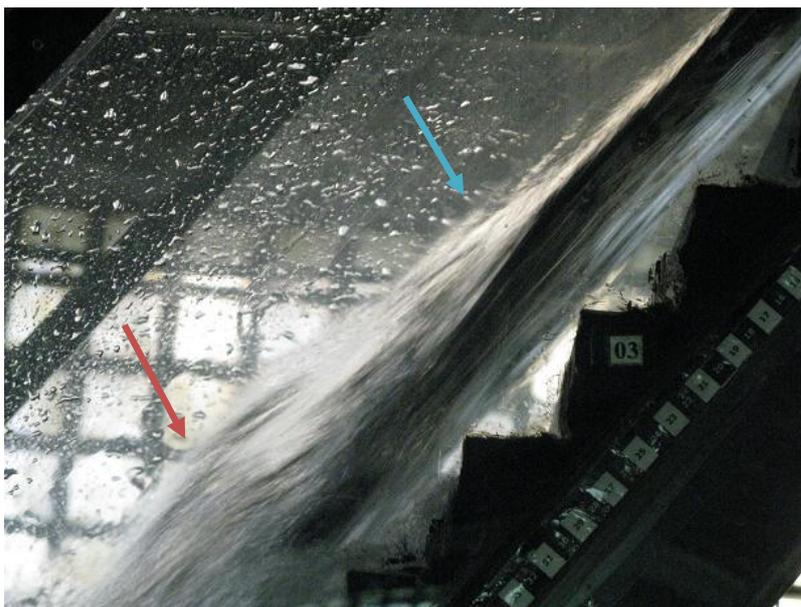


(fonte: elaborado pela autora)

### 5.2.2 Aquisição de Dados de Aeração do escoamento ao Longo da Calha

A posição de início de aeração do escoamento foi verificada visualmente através das laterais de acrílico com apoio de escalas numeradas ao longo da calha, conforme mostrado na figura 29. Observaram-se posições de aeração intermitente, identificadas na figura pela seta azul, onde surgem as primeiras bolhas de ar no escoamento, e posições de aeração fixa, identificadas pela seta vermelha, onde a aeração se encontra completamente desenvolvida. É importante salientar que foi considerado um valor médio para a posição de aeração intermitente e fixa já que essas posições oscilam em torno desse valor médio ao longo do tempo. A média considerada foi o valor médio entre o máximo (aeração fixa) e o mínimo (aeração intermitente).

Figura 29 – Início da aeração do escoamento



(fonte: foto da autora)

### 5.3 CONSIDERAÇÕES GERAIS DE ENSAIO

As vazões específicas ensaiadas no modelo foram de 0,10; 0,15; 0,20; 0,25; 0,275 m<sup>2</sup>/s. A leitura desses valores foi possível através do medidor de vazão instalado na tubulação que alimenta o modelo. A vazão máxima e a mínima foram limitadas pela geometria do modelo

para evitar extravasamento e pela precisão desejada no medidor eletromagnético de vazão, que seria obtida somente para vazões acima de 40 L/s.

Cada vazão foi ensaiada duas vezes para minimizar qualquer erro devido a interferências, como ruídos, por exemplo. Os dados obtidos nos ensaios semelhantes foram comparados e validados se resultassem numa boa correlação entre si. Como as medições foram divididas em duas etapas, tomou-se o cuidado de manter as mesmas características evitando gerar incoerências nas medições.

## 6 RESULTADOS E ANÁLISE

Como já mencionado, o estudo aqui exposto refere-se ao escoamento deslizante sobre turbilhões sobre calha com declividade 1V:0,75H e degrau de 6 cm. Os dados de pressão foram coletados com o auxílio de transdutores de pressão devidamente calibrados e os dados de aeração foram coletados visualmente.

A validação dos resultados foi feita comparando-se os dados com estudos semelhantes de outros autores buscados na pesquisa bibliográfica. Como a bibliografia traz dados de estruturas com diferentes declividades e altura de degrau, buscou-se relacionar através de adimensionalizações os resultados provenientes de modelos com diferentes características.

### 6.1 RESULTADOS REFERENTES À AERAÇÃO DO ESCOAMENTO

Foram observados valores da posição de início de aeração sobre a calha para as cinco vazões específicas citadas anteriormente. A tabela 1 mostra os dados coletados referentes ao comprimento de aeração  $L_a$ . Na figura 30 é feita a comparação entre os dados de posição de aeração encontrados por diversos autores com o presente estudo.

Tabela 1 – Valores de comprimento de aeração e  $F^*$

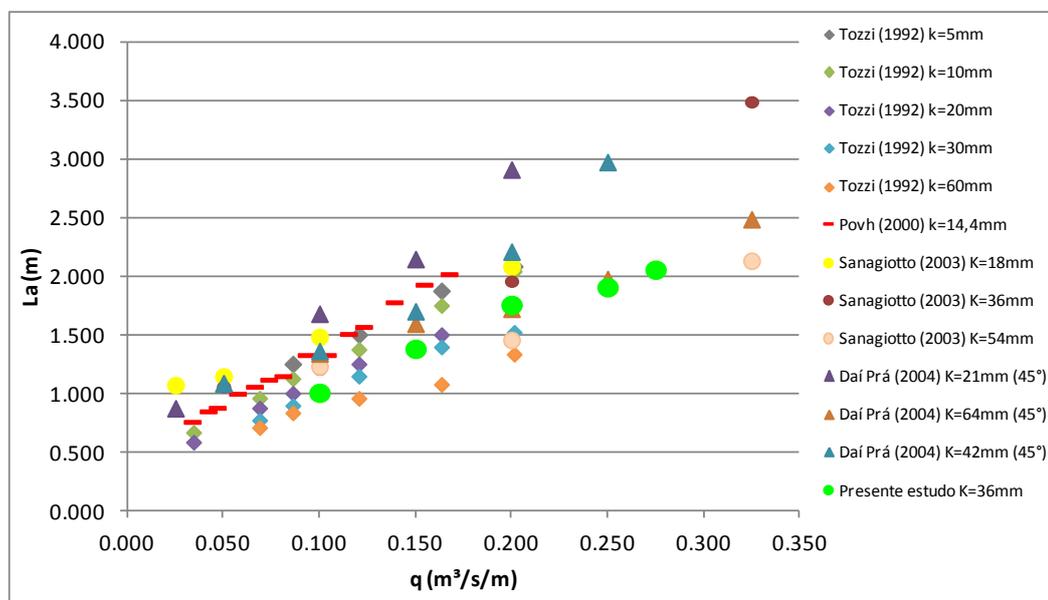
| $q$ (m <sup>3</sup> /s/m) | Degrau início aeração | $L_a$ (m) | $F^*$ |
|---------------------------|-----------------------|-----------|-------|
| 0,1                       | 3                     | 1,01      | 5,23  |
| 0,15                      | 8                     | 1,38      | 7,84  |
| 0,2                       | 13                    | 1,76      | 10,45 |
| 0,25                      | 15                    | 1,91      | 13,07 |
| 0,275                     | 17                    | 2,06      | 14,37 |

(fonte: elaborado pela autora)

Na figura pode-se observar que os dados estão coerentes com os valores encontrados em outros estudos. Percebe-se que os degraus maiores (maior  $K$ ) conduzem o início da aeração

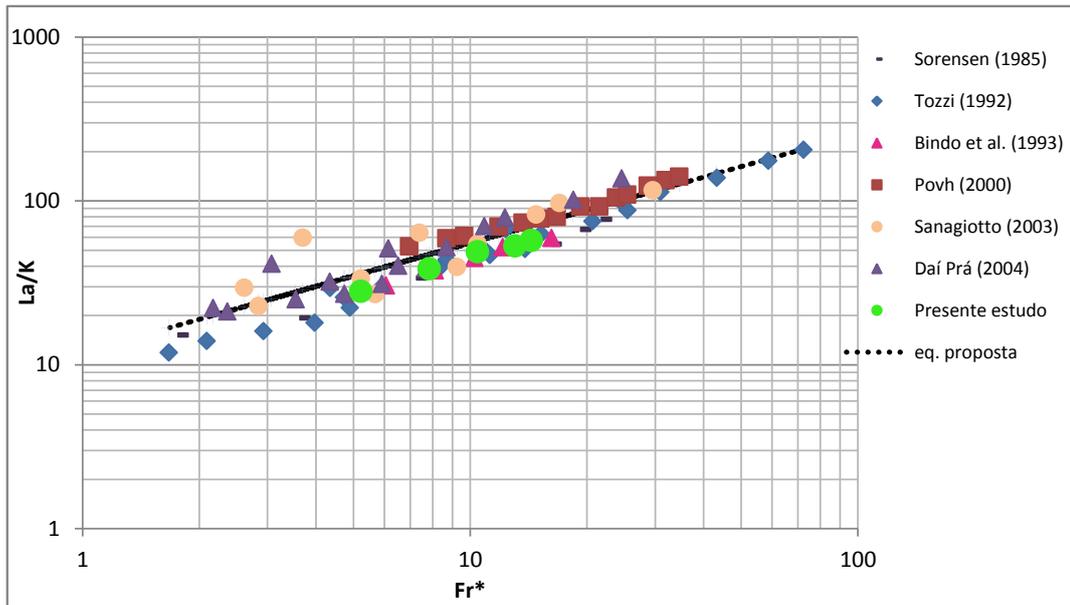
para a posição mais próxima da crista para uma mesma vazão específica, como já observado por autores como Tozzi (1992), Sanagiotto (2003) e Dai Prá (2004).

Figura 30 – Resultados de posições de início de aeração de diversos autores



(fonte: elaborado pela autora)

Tentando entender o comportamento do ponto de início de aeração em vertedouros e estabelecer uma equação geral, buscou-se fazer uma comparação entre dados adimensionalizados de diversos autores entre eles Sorensen (1985), Bindo et al. (1993), Sanagiotto (2003), Dai Prá (2004), e propor uma equação geral para definir o comprimento de início de aeração para vertedouros com diferentes declividades e alturas de degraus. O resultado está mostrado na figura 31.

Figura 31 – Valores de  $L_a/k$  para diversos autores e equação proposta

(fonte: elaborado pela autora)

A equação proposta para o início da aeração está mostrada na equação 21:

$$\frac{L_a}{K} = 12F^{*(2/3)} \quad (\text{equação 21})$$

Onde:

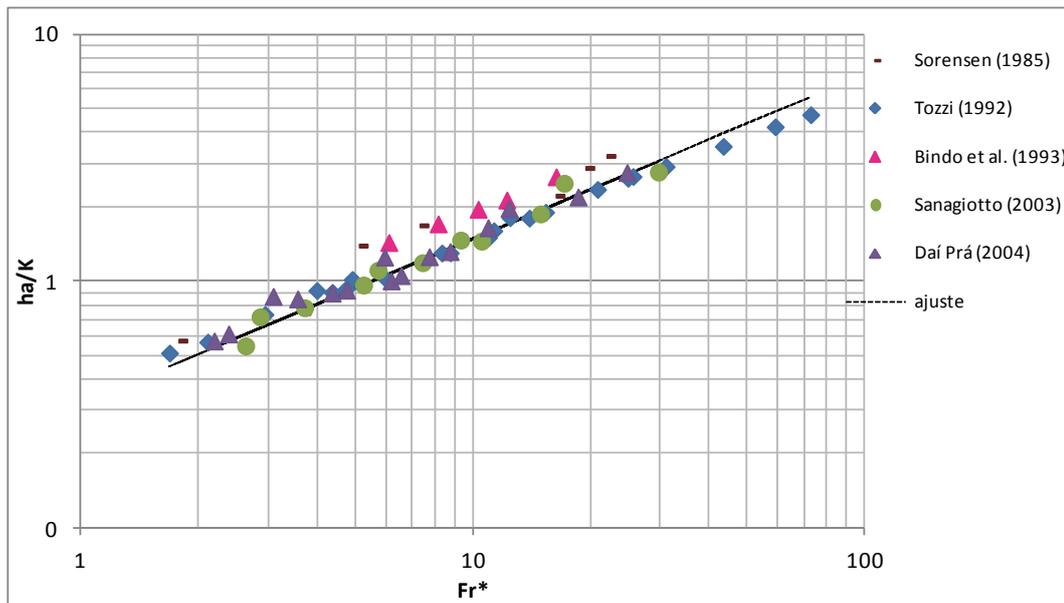
$L_a$  = comprimento da posição de início de aeração a partir da crista do vertedouro (m);

$K$  = altura da rugosidade do degrau (m);

$F^*$  = número de Froude do degrau (adimensional).

A equação foi estabelecida a partir dos ensaios feitos e de dados de outros autores que estudaram diferentes declividades e alturas de degraus. Portanto pode-se estabelecer que a equação pode ser utilizada para diferentes tipos de estruturas em degraus.

Não foram coletados dados relativos à profundidade do escoamento no ponto de afloramento da camada limite. Portanto, através da análise dos dados de diferentes autores foi proposta uma equação de ajuste para diferentes declividades e alturas de degraus. A figura 32 mostra o ajuste feito.

Figura 32 – Valores de  $h_a/k$  de diferentes autores e equação de ajuste

(fonte: elaborado pela autora)

A equação proposta para a altura do escoamento no ponto de início de aeração está apresentada na equação 22:

$$\frac{h_a}{K} = \frac{1}{3} F^{*(2/3)} \quad (\text{equação 22})$$

Onde:

$h_a$  = profundidade do escoamento no ponto de início de aeração (m);

$K$  = altura da rugosidade do degrau (m);

$F^*$  = número de Froude do degrau (adimensional).

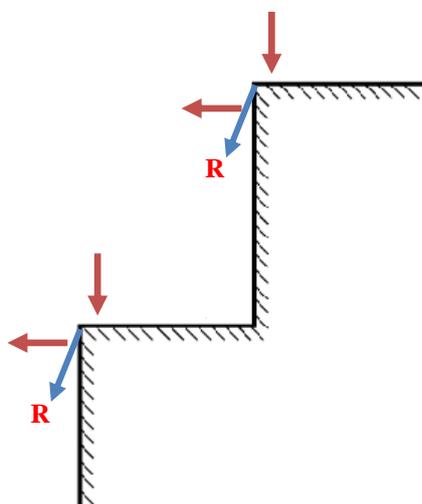
A equação ajustada pode ser usada para diferentes declividades e alturas de degrau uma vez que foram utilizadas dados coletados em diferentes tipos de modelos. Como já comentado anteriormente, não foram feitas medições desse parâmetro, a equação foi ajustada a partir de dados de outros autores.

## 6.2 RESULTADOS REFERENTES ÀS PRESSÕES NOS DEGRAUS

Foram coletados valores de pressões instantâneas nos vinte primeiros degraus com transdutores, e pressões médias ao longo de toda a calha com piezômetros. Os dados de pressão média dos transdutores foram comparados com as pressões médias coletadas com piezômetros para verificar a qualidade da calibração feita. Tanto no patamar quanto no espelho os resultados mostram uma boa qualidade na calibração dos transdutores. Os valores de pressão média para todas as vazões ensaiadas estão apresentadas no Anexo B.

A associação de pressões positivas próximas à quina do patamar com pressões negativas próximas a quina no espelho pode levar a uma tendência de arrancamento da quina do degrau, conforme mostrado na figura 35, indicando que o mesmo deve ser reforçado com a colocação de armadura. A ocorrência de pressões negativas pode ocasionar danos de erosão se chegar a valores de -6 m.c.a. no protótipo (valor mínimo de força de tração que o grão do concreto pode suportar sem dano).

Figura 35 – Esquema das pressões positivas e negativas agindo no patamar e espelho respectivamente

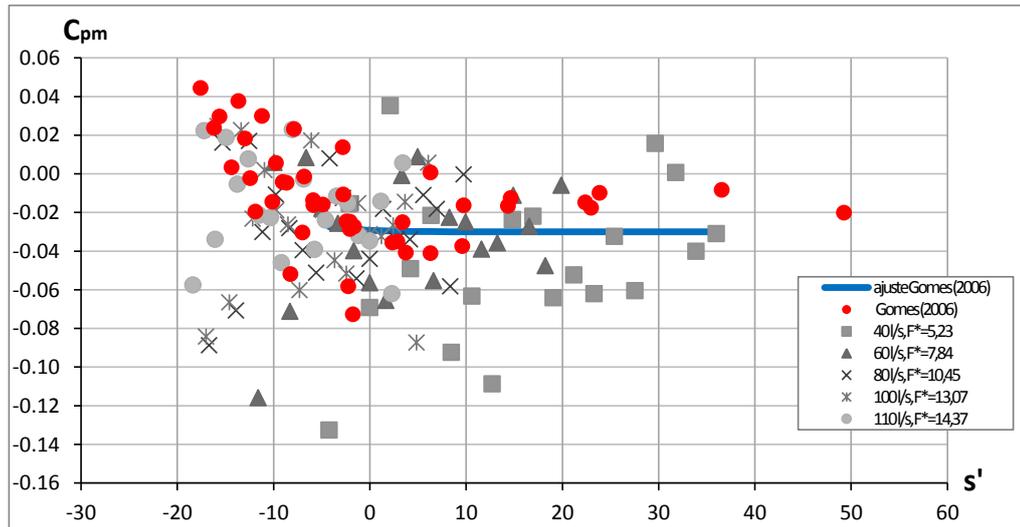


(fonte: elaborado pela autora)

Buscando estabelecer critérios para o comportamento das pressões foi utilizado o coeficiente de pressão  $C_p$ , definido anteriormente na equação 11 e a posição adimensionalizada conforme equação 12. Os valores foram comparados com a equação de ajuste proposta por Gomes

(2006), que usou a mesma equação para previsão das pressões em seu trabalho. As figuras 36, 37 e 38 mostram os resultados dessa comparação para o espelho do degrau.

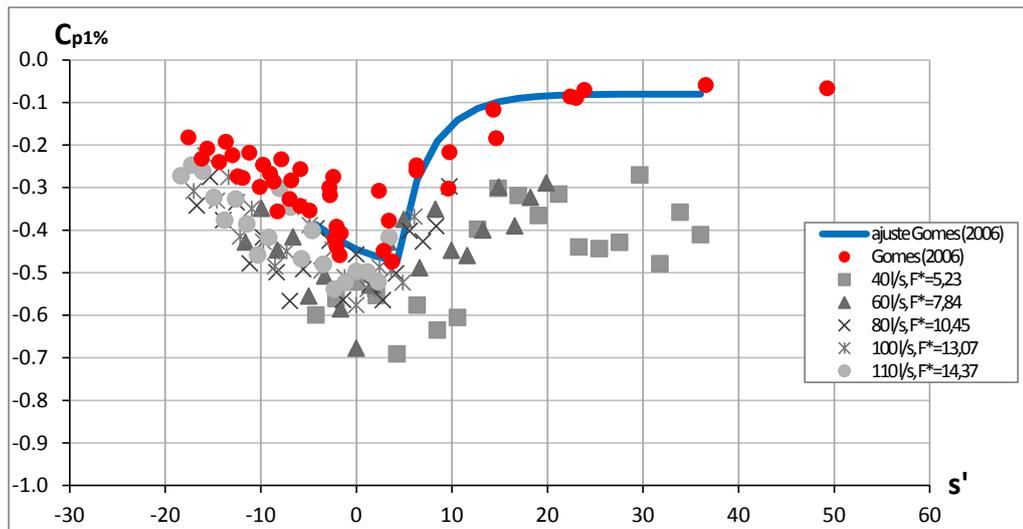
Figura 36 –  $C_p$  para pressão média para o espelho



(fonte: elaborado pela autora)

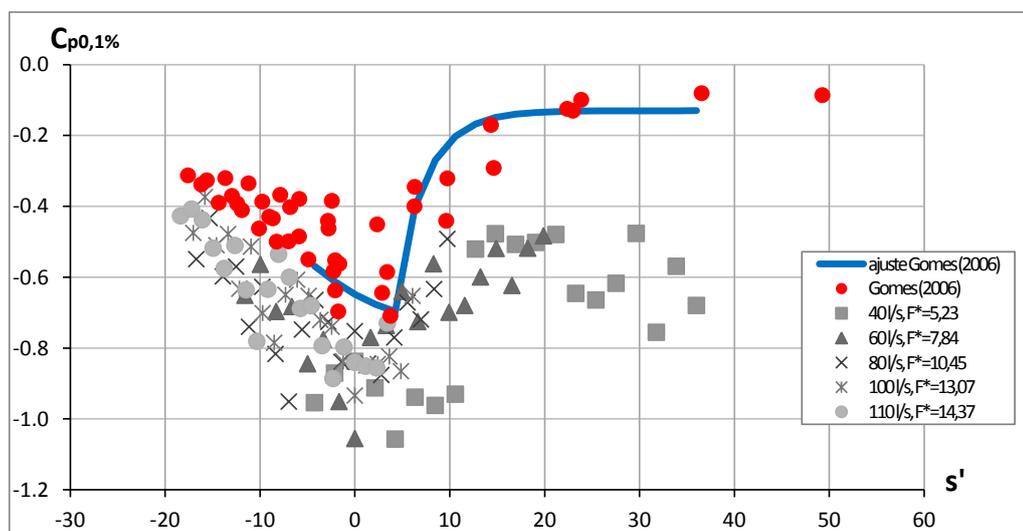
A figura 36 mostra a dispersão dos dados de pressão média adimensionalizados. Os dados de Gomes (2006), que foram medidos somente em 6 degraus ao longo da calha com altura de degrau de 9 cm, estão envolvidos pelos dados do presente estudo (altura do degrau de 6 cm e medições em 20 degraus consecutivos). Pela análise da figura observa-se que os menores valores de coeficientes de pressão média do presente trabalho ocorrem próximo ao ponto de aeração ( $s' = 0$ ) e podem atingir valores de  $C_{pm} = -0,133$ .

Figura 37 –  $C_p$  para pressão com probabilidade de não ser excedida de 1% para o espelho



(fonte: elaborado pela autora)

Figura 38 –  $C_p$  para pressão com probabilidade de não ser excedida de 0,1% para o espelho



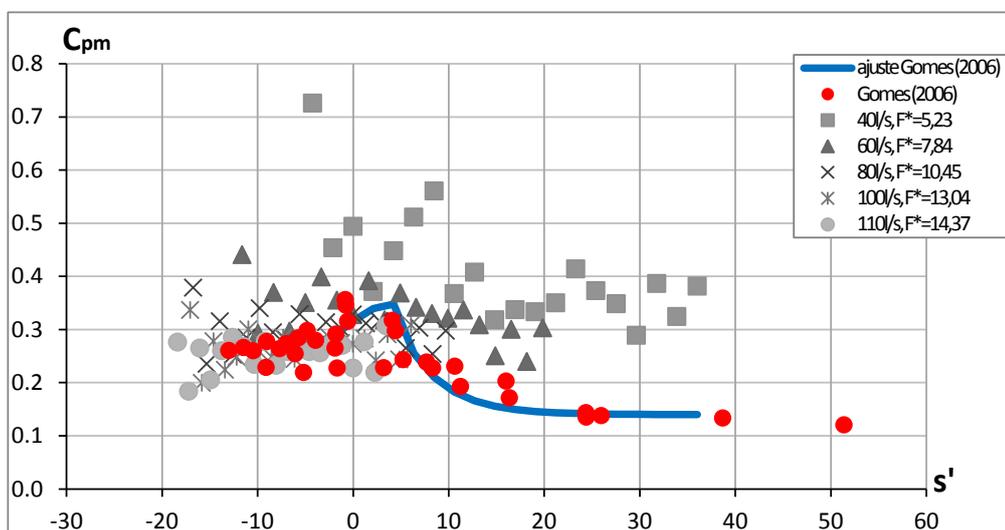
(fonte: elaborado pela autora)

Nas figuras 37 e 38 se pode observar que para essa adimensionalização os resultados de  $C_{p1\%}$  e  $C_{p0,1\%}$  mostram grande dispersão. As curvas ajustadas para as pressões mínimas merecem atenção pelo fato de estarem ajustadas a valores acima dos encontrados no presente trabalho, o que pode estar contra a segurança para análise de arrancamento da quina do degrau ou erosão do mesmo. Observa-se que os dados, apesar da grande dispersão, apresentam uma tendência bem definida, ou seja, os valores de  $C_p$  diminuem até próximo ao ponto de

aeração ( $s' = 0$ ), depois desse ponto aumentam até a posição  $s' = 10$  e depois desse trecho permanecem praticamente constantes. Os dados de Gomes (2006) apresentam valores superiores aos do presente trabalho, talvez ao fato da altura do degrau ser maior. O mínimo valor de  $C_{p1\%}$  encontrado pelo autor citado foi de -0,75 enquanto que no presente trabalho foi de -1,08.

Nas figuras 39 a 43 é feita uma comparação dos dados encontrados nesse trabalho para o patamar do degrau, com os resultados de Gomes (2006).

Figura 39 –  $C_p$  para pressão média para o patamar

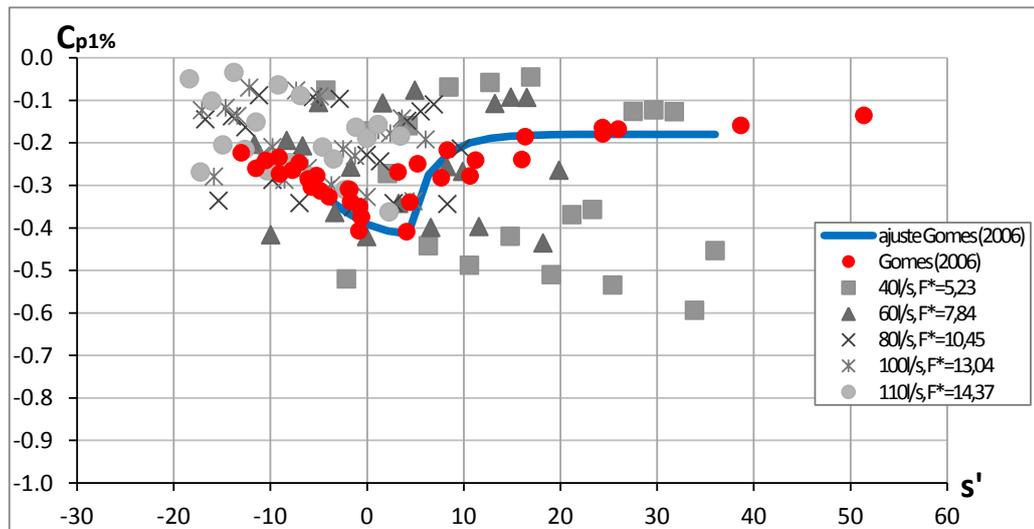


(fonte: elaborado pela autora)

Na figura 39 observa-se que o  $C_{pm}$  no patamar apresenta uma grande dispersão e que os valores encontrados por Gomes (2006) após o ponto de aeração são inferiores aos do presente estudo. Essa diferença merece atenção, pois como a equação ajustada pelo autor citado tende a um limite inferior ao dos resultados obtidos no presente trabalho, pode ir contra a segurança da estrutura já que, altas pressões positivas no patamar podem danificar a estrutura.

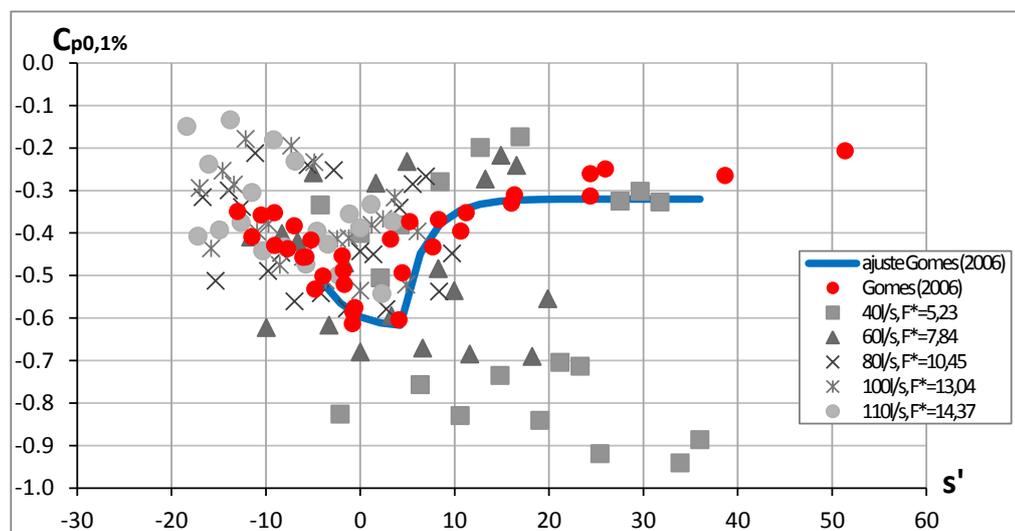
As figuras 40 e 41 apresentam os valores de  $C_{p1\%}$  e  $C_{p0,1\%}$  para o patamar em função da posição relativa do degrau. Pode-se observar que os dados apresentam uma grande dispersão, estando os dados de Gomes (2006) dentro da dispersão do presente estudo.

Figura 40 –  $C_p$  para pressão com probabilidade de não ser excedida de 1% para o patamar



(fonte: elaborado pela autora)

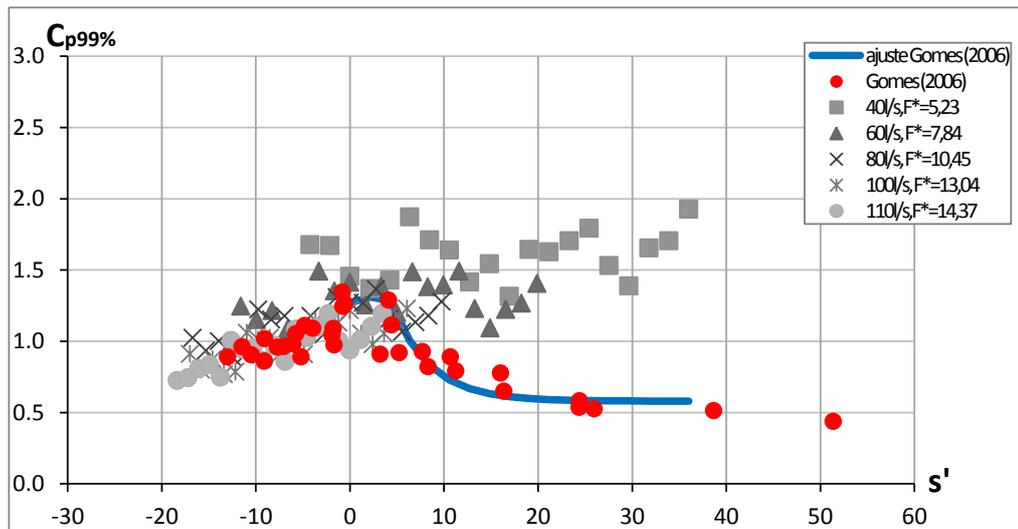
Figura 41 –  $C_p$  para pressão com probabilidade de não ser excedida de 0,1% para o patamar



(fonte: elaborado pela autora)

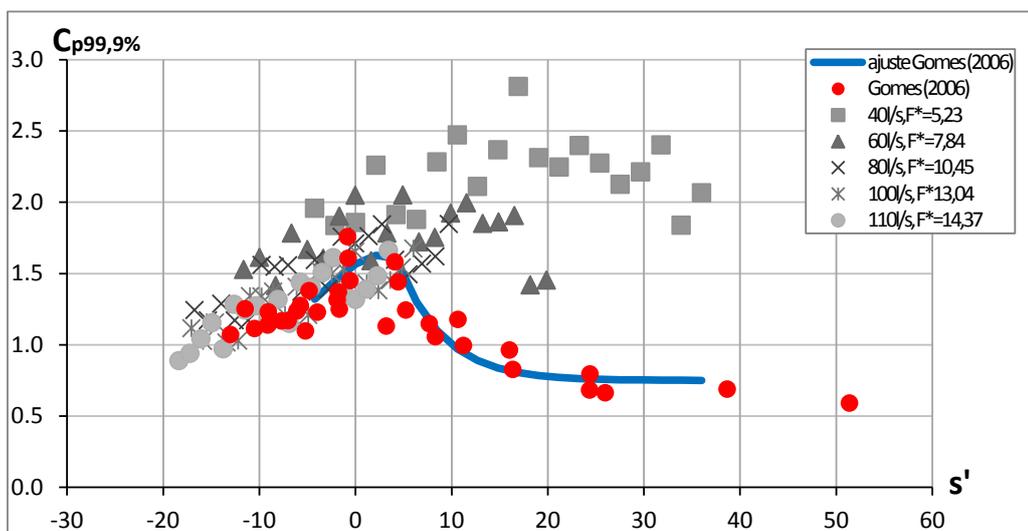
No patamar, devido à incidência de pressões médias positivas é importante a caracterização das pressões com probabilidade de não serem excedidas de 99 e 99,9% (pressões extremas máximas), a fim de verificar zonas com maior probabilidade de sofrerem danos devido a altas pressões, que associadas à pressões negativas no espelho podem arrancar pedaços da quina do degrau.

Figura 42 –  $C_p$  para pressão com probabilidade de não ser excedida de 99% para o patamar



(fonte: elaborado pela autora)

Figura 43 –  $C_p$  para pressão com probabilidade de não ser excedida de 99,9% no patamar



(fonte: elaborado pela autora)

Nas figuras 42 e 43 observa-se que há uma grande dispersão, mas, para os resultados do presente estudo, há uma tendência de os valores continuarem a aumentar assintoticamente mesmo após o ponto de início e aeração ( $s' = 0$ ). Os valores de Gomes (2006) seguem a mesma tendência até  $s' \leq 5$ , porém, diminuem após essa posição.

Conforme observado, os dados encontrados no presente trabalho estão tendendo a valores mais críticos tanto para pressões mínimas quanto para pressões máximas, em relação aos resultados encontrados por Gomes (2006). Essa diferença merece atenção, pois os valores encontrados estão a favor da segurança quando do dimensionamento de um vertedouro em degrau. Entretanto, julga-se que maiores estudos devem ser feitos para determinar a verdadeira influência da altura dos degraus nas pressões médias, máximas e mínimas.

## 7 CONCLUSÕES

Com a análise dos dados feita no presente estudo e as comparações com resultados de outros autores foi possível determinar alguns parâmetros para caracterização da aeração e comportamento das pressões sobre a calha de um vertedouro em degraus.

### 7.1 CONCLUSÕES QUANTO AO INÍCIO DA AERAÇÃO

Comparando os dados obtidos com outros autores verificou-se que os dados coletados estão coerentes. Assim foi possível propor uma equação de ajuste (equação 20) para diferentes declividades e alturas de degrau, conforme mostrado anteriormente.

Quanto à altura do escoamento no ponto de aeração, não foram feitas medições no presente trabalho. Porém, analisando dados de diferentes autores, foi proposta uma equação de ajuste (equação 21) para diferentes declividades de calha e diferentes alturas de degrau.

### 7.2 CONCLUSÕES QUANTO AO COMPORTAMENTO DAS PRESSÕES

Analisando os dados coletados concluiu-se que os resultados mostraram-se mais críticos para pressões extremas (a favor da segurança) do que os encontrados por Gomes (2006). No comportamento dos  $C_{p's}$ , apesar da grande dispersão, é possível caracterizar o comportamento dos resultados, conforme mostrado abaixo.

#### 7.2.1 Características das pressões no espelho

Observou-se que no espelho os valores de  $C_p$  atingem valores mínimos em torno da posição do ponto de início de aeração ( $s' = 0$ ). Para as pressões médias no espelho, os coeficientes  $C_{pm}$  mínimos para essa posição foram de aproximadamente -0,13, tendendo a se estabilizar em valores próximos a -0,03 para posições  $s' > 30$ .

Para as pressões com probabilidade de não serem excedidas de 1%, o valor de  $C_{p1\%}$  no ponto de início de aeração foi de aproximadamente -0,07 tendendo a se estabilizar em torno de -0,4 para  $s' > 20$ . Já para as pressões com probabilidade de não serem excedidas de 0,1%, os valores de  $C_{p0,1\%}$  para  $s' = 0$  ficaram em torno de -1,1 tendem a se estabilizar em torno de -0,6 para  $s' > 20$ .

### 7.2.1 Características das pressões no patamar

No patamar as pressões médias máximas ocorreram próximo a posição  $s' = 10$  com valores de  $C_{pm}$  em torno de 0,58. As pressões médias mínimas permanecem constantes com valores de  $C_{pm}$  em torno de 0,23 para posições de  $s' > 10$  e tendem a aumentar até 0,3 em  $s' = 30$ .

As pressões mínimas com probabilidade de 1 e 0,1% de não serem excedidas para o patamar permanecem constantes após o início da aeração ( $s' = 0$ ), os valores mínimos de  $C_{p1\%}$  ficam em torno de -0,5 e os valores mínimos de  $C_{p0,1\%}$  em torno de -0,8. As pressões com probabilidade de 99% de não serem excedidas permanecem constantes após o ponto de início de aeração com valores de  $C_{p99\%}$  em torno de 1,8. Para as pressões com probabilidade de 99,9% de não serem excedidas, os valores de  $C_{p99,9\%}$  também permanecem constantes após essa posição com valores em torno de 2,4.

## 7.3 RECOMENDAÇÕES

Recomenda-se que sejam continuados os estudos com medições em todos os degraus da calha e com diferentes alturas de degrau, inclinações da calha e cargas sobre a crista do vertedouro a fim de caracterizar as pressões hidrodinâmicas ao longo da calha em degrau permitindo um correto dimensionamento deste tipo de estrutura.

## REFERÊNCIAS

- AMADOR, A. **Comportamiento Hidráulico de los Aliaderos Escalonados em Presas de Hormogón Compactado**, 2005. Tese (Doctorado en Ingeniería) – Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona.
- AMADOR, A.; SÁNCHEZ-JUNY, M.; DOLZ, J.; SÁNCHEZ-TEMBLEQUE, F.; PUERTAS, J. Estudo experimental no campo de pressões e de velocidades num descarregador de cheias em degraus. In.: CONGRESSO DE ÁGUA DE PORTUGAL, 7. 2004, Lisboa. **Resumos...** Lisboa: Associação Portuguesa dos Recursos Hídricos, 2004.
- ARNDT, R. E. A. **Cavitation in fluid machinery and hydraulic structures**. 1981. Disponível em: <<http://expha.com/sean/UF/AIAA/Papers/cavitation%20arndt.pdf>>. Acesso em: 15 ago. 2011.
- BINDO, M.; GAUTIER, J.; LACROIX, F. The stepped spilway of M'Bali dam. **Water Power & Dam Construction**, p. 35-36, 1993.
- CHANSON, H. Comparison of energy dissipation between nappe and skimming flow regimes on stepped chutes. **Journal of Hydraulic Research**, IAHR, Delft, v. 32, n. 2, p. 213-435, 1994.
- \_\_\_\_\_. Hydraulics of Stepped Spillways: current status. **Journal of Hydraulic Engineering**, ASCE, v. 126, n. 9, p. 636-637, 2000.
- \_\_\_\_\_. **Hydraulic design of stepped spillways and downstream energy dissipators: dam engineering**, Brisbane: University of Queensland, 2001.
- DAI PRÁ, M. **Características do Escoamento Sobre Vertedouros em Degraus de Declividade 1V:1H**. 2004. 134 f. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) – Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- GOMES, J. **Campo de Pressões: Condições de Incipiência à Cavitação em Vertedouros em Degraus com Declividade 1V:0,75H**. 2006. 173 f. Tese (Doutorado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) – Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- MATOS, J. S. G. **Emulsão de Ar e Dissipação de Energia do Escoamento em Descarregadores em Degraus**, 1999. Tese (Doutorado em Engenharia) – Instituto Superior Técnico, Lisboa
- MATOS, J.; QUINTELA, A.; RAMOS, C. M. Sobre a proteção contra erosão de cavitação em descarregadores de cheias em degrau. In.: CONGRESSO DE ÁGUA DE PORTUGAL, 5, 2001, Lisboa. **Resumos...** Lisboa: Associação Portuguesa dos Recursos Hídricos, 2001.
- POVH, P. H. **Avaliação da Energia Residual a Jusante de Vertedouros em Degraus com Fluxo em Skimming Flow**. 2000. 141f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Departamento de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba.

SANAGIOTTO, D. **Características do Escoamento sobre Vertedouros em Degraus de Declividade 1V:0,75H**. 2003. 118 f. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) – Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

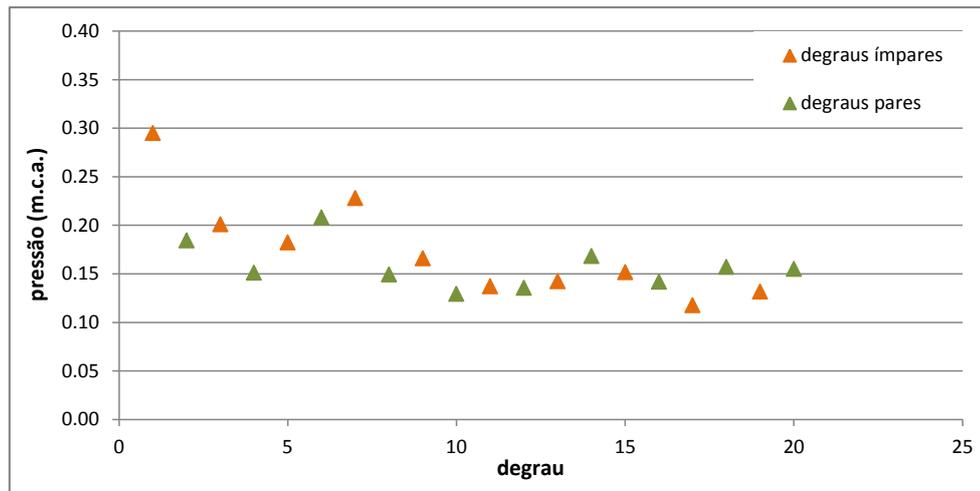
TOZZI, M. J. **Caracterização/Comportamento de Escoamentos em Vertedouros com Paramento em Degraus**. 1992. 302 f. Tese (Doutorado em Hidráulica) – Universidade de São Paulo, São Paulo.

## **ANEXO A – Tabela com posição dos transdutores**

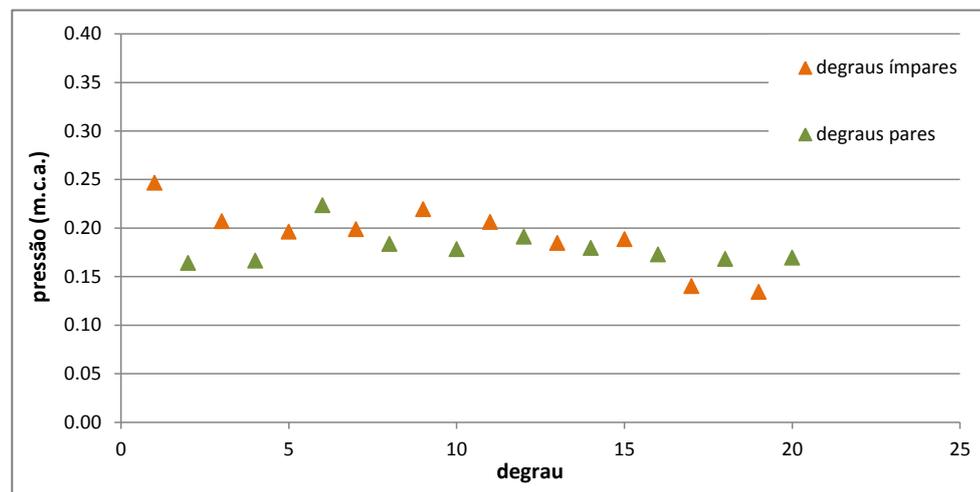
| <b>DEGRAU</b> | <b>POSIÇÃO X (m)</b> | <b>POSIÇÃO Y (m)</b> | <b>L (m)</b> |
|---------------|----------------------|----------------------|--------------|
| 1             | 0.045                | 0.060                | 0.859        |
| 2             | 0.090                | 0.120                | 0.934        |
| 3             | 0.135                | 0.180                | 1.009        |
| 4             | 0.180                | 0.240                | 1.084        |
| 5             | 0.225                | 0.300                | 1.159        |
| 6             | 0.270                | 0.360                | 1.234        |
| 7             | 0.315                | 0.420                | 1.309        |
| 8             | 0.360                | 0.480                | 1.384        |
| 9             | 0.405                | 0.540                | 1.459        |
| 10            | 0.450                | 0.600                | 1.534        |
| 11            | 0.495                | 0.660                | 1.609        |
| 12            | 0.540                | 0.720                | 1.684        |
| 13            | 0.585                | 0.780                | 1.759        |
| 14            | 0.630                | 0.840                | 1.834        |
| 15            | 0.675                | 0.900                | 1.909        |
| 16            | 0.720                | 0.960                | 1.984        |
| 17            | 0.765                | 1.020                | 2.059        |
| 18            | 0.810                | 1.080                | 2.134        |
| 19            | 0.855                | 1.140                | 2.209        |
| 20            | 0.900                | 1.200                | 2.284        |

**ANEXO B – Gráficos com valores de pressões médias  
nos patamares e espelhos dos degraus**

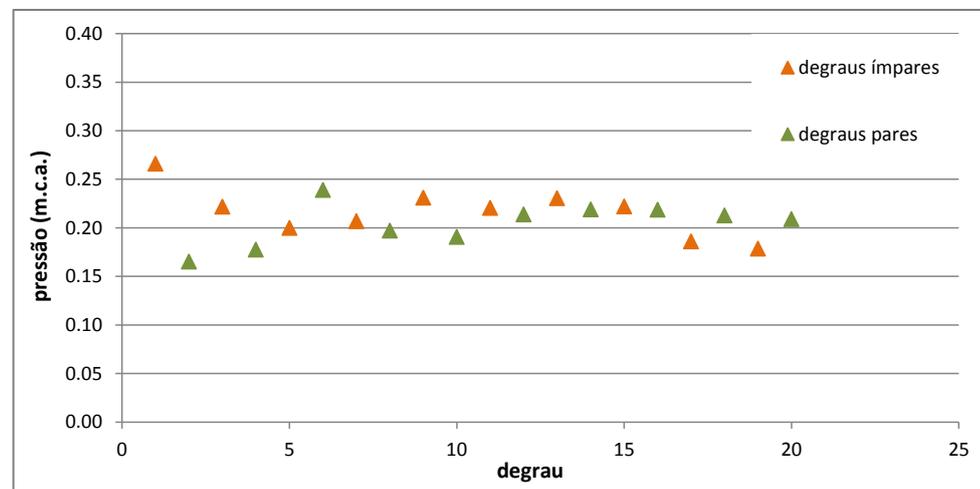
Patamar - Vazão de 40 l/s



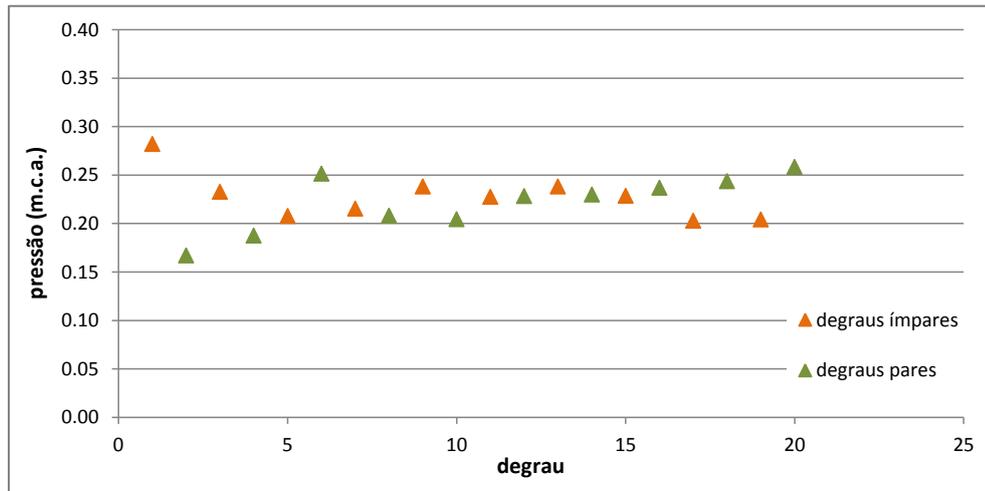
Patamar - Vazão de 60 l/s



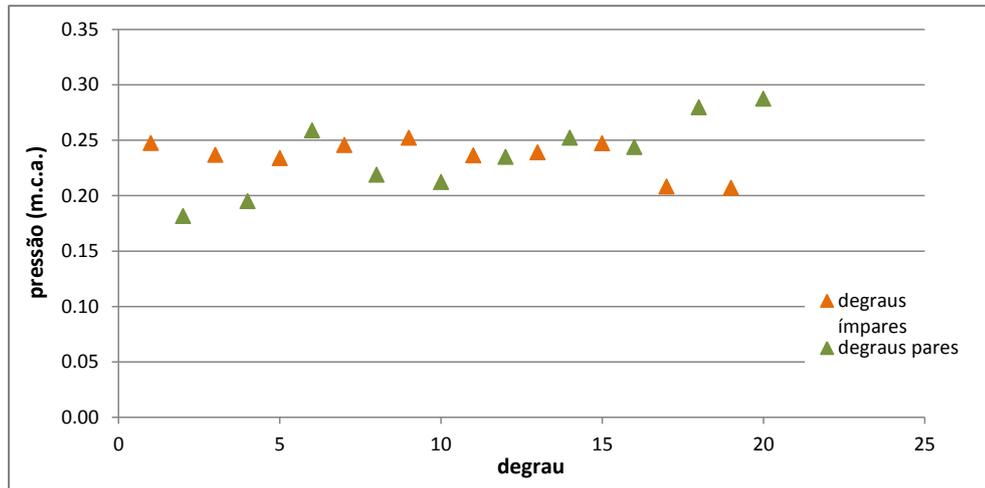
Patamar - Vazão de 80 l/s



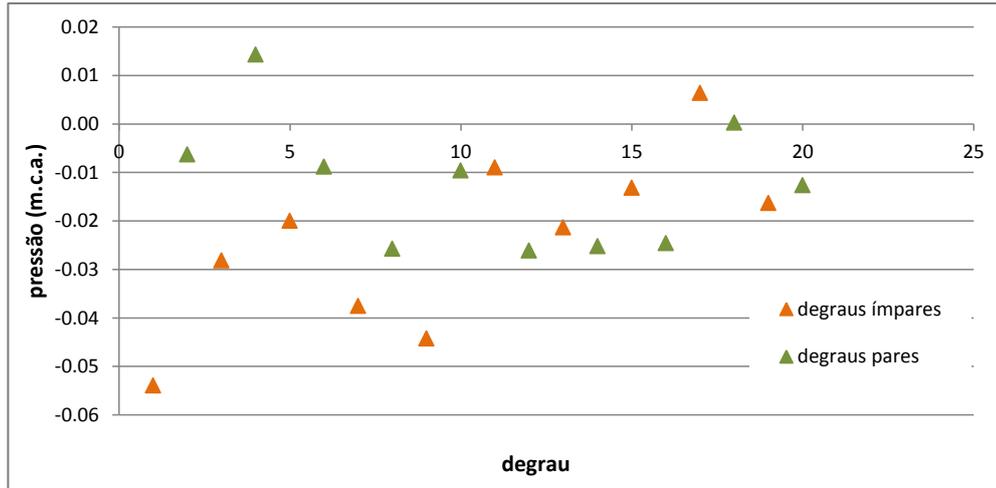
Patamar - Vazão de 100 l/s



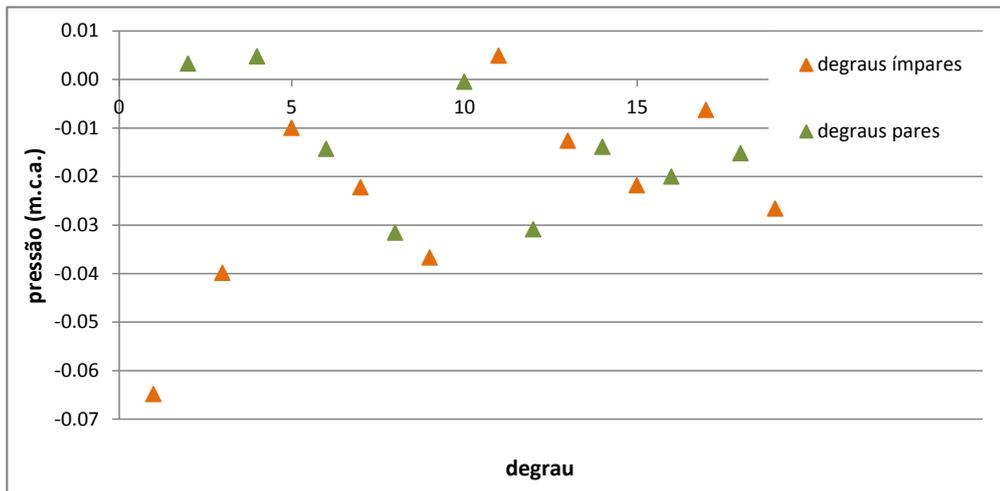
Patamar - Vazão de 120 l/s



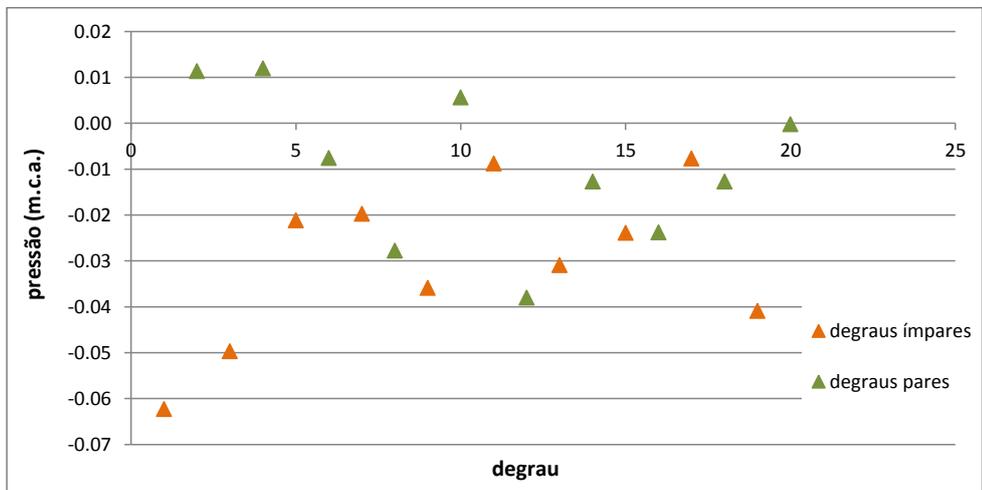
Espelho - Vazão de 40 l/s



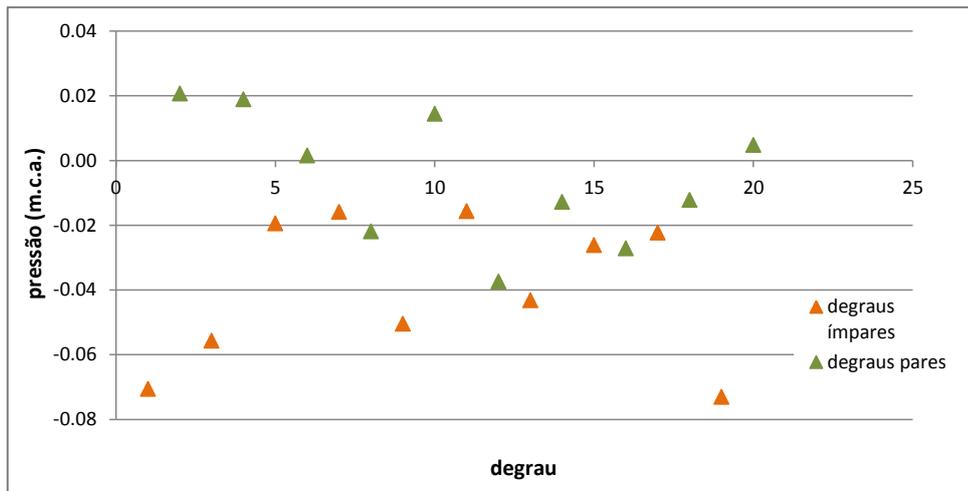
Espelho -Vazão de 60 l/s



Espelho -Vazão de 80 l/s



Espelho - Vazão de 100 l/s



Espelho - Vazão de 120 l/s

