

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

CARLOS OLAVO SLOTA OVELAR

VERTEDOUROS COM PILARES ALARGADOS E BACIA DE DISSIPÇÃO:  
AVALIAÇÃO DO POTENCIAL EROSIVO E COMPRIMENTO DA BACIA COM MODELO  
HIDRÁULICO REDUZIDO

CURITIBA

2018

CARLOS OLAVO SLOTA OVELAR

VERTEDOUROS COM PILARES ALARGADOS E BACIA DE DISSIPÇÃO:  
AVALIAÇÃO DO POTENCIAL EROSIVO E COMPRIMENTO DA BACIA COM MODELO  
HIDRÁULICO REDUZIDO

Dissertação apresentada como requisito parcial  
à obtenção do grau de Mestre em Engenharia  
de Recursos Hídricos, pelo Programa de Pós-  
Graduação em Engenharia de Recursos Hídri-  
cos e Ambiental, Setor de Tecnologia, Universi-  
dade Federal do Paraná.

Orientador: Prof José Junji Ota, DSc

CURITIBA

2018

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELO SISTEMA DE BIBLIOTECAS/UFPR  
BIBLIOTECA DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA

---

OV96v

Ovelar, Carlos Olavo Slota

Vertedouros com pilares alargados e bacia de dissipação: avaliação do potencial erosivo e comprimento da bacia com modelo hidráulico reduzido / Carlos Olavo Slota Ovelar. – Curitiba, 2018.

97 p. : il. color.

Dissertação - Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental, 2018.

Orientador: José Junji Ota.

1. Vertedouros. 2. Bacia de dissipação. 3. Pilares alargados. 3. Flaring piers. 4. Erosão.  
I. Universidade Federal do Paraná. II. Ota, José Junji. III. Título.

CDD: 627

---

Bibliotecária: Romilda Santos - CRB-9/1214

## TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em ENGENHARIA DE RECURSOS HÍDRICOS E AMBIENTAL da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da Dissertação de Mestrado de **CARLOS OLAVO SLOTA OVELAR**, intitulada: **VERTEDOIRO COM PILARES ALARGADOS E BACIA DE DISSIPAÇÃO: AVALIAÇÃO DO POTENCIAL EROSIVO E COMPRIMENTO DA BACIA COM MODELO HIDRÁULICO REDUZIDO**, após terem inquirido a aluna e realizado a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO no rito de defesa. A outorga do título de Mestre está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

Curitiba, 16 de Março de 2018.

  
JOSÉ JUNJI OTA(UFPR)  
(Presidente da Banca Examinadora)

  
MAURÍCIO DZIEDZIC(null)

  
WILLIAM BONINO RAUEN(UFPR)

  
ANDRE LUIZ TONSO FABIANI(UFPR)



*A Deus,  
e a tudo que dEle provém.*

## RESUMO

Em usinas hidrelétricas, os vertedouros têm a função de escoar a vazão excedente do reservatório com segurança, porém esse fluxo efluente possui cargas elevadas de energia cinética que podem provocar severas erosões no leito a jusante das estruturas. Por isso, vertedouros estão sempre associados a outras estruturas terminais para diminuir os níveis de energia cinética do escoamento e assim mesmo, ainda podem ocorrer erosões no leito do rio. A fim de aumentar a dissipação de energia e minimizar o poder erosivo do escoamento, projetistas chineses desenvolveram, na década de 1980, um tipo de pilar de vertedouro que melhora a dissipação de energia. Esse tipo de pilar foi denominado *flaring piers*. Os *flaring piers*, ou pilares alargados, caracterizam-se por um alargamento transversal no sentido do escoamento dos pilares do vertedouro. Esta dissertação de mestrado tem por finalidade avaliar o desempenho hidráulico de vertedouros de pilares alargados com bacia de dissipação em questões de potencial erosivo do escoamento, baseando-se na hipótese de que a associação de pilares alargados e vertedouros com bacia pode diminuir volumes e profundidades de erosão do leito a jusante das estruturas, em comparação com vertedouro de pilares retos (convencionais). A metodologia empregada foi a execução de oito ensaios em modelo hidráulico reduzido de um vertedouro com bacia de dissipação com pilares retos e com pilares alargados, em escala de 1:50. Foram estudadas quatro bacias de dissipação com diferentes comprimentos. Para a avaliação do potencial erosivo do escoamento, os ensaios foram realizados com fundo em material móvel erodível. O fundo móvel foi composto com material granular de diâmetro médio de 11,0 mm - 0,56 m no protótipo. Notou-se que a adição de pilares alargados em vertedouros com bacia de dissipação, pode diminuir o comprimento do rolo superficial do ressalto hidráulico comparado com vertedouro de pilares retos. Com relação às erosões, observaram-se menores profundidades e volumes de erosões nos ensaios com vertedouro de pilares alargados, comparados com os ensaios de pilares retos e mesma bacia de dissipação. As profundidades e volumes de erosão observados no ensaio com vertedouro de pilares retos e bacia de dissipação de comprimento igual a 88,0 m foram equivalentes ao observado no ensaio com vertedouro de pilares alargados e bacia de dissipação de comprimento igual a 54 m, ou seja, com pilares alargados, obteve-se equivalência de erosões com uma bacia de dissipação com comprimento 38,6% menor do que com pilares convencionais. O modelo reduzido faz parte do projeto de P&D Aneel 6491-0369/2015 “Desenvolvimento de critérios para dimensionamento de bacias de dissipação de energia com o uso de *flaring piers* utilizando modelo hidráulico reduzido”.

Palavras-chaves: Vertedouro. Bacia de dissipação. Pilares alargados. Flaring piers. Erosão. Modelo reduzido.

## ABSTRACT

In hydroelectric plants, the spillways have the function of discharge the excess flow of the reservoir safely, but the effluent flow of spillways has high loads of kinetic energy that can cause critical scours in the river bed downstream the structures. For this reason, spillways always are associated with other terminal structures to decrease of kinetic energy. Even with this association, downstream river bed erosion can still occur. In order to increase the dissipation of hydraulic energy and lower the erosive power in the effluent jets from spillways, Chinese designers developed, in the eighties, a type of spillways piers that widens their width in the direction of flow. In this context, this dissertation aims to evaluate erosions downstream of spillways with stilling basins using flaring piers and conventional piers, with the hypothesis that use of flaring pier associated with spillways with stilling basins can lower volumes and depths of erosion of downstream bed in comparison with spillways with conventional piers. Eight tests were carried out in a hydraulic model of a spillway with comparing conventional and flaring piers, at 1:50 scale. Four length of stilling basins were tested. The scour study was carried out with the bed of the model in granular movable material. The mean diameter of grain was 11 mm, which represented 0,56 m in the prototype. As results, the use of flaring piers in spillway with stilling basin decrease the length of the surface roller of the hydraulic jump compared to spillway with conventional piers. The erosion depths and volumes results smaller in the spillway with flaring piers, compared to the tests of conventional piers at same length of stilling basin. The depths and volumes of scours observed in the test of the spillway with conventional piers and stilling basin of 88,0 m in length were equivalent to those observed in the spillway test with flaring piers and a stilling basin of 54 m in length, i.e. in spillway with flaring piers, the length of the basin can be reduced by 38,6% with equal erosion depth and volume that observed with spillway with conventional piers. The scale reduced hydraulic model is part of the R&D project Aneel 6491-0369/2015 "Development of design criteria of stilling basins with flaring piers using scale reduced hydraulic model".

Key-words: Spillway. Stilling basin. Flaring piers. Erosion. Scour. Hydraulic Scaled Model.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 2.1 – DETALHES DO RESSALTO HIDRÁULICO E ENERGIA ESPECÍFICA	21
FIGURA 2.2 – CLASSIFICAÇÃO DO RESSALTO HIDRÁULICO SEGUNDO O NÚMERO DE FROUDE . . . . .	22
FIGURA 2.3 – RELAÇÃO ENTRE O COMPRIMENTO DO RESSALTO HIDRÁULICO E O NÚMERO DE FROUDE NA SEÇÃO A MONTANTE DO RESSALTO . . . . .	23
FIGURA 2.4 – COMPRIMENTO DA BACIA DE DISSIPACÃO PARA NÚMEROS DE FROUDE ACIMA DE 4,5 . . . . .	25
FIGURA 2.5 – DETALHES DO MODELO REDUZIDO UTILIZADO NOS ENSAIOS DE FARHOUDI E SMITH . . . . .	29
FIGURA 2.6 – CARACTERÍSTICA DO PROCESSO DE EROÇÃO A JUSANTE DE RESSALTOS HIDRÁULICOS . . . . .	30
FIGURA 2.7 – CARACTERÍSTICA DO PROCESSO DE EROÇÃO A JUSANTE DE RESSALTOS HIDRÁULICOS . . . . .	32
FIGURA 2.8 – DIAGRAMA DE SHIELDS (1936) . . . . .	33
FIGURA 2.9 – DETALHES GEOMÉTRICOS DOS PILARES ALARGADOS . . . . .	34
FIGURA 2.10 – PADRÃO DE ESCOAMENTO EM VERTEDOUROS COM PILARES ALARGADOS . . . . .	35
FIGURA 2.11 – VERTEDOIRO DE PANJIAKOU - PILARES ALARGADOS DE SEÇÃO RETANGULAR . . . . .	36
FIGURA 2.12 – DETALHES GEOMÉTRICOS DOS PILARES ALARGADOS DE SEÇÃO Y . . . . .	36
FIGURA 2.13 – VISTA DO VERTEDOIRO DA HIDRELÉTRICA DE ANKANG - CHINA - PILARES ALARGADOS DE SEÇÃO Y . . . . .	37
FIGURA 2.14 – VISTA DE JUSANTE DO VERTEDOIRO DA HIDRELÉTRICA DE YANTAN - CHINA - PILARES ALARGADOS DE SEÇÃO Y . . . . .	37
FIGURA 2.15 – VISTA DE JUSANTE DA OPERAÇÃO DO VERTEDOIRO DA HIDRELÉTRICA DE ANKANG - CHINA - PILARES ALARGADOS DE SEÇÃO Y . . . . .	38
FIGURA 2.16 – VISTA DE JUSANTE DA OPERAÇÃO DO VERTEDOIRO DA HIDRELÉTRICA DE YANTAN - CHINA - PILARES ALARGADOS DE SEÇÃO Y . . . . .	38
FIGURA 2.17 – PILARES ALARGADOS DE SEÇÃO TRANSVERSAL X . . . . .	39
FIGURA 2.18 – VISTA DE JUSANTE DO VERTEDOIRO DA HIDRELÉTRICA DE SUOFENGYING - CHINA - PILARES ALARGADOS DE SEÇÃO TRANSVERSAL X . . . . .	40

FIGURA 2.19-VISTA DE JUSANTE DA OPERAÇÃO DO VERTEDOIRO DA HIDRELÉTRICA DE SUOFENGYING - CHINA - PILARES ALAR- GADOS DE SEÇÃO TRANSVERSAL X . . . . .	40
FIGURA 2.20-SEÇÃO LONGITUDINAL DO VERTEDOIRO DE ANKANG, CHINA - PILARES ALARGADOS DE SEÇÃO Y ASSOCIADOS A UMA BACIA DE DISSIPAÇÃO . . . . .	41
FIGURA 2.21-RESSALTO HIDRÁULICO COM PILARES RETOS (ACIMA) E COM PILARES ALARGADOS (ABAIXO) COM ASSOCIAÇÃO DE BACIA DE DISSIPAÇÃO . . . . .	43
FIGURA 2.22-RESSALTO HIDRÁULICO A JUSANTE DE VERTEDOUROS COM PILARES ALARGADOS . . . . .	47
FIGURA 3.1 – DETALHES DA IMPLANTAÇÃO DO MODELO HIDRÁULICO RE- DUZIDO . . . . .	52
FIGURA 3.2–DETALHES DO PROTÓTIPO DO VERTEDOIRO - PLANTA E SEÇÃO LONGITUDINAL . . . . .	54
FIGURA 3.3–DETALHES DA CRISTA DO PROTÓTIPO DO VERTEDOIRO . .	54
FIGURA 3.4–DETALHES DA BACIA DE DISSIPAÇÃO . . . . .	56
FIGURA 3.5–MODELO HIDRÁULICO REDUZIDO - VISTA LATERAL DO VER- TEDOIRO . . . . .	56
FIGURA 3.6–MODELO HIDRÁULICO REDUZIDO - VISTA DE JUSANTE DO VERTEDOIRO . . . . .	57
FIGURA 3.7–MODELO HIDRÁULICO REDUZIDO - FUNDO MÓVEL VISTA DE JUSANTE . . . . .	57
FIGURA 3.8–DIAGRAMA DE SHIELDS (1936) - ANÁLISE DE PARTÍCULAS DE 5,5 mm E 11,2 mm PARA MATERIAIS COM MASSA ESPECÍFICA DE 2.650 Kg/m <sup>3</sup> . . . . .	59
FIGURA 3.9–CROQUI DO PROTÓTIPO DOS PILARES ALARGADOS . . . . .	61
FIGURA 3.10-VISTA DE JUSANTE DO MODELO DOS PILARES ALARGADOS	62
FIGURA 4.1 –ESCOAMENTO AO LONGO DO MODELO DO VERTEDOIRO .	66
FIGURA 4.2–ESCOAMENTO AO LONGO DO MODELO DO VERTEDOIRO - VISTA LATERAL . . . . .	67
FIGURA 4.3–ESCOAMENTO AO LONGO DO MODELO DA BACIA DE DISSI- PAÇÃO A ( $L_{BD} = 108$ m - 23% maior) . . . . .	71
FIGURA 4.4–ESCOAMENTO AO LONGO DO MODELO - JUSANTE DA BACIA DE DISSIPAÇÃO A ( $L_{BD} = 108$ m - 23% maior) . . . . .	72
FIGURA 4.5–ESCOAMENTO AO LONGO DO MODELO DA BACIA DE DISSI- PAÇÃO B ( $L_{BD} = 88$ m - padrão USBR) . . . . .	73



FIGURA 4.6–ESCOAMENTO AO LONGO DO MODELO - JUSANTE DA BACIA DE DISSIPACÃO B ( $L_{BD} = 88$ m - padrão USBR) . . . . .	74
FIGURA 4.7–ESCOAMENTO AO LONGO DO MODELO DA BACIA DE DISSIPACÃO C ( $L_{BD} = 74$ m - 16% menor) . . . . .	75
FIGURA 4.8–ESCOAMENTO AO LONGO DO MODELO - JUSANTE DA BACIA DE DISSIPACÃO C ( $L_{BD} = 74$ m - 16% menor) . . . . .	76
FIGURA 4.9–ESCOAMENTO AO LONGO DO MODELO DA BACIA DE DISSIPACÃO D ( $L_{BD} = 54$ m - 39% menor) . . . . .	77
FIGURA 4.10–ESCOAMENTO AO LONGO DO MODELO - JUSANTE DA BACIA DE DISSIPACÃO D ( $L_{BD} = 54$ m - 39% menor) . . . . .	78
FIGURA 4.11–RESULTADO DO SCANNER ANTES DOS ENSAIOS - SUPERFÍCIE INICIAL . . . . .	79
FIGURA 4.12–CURVA DE NÍVEL BACIA A - EROÇÃO APÓS 20 HORAS PROTÓTIPO - COMPARAÇÃO ENTRE PILARES RETOS E ALARGADOS	83
FIGURA 4.13–CURVA DE NÍVEL BACIA B - COMPARAÇÃO ENTRE PILARES RETOS E ALARGADOS - PROTÓTIPO . . . . .	84
FIGURA 4.14–CURVA DE NÍVEL BACIA C - COMPARAÇÃO ENTRE PILARES RETOS E ALARGADOS - PROTÓTIPO . . . . .	85
FIGURA 4.15–CURVA DE NÍVEL BACIA D - COMPARAÇÃO ENTRE PILARES RETOS E ALARGADOS - PROTÓTIPO . . . . .	86
FIGURA 4.16–PROFUNDIDADES DE EROÇÕES - RESUMO . . . . .	87
FIGURA 4.17–ANÁLISE DO COMPRIMENTO DA BACIA DE DISSIPACÃO E DO RESSALTO HIDRÁULICO . . . . .	88

## LISTA DE TABELAS

TABELA 2.1 – RESUMO EQUAÇÕES DO COMPRIMENTO DO RESSALTO HIDRÁULICO POR ELEVATORSKI . . . . .	24
TABELA 2.2 – RESUMO DO DIMENSIONAMENTO DO COMPRIMENTO DE BACIA DE DISSIPACÃO PELOS MÉTODOS DO BUREAU OF RECLAMATION E US ARMY CORPS OF ENGINEERS . . . . .	26
TABELA 2.3 – DADOS DE PILARES ALARGADOS UTILIZADOS EM VERTE- DOUROS . . . . .	44
TABELA 2.4 – NÚMERO DE FROUDE NO INÍCIO DO ALARGAMENTO DOS PILARES . . . . .	45
TABELA 3.1 – VERTEDOUROS COM BACIAS DE DISSIPACÃO - VAZÕES ES- PECÍFICAS NO VÃO DO VERTEDOURO . . . . .	51
TABELA 3.2 – VAZÕES ESPECÍFICAS DEFINIDAS PARA OS ESTUDOS . . . . .	51
TABELA 3.3 – PILARES ALARGADOS UTILIZADOS NO MODELO HIDRÁULICO REDUZIDO . . . . .	61
TABELA 3.4 – ENSAIOS NO MODELO HIDRÁULICO REDUZIDO . . . . .	62
TABELA 4.1 – RESULTADOS DE VOLUMES DE EROSÃO DE MATERIAL MÓ- VEL APÓS OS ENSAIOS . . . . .	79
TABELA 4.2 – VOLUMES DE CONCRETO DOS PILARES ALARGADOS E BA- CIA DE DISSIPACÃO . . . . .	90

## LISTA DE SÍMBOLOS

$D$	profundidade do escoamento (m)
$D_1$	profundidade conjugada de montante do ressalto hidráulico (m)
$D_2$	profundidade conjugada de jusante do ressalto hidráulico (m)
$D_c$	profundidade crítico do escoamento (m)
$E_1$	energia na seção a montante do ressalto hidráulico (m)
$E_2$	energia na seção a jusante do ressalto hidráulico (m)
$\Delta E$	variação da energia no ressalto hidráulico (m)
$V_1$	velocidade na seção a montante do ressalto hidráulico (m/s)
$V_1$	velocidade na seção a montante do ressalto hidráulico (m/s)
$V_2$	velocidade na seção a jusante do ressalto hidráulico (m/s)
$V_c$	velocidade crítica do ressalto hidráulico (m/s)
$g$	aceleração da gravidade (m/s <sup>2</sup> )
$L_{RH}$	comprimento do ressalto hidráulico (m)
$L_{BD}$	comprimento da bacia de dissipação (m)
$F$	número de Froude do escoamento (adm.)
$d_s$	maior profundidade de erosão (m)
$T_w$	profundidade do escoamento a jusante do ressalto hidráulico (m)
$C$	coeficiente (adm.)
$H$	carga hidráulica entre o nível do reservatório e de jusante (m)
$q$	vazão específica (m <sup>3</sup> /s.m)
$\phi$	diâmetro do material granular (m)
$n$	coeficientes das formulações de erosão (adm.)
$h_d$	distância vertical entre a crista do vertedouro e a bacia de dissipação (m)

$P$	paramento de montante do vertedouro (m)
$L_b$	comprimento da erosão: fossa e barra (m)
$L_s$	distância do ponto de maior erosão (m)
$L_h$	comprimento da fossa de erosão (m)
$d_s$	maior profundidade da fossa de erosão (m)
$t$	tempo (s)
$\alpha$	expoente dependente do processo de erosão (adm.)
$x_s$	abscissa do perfil da fossa de erosão (m)
$y_s$	ordenada do perfil da fossa de erosão (m)
$H_e$	carga de operação do vertedouro (m)
$\phi_{50}$	diâmetro médio do material do fundo móvel (m)
$Re_*$	número de Reynolds de corte (adm.)
$v_*$	velocidade de corte (m/s)
$\nu$	viscosidade cinemática da água (m <sup>2</sup> /s)
$\tau$	tensão tangencial junto ao fundo do escoamento (N/m <sup>2</sup> )
$\rho$	massa específica da água (kg/m <sup>3</sup> )
$\tau_*$	tensão tangencial adimensional ou parâmetro de Shields (adm.)
$\rho_s$	massa específica do material do leito (kg/m <sup>3</sup> )
$B$	largura da calha entre pilares na seção sem contração (m)
$b$	largura da calha entre pilares na seção mais estreita da contração (m)
$L$	comprimento do alargamento (m)
$\theta$	ângulo de deflexão (graus)
$a$	largura do alargamento do pilar (m)
$Z$	distância vertical entre a crista do vertedouro e o início do alargamento dos pilares (m)
$l$	largura do pilar sem alargamento (m)

$\omega$	ângulo do vertedouro com a horizontal no início do alargamento (graus)
$\eta$	razão de contração dos pilares alargados (adm.)
$H_d$	carga de projeto do vertedouro (m)
$F_z$	número de Froude na seção de início de alargamento (adm.)
$F_0$	número característico do escoamento (adm.)
$\zeta$	redução da carga na aproximação devido a perdas (adm.)
$q'$	vazão específica que escoava junto ao piso da bacia ( $\text{m}^3/\text{sm}$ )
$q'_L$	vazão específica do fluxo que salta devido aos pilares alargados ( $\text{m}^3/\text{sm}$ )
$q''$	vazão específica na seção II ( $\text{m}^3/\text{sm}$ )
$D'$	profundidade conjugada de montante do ressalto com pilares alargados (m)
$D''$	profundidade conjugada de jusante do ressalto com pilares alargados (m)
$\beta$	ângulo com que o fluxo lançado atinge o escoamento (graus)
$V'$	velocidade média do fluxo que escoava junto ao piso da bacia (m/s)
$V'_L$	velocidade do fluxo que salta devido aos pilares alargados (m/s)
$V''$	velocidade média do fluxo na seção II (m/s)
$\alpha_e$	divisão do fluxo equivalente (adm.)
$D_{1c}$	profundidade crítica de montante do ressalto sem pilares alargados (m)
$D'$	profundidade conjugada de montante do ressalto com pilares alargados (m)
$N$	relação entre as profundidades conjugadas do ressalto com pilares alargados (adm.)
$D''$	profundidade conjugadas de jusante do ressalto sem pilares alargados (m)
$L'_{RH}$	comprimento do ressalto hidráulico com pilares alargados (m)



$x$	abscissa do perfil vertente do vertedouro (m)
$y$	ordenada do perfil vertente do vertedouro (m)
$Z_{res}$	elevação do nível de água no reservatório (m)
$p_{res}$	pressão de água relativa na superfície do reservatório (Pa)
$V_{res}$	velocidade média na superfície do reservatório (m/s)
$Z_1$	elevação do nível de água na seção I-I (m)
$p_1$	pressão de água relativa na superfície da seção I-I (Pa)
$V_1$	velocidade média na superfície da seção I-I (m/s)
$D_1$	profundidade do escoamento na seção I-I (m)
$\gamma$	peso específico da água (N/m <sup>3</sup> )
$C_{des}$	coeficiente de descarga do vertedouro (m)

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b>	<b>17</b>
1.1 JUSTIFICATIVA	17
1.2 OBJETIVOS	19
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>20</b>
2.1 DISSIPACÃO DE ENERGIA POR RESSALTO HIDRÁULICO	20
2.1.1 Ressalto Hidráulico	20
2.1.2 Bacia de Dissipação	24
2.1.3 Erosão a Jusante de Ressalto Hidráulico	27
2.2 PILARES ALARGADOS TIPO <i>FLARING PIERS</i>	34
2.2.1 Definição dos Pilares Alargados	34
2.2.2 Pilares Alargados Associados a Bacia de Dissipação	41
2.2.3 Dimensionamento dos Pilares Alargados	43
2.2.4 Ressalto Hidráulico em Vertedouros com Pilares Alargados	46
<b>3 MATERIAIS E MÉTODOS</b>	<b>50</b>
3.1 MODELO HIDRÁULICO REDUZIDO	50
3.1.1 Definição da Escala de Redução Geométrica	50
3.1.2 Definições das Vazões	51
3.1.3 Dimensionamento do Canal	52
3.1.4 Dimensionamento do Modelo do Vertedouro e Bacia de Dissipação	53
3.1.5 Definição do Material Erodível	58
3.1.6 Dimensionamento dos Pilares Alargados	59
3.2 DEFINIÇÃO DOS ENSAIOS	62
3.2.1 Vazão e Tempo de Exposição	63
3.2.2 Metodologia dos Ensaios	63
3.2.3 Equipamentos Utilizados	64
<b>4 RESULTADOS</b>	<b>65</b>
4.1 CARACTERIZAÇÃO DO ESCOAMENTO	65
4.1.1 escoamento ao longo do Vertedouro	65
4.1.2 escoamento na Bacia de Dissipação	68
4.2 LEVANTAMENTO ALTIMÉTRICO DO FUNDO MÓVEL	79
4.3 ANÁLISE DAS PROFUNDIDADES DE EROSÕES	87
4.4 ANÁLISE DO COMPRIMENTO DA BACIA DE DISSIPACÃO E RESSALTO HIDRÁULICO	88

4.5 ANÁLISE SOBRE VOLUMES DE CONCRETO PARA A UTILIZAÇÃO DE PILARES ALARGADOS . . . . .	89
<b>5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES . . . . .</b>	<b>91</b>
<b>REFERÊNCIAS . . . . .</b>	<b>94</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Uma solução consolidada para uso dos recursos hídricos na geração de energia hidrelétrica é o armazenamento de água em volume e energia potencial em reservatórios. Em ciclos hidrológicos de cheias, a vazão afluente no reservatório muitas vezes é maior que a capacidade de vazão utilizada para geração de energia e parte ou a totalidade da vazão afluente deve ser liberada do reservatório. Em usinas hidrelétricas, o vertedouro é a estrutura responsável em extravasar o excedente da vazão. Porém o fluxo de água efluente do vertedouro contém energia cinética proporcional à energia potencial estocada no reservatório e, se não devidamente dissipada, pode ocasionar erosões severas no leito a jusante das estruturas. Uma maneira eficaz de diminuir os níveis de energia cinética do escoamento é associar ao vertedouro uma bacia de dissipação por ressalto hidráulico, visto que o ressalto hidráulico além de dissipar energia, também transforma os níveis de energia cinética em energia potencial (NOVAK et al., 2001).

Mesmo a associação de vertedouros com bacias de dissipação em ressalto hidráulico promovendo boa dissipação de energia hidráulica, podem ocorrer erosões a jusante destas estruturas (U.S. Department of the Interior, 1982). Nesse contexto, na década de 1980 pesquisadores chineses desenvolveram uma geometria de pilar de vertedouros capaz de aumentar a dissipação de energia hidráulica em vertedouros com bacia de dissipação. Intitulado *flaring piers* ou pilares alargados, caracteriza-se por um alargamento relativamente abrupto dos pilares no sentido do fluxo pelo vertedouro. Com isso, estreita-se a passagem do fluxo, fazendo com que o escoamento adjacente aos pilares se direcionem para o eixo do vão causando um alongamento longitudinal do escoamento (rabo-de-galo). Esse efeito promove um aumento na dissipação de energia em comparação com pilares retos. Os vertedouros com pilares alargados associados a bacia de dissipação apresentam menores erosões do leito a jusante e o comprimento total da bacia de dissipação pode ser reduzido (LIN; LI; CHEN, 1987).

### 1.1 JUSTIFICATIVA

A correta previsão e entendimento dos processos erosivos causados por escoamentos efluentes de estruturas hidráulicas são de extrema importância para a segurança deste tipo de empreendimento. Mesmo em leitos resistentes, flutuações de pressão devidas à turbulência do escoamento podem erodir e carregar blocos de grandes dimensões. Segundo Pereira, Vasconcelos e Cavalcanti (2015), esta foi, dentre outras, uma das causas das severas erosões observadas durante a operação do descarregador de fundo da usina de Sobradinho no Rio São Francisco. Já a usina

Jurumirin, no Rio Paranapanema, enfrentou problemas com a erosão que removeu o material de apoio da fundação do muro divisório entre o vertedouro e o descarregador de fundo. Rodrigues e Pereira (1991) também citam outro problema relacionado às erosões: aprisionamento de peixes nas crateras formadas pela erosão a jusante do vertedouro de Salto Grande (Rio Paranapanema). Neste contexto, fica evidente que o estudo de erosões é pertinente nos âmbitos de segurança e ambiental.

Na literatura, os pilares alargados são tratados como um avanço tecnológico em dissipação de energia de vertedouros e diversas obras chinesas utilizaram o conceito de pilares alargados em seu projeto e concepção. Porém o acesso aos parâmetros de dimensionamento destas estruturas acabaram ficando restritos, ou por falta de publicações ou por dificuldades do idioma (chinês). Alguns pesquisadores brasileiros estudaram os pilares alargados, como pode-se citar os trabalhos de Lara (2011), Cruz (2016) e Fontanelli (2017).

Lara (2011) realizou seus estudos no modelo reduzido da hidroelétrica de Mauá, que possui o vertedouro em salto de esqui. Lara (2011) estudou o conceito de pilares alargados e *slit bucket* (alargamento dos pilares na região do defletor do salto em esqui) com fundo móvel erodível. Em seus estudos de pilares alargados, teve como conclusão que estas estruturas modificam o padrão do escoamento e reduzem as máximas profundidades e volumes de erosão a jusante das estruturas. Lara (2011) também salientou a necessidade de melhores estudos sobre erosão regressiva causada pelos jatos de escoamento efluente dos pilares alargados.

Cruz (2016) e Fontanelli (2017) estudaram os pilares alargados associados a um descarregador de fundo em um canal retangular. A primeira, abordou o tema com detalhamento das velocidades instantâneas do escoamento e a segunda abordou a questão de erosões com o canal implantado em fundo móvel erodível. Seus estudos indicaram que a utilização de pilares alargados modifica o campo de velocidades e reduz as profundidades e volumes de erosão a jusante destas estruturas. Porém, devido ao estreitamento da passagem do fluxo, pode-se reduzir a capacidade de descarga da estrutura em comparação com os pilares retos.

Justifica-se o tema desta dissertação pelo fato de não haver estudos conclusivos de vertedouros com pilares alargados e bacia de dissipação, tendo e visto que, os estudos realizados no Brasil tiveram outra abordagem (vertedouros com salto em esqui e descarregador de fundo). O presente estudo traz maior compreensão do fenômeno de erosão a jusante de vertedouros com pilares alargados e bacia de dissipação, refletindo em benefícios para este tipo de empreendimento do ponto de vista econômico e de segurança, pois será avaliada a possibilidade de redução do comprimento total da bacia de dissipação e de minimização de erosões a jusante dessas estruturas.



## 1.2 OBJETIVOS

Esta dissertação visa avaliar o potencial erosivo do escoamento a jusante de vertedouros com pilares alargados e vertedouros com pilares retos associados a bacias de dissipação. A avaliação será feita mediante de ensaios em modelo hidráulico reduzido com fundo móvel erodível, tendo como hipótese que ao utilizar pilares alargados em vertedouros com bacias de dissipação pode-se reduzir os volumes e profundidades máximas de erosão a jusante das estruturas. Com isso, o comprimento do fundo da bacia de dissipação, em conceito, pode ser reduzido. Nesse contexto, elenca-se os Objetivos Gerais e Específicos desta dissertação de mestrado:

### Objetivos Gerais

Estudar a eficiência das contrações provocadas por pilares alargados no processo de dissipação de energia. Avaliar a probabilidade de redução do comprimento necessário da bacia de dissipação em vertedouros com a introdução de pilares alargados.

### Objetivos Específicos

- Analisar o padrão de escoamento com e sem a introdução de pilares alargados;
- Verificar a possibilidade da redução da bacia de dissipação pela análise da erosão a jusante de vertedouros com pilares alargados comparados com vertedouros com pilares retos;
- Avaliar o impacto de utilizar os pilares alargados em termos de volumes de concreto;
- Estudar efeitos positivos e negativos da contração provocada pelos pilares alargados.

Este documento está dividido como segue: Cap. 1 - texto introdutório ao tema contendo a justificativa do estudo e elencando os objetivos do trabalho; Cap. 2 - revisão bibliográfica sobre o estado da arte de dissipação de energia hidráulica e sobre os pilares alargados; Cap. 3 - materiais e métodos, onde é abordado o dimensionamento das estruturas e definição dos ensaios em modelo reduzido; Na sequência, o Cap. 4 - resultados dos ensaios são apresentados; e por fim, o Cap. 5 - conclusões e recomendações.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Esta seção apresenta o estado da arte com respeito aos pilares alargados em vertedouros com bacia de dissipação. Dividida em duas partes, aborda inicialmente dissipação de energia hidráulica por meio de ressalto hidráulico e por fim, a caracterização dos pilares alargados.

### 2.1 DISSIPACÃO DE ENERGIA POR RESSALTO HIDRÁULICO

Uma solução consolidada para o problema de dissipação de energia em obras de aproveitamentos hidrelétricos é utilizar o ressalto hidráulico a fim de reduzir os níveis de energia cinética do fluxo efluente dos vertedouros, uma vez que estes são os causadores de erosões severas em leitos de rios (NOVAK et al., 2001).

Nesse sentido, apresenta-se a seguir a caracterização do ressalto hidráulico, após as bacias de dissipação (ou de tranquilização)<sup>1</sup> e por fim, a erosão em leitos de rios.

#### 2.1.1 Ressalto Hidráulico

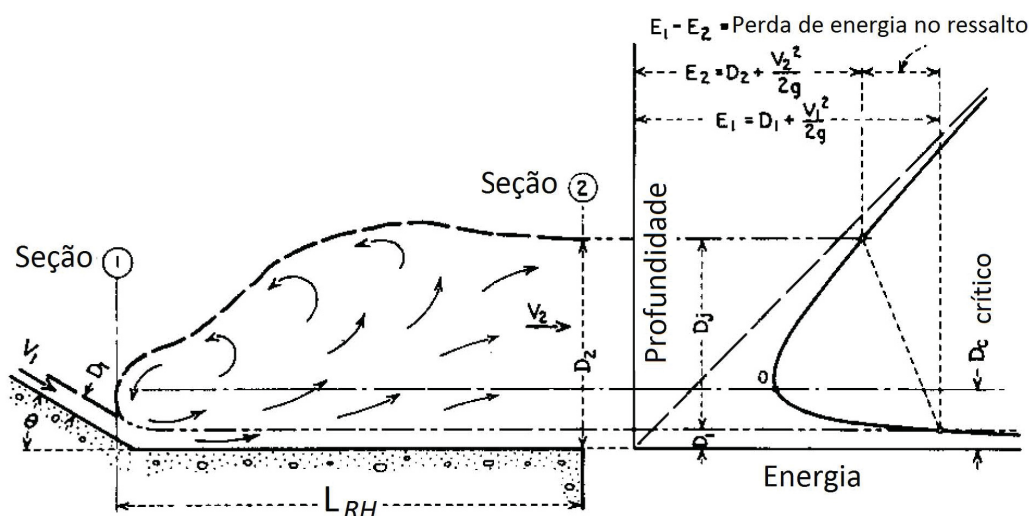
O ressalto hidráulico ocorre na transição entre um escoamento em regime supercrítico, ou fluvial (Froude  $> 1,0$ ) e um escoamento em regime subcrítico, ou torrencial (Froude  $< 1,0$ ). Este fenômeno é caracterizado por grande turbulência no escoamento e, é acompanhado de dissipação e transformação de energia.

Uma representação do ressalto hidráulico é feita na FIGURA 2.1: na seção 1, o escoamento se desenvolve com profundidade abaixo da profundidade crítica (regime supercrítico); na seção 2, a profundidade do escoamento é acima da crítica (regime subcrítico); o ressalto hidráulico é a transição entre as seções 1 e 2 e é caracterizado por oscilações e turbilhões no escoamento. No gráfico de energia específica (FIGURA 2.1 à direita) pode-se observar a energia em ambas as seções e a dissipação de energia ao longo do ressalto hidráulico. Parte da energia cinética transforma-se em energia potencial em forma de profundidade ( $D_2 > D_1$ ), e parte se transforma em outra forma de energia (calor, ruído, etc.) que em termos hidráulicos é considerada perda de energia ou dissipação de energia ( $\Delta E = E_1 - E_2$ ). O efeito mais importante é a redução da energia cinética ( $V^2/2g$ ) do escoamento, isto é, a parcela que pode provocar erosão a jusante do vertedouro.

---

<sup>1</sup> do inglês *stilling basin*

FIGURA 2.1 – DETALHES DO RESSALTO HIDRÁULICO E ENERGIA ESPECÍFICA



FONTE: Adaptado de Peterka (1963)

Onde:

- $V_1$  = velocidade média na seção 1 (m/s);
- $D_1$  = profundidade do escoamento na seção 1 (m);
- $V_2$  = velocidade média na seção 2 (m/s);
- $D_2$  = profundidade do escoamento na seção 2 (m);
- $L_{RH}$  = comprimento do ressalto hidráulico (m);
- $D_j$  = profundidade do ressalto hidráulico (m);
- $D_c$  = profundidade crítica do escoamento (m).

A partir do princípio da conservação da quantidade de movimento linear e conhecidas as características do escoamento (velocidade, profundidade, vazão) na seção a montante do ressalto hidráulico, pode-se calcular a relação entre as profundidades a montante e a jusante do salto e conseqüentemente a profundidade necessária a jusante para que o ressalto seja formado a partir da seção de montante, conforme a Eq. 2.1.

$$\frac{D_2}{D_1} = \frac{1}{2}(\sqrt{1 + 8F_1^2} - 1) \quad (2.1)$$

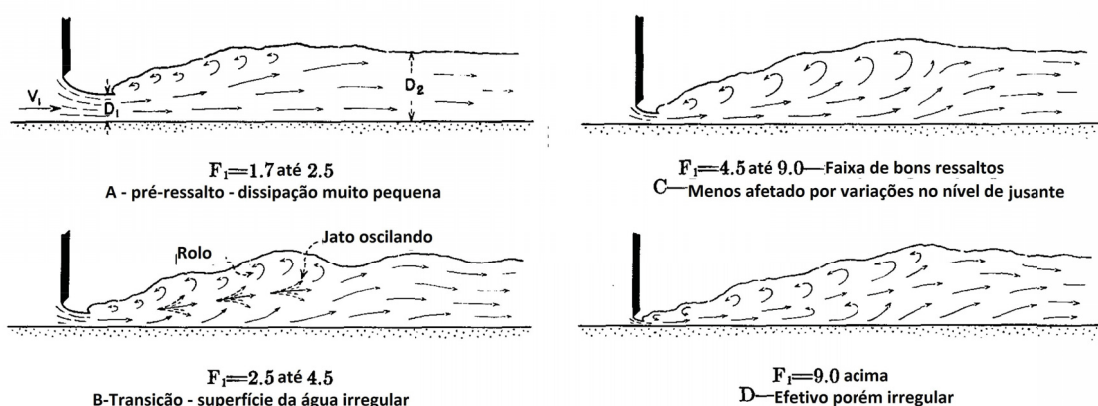
Onde:

$F_1$  = número de Froude na seção a montante do ressalto (adm.)  $(V_1/\sqrt{gD_1})$ .

As profundidades  $D_1$  e  $D_2$  são usualmente denominadas “profundidades conjugadas do ressalto hidráulico”.

Peterka (1963) estudou a aplicabilidade da Eq 2.1 através de 125 ensaios em seis canais com vazões variando de 20 a 800 L/s e vazões específicas entre 113 a 660 L/s.m. Ao longo dos ensaios, Peterka (1963) classificou o ressalto hidráulico em relação ao número de Froude conforme a FIGURA 2.2.

FIGURA 2.2 – CLASSIFICAÇÃO DO RESSALTO HIDRÁULICO SEGUNDO O NÚMERO DE FROUDE

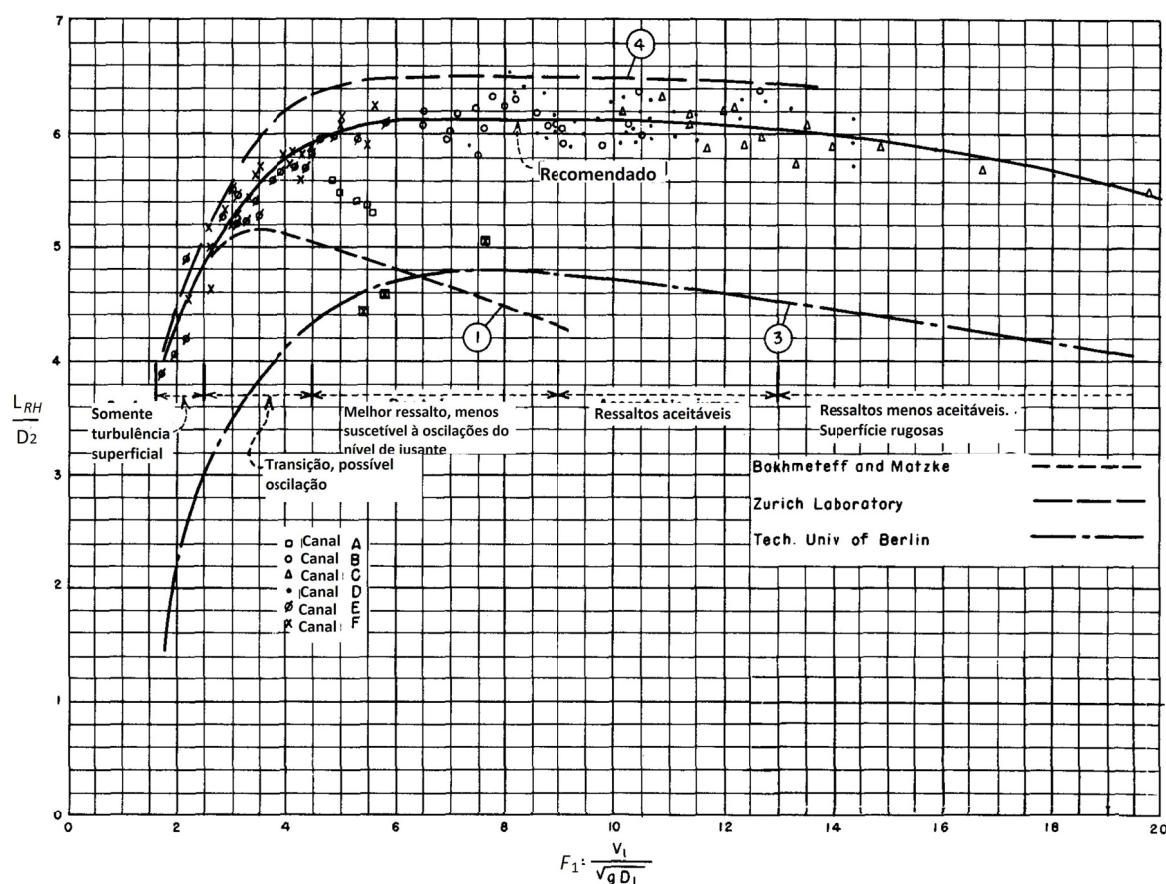


FONTE: Adaptado de Peterka (1963)

- A - ressalto com  $F_1$  entre 1,7 a 2,5, caracterizado como pré-ressalto por ter baixa dissipação de energia;
- B - ressalto com  $F_1$  entre 2,5 a 4,5, ressalto de transição com superfície da água irregular;
- C - ressalto com  $F_1$  entre 4,5 a 9,0, ressaltos com boa dissipação e com posição do início do ressalto pouco afetado por variações no nível de jusante (profundidade conjugada de jusante);
- D - ressalto com  $F_1$  acima de 9,0, ressalto com dissipação de energia efetiva porém irregular.

Peterka (1963) estabeleceu experimentalmente uma relação entre as profundidades conjugadas e o comprimento do ressalto hidráulico, conforme apresentado no gráfico da FIGURA 2.3. Nesse gráfico, a partir das condições do escoamento, pode-se estimar o comprimento do ressalto hidráulico. A linha "recomendado" é o resultado dos ensaios do Peterka (1963), a linha "2" é o resultado dos estudos de Bakhmeteff e Matzke, a linha "3" é o resultado dos estudos da Universidade Tecnológica de Berlim e a linha "4" é resultado do laboratório de Zurich.

FIGURA 2.3 – RELAÇÃO ENTRE O COMPRIMENTO DO RESSALTO HIDRÁULICO E O NÚMERO DE FROUDE NA SEÇÃO A MONTANTE DO RESSALTO



FONTE: Adaptado de Peterka (1963)

Nota-se no gráfico da FIGURA 2.3 uma grande discrepância entre os resultados da linha “1” - Bakhmeteff e Matzke e os resultados da linha “recomendado”. Peterka (1963) atribui essa diferença à efeitos de escala, pois os resultados de Bakhmeteff e Matzke foram obtidos a partir de ensaios em um canal de pequenas dimensões.

A definição do comprimento do ressalto hidráulico é motivo de várias discussões. Peterka (1963) cita as dificuldades encontradas para definir o fim do ressalto. Em seus estudos, ele definiu o fim do ressalto hidráulico de duas maneiras: ou na seção onde o jato de maior velocidade começa a se afastar do fundo do canal ou no ponto imediatamente a jusante de onde termina o rolo superficial, o ponto que resultar em maior comprimento foi o que definiu o tamanho do ressalto. Por outro lado, para Marques (2004) o final do ressalto foi definido como a seção transversal onde ocorre a expulsão das bolhas ar incorporadas pelo ressalto. Para Rajaratnam (1967) o final do ressalto foi definido na seção onde a superfície do escoamento torna-se mais plana possível.



Elevatorski (1959), em seus estudos, resumiu equações para o comprimento do ressalto hidráulico de vários autores conforme apresentado na TABELA 2.1.

TABELA 2.1 – RESUMO EQUAÇÕES DO COMPRIMENTO DO RESSALTO HIDRÁULICO POR ELEVATORSKI

Autor	Data	Equação Proposta
Ludin	-	$L_{RH} = D_2(4,5 - \frac{V_1}{V_C}); V_C = \text{velocidade crítica}$
Safranez	1927	$L_{RH} \approx 5,2D_2$
Bakhmeteff/Matzke	1933	$L_{RH} = 5(D_2 - D_1)$
Knapp	1932	$L_{RH} = \left(62,5 \frac{D_1}{H_1}\right) \left(\frac{(V_2 - V_1)^2}{2g} - (H_1 - H_2)\right); H = D + \frac{V^2}{2g}$
Smetana	1934	$L_{RH} \approx 6(D_2 - D_1)$
Kinney	1935	$L_{RH} = 6,02(D_2 - D_1)$
Douma	-	$L_{RH} = 3D_2$
Posey	1941	$L_{RH} \approx 4,5 - 7(D_2 - D_1)$
Wu	1949	$L_{RH} = 10(D_2 - D_1)Fr_1^{-0,16}$
Woycicki	1934	$L_{RH} = (D_2 - D_1) \left(8 - 0,05 \frac{D_2}{D_1}\right)$
Ivanchenko	-	$L_{RH} = 10,6 \left(\frac{V^2}{gD_1}\right)^{-0,185} (D_2 - D_1)$
Einwachter	1933	$L_{RH} = \left(15,2 - 0,241 \frac{D_2}{D_1}\right) \left[\left(\frac{D_2}{D_1} - 1\right) - \frac{V^2(D_2/D_1 - 1)}{D_2/D_1^2 g}\right]$
Chertoussov	1935	$L_{RH} = 10,3D_1(F_1 - 1)^{0,81}$
Page	1935	$L_{RH} = 5,6D_2$
Riegel; Beebe	1917	$L_{RH} = 5,0(D_2 - D_1)$
Aravin	1935	$L_{RH} = 5,4(D_2 - D_1)$
Rajaratnam	1967	$L_{RH} = 6,5D_2$

FONTE: Adaptado de Elevatorski (1959)

Conforme apresentado, a definição do comprimento do ressalto hidráulico não é clara. Isso deve-se ao fato de que cada autor desenvolveu uma metodologia e definições diferentes para a determinação do início e fim do ressalto hidráulico, em especial, a seção do fim do ressalto hidráulico por ser uma definição subjetiva, uma vez que baseia-se em observações visuais.

### 2.1.2 Bacia de Dissipação

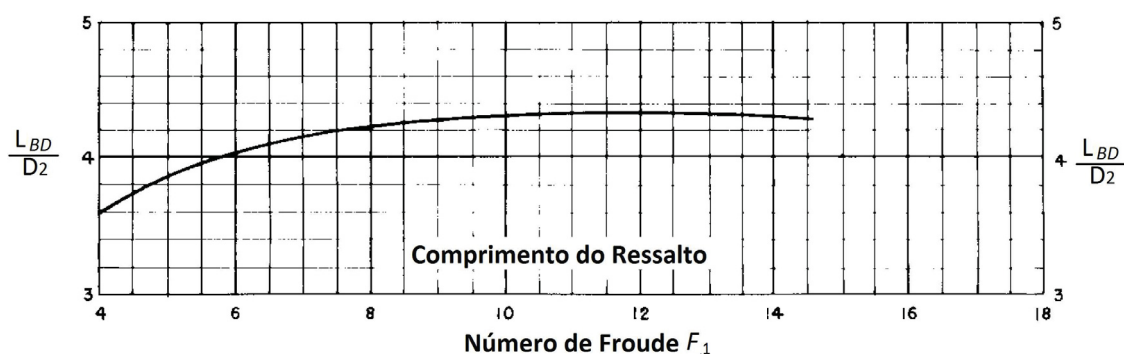
Bacia de dissipação é uma estrutura construída a jusante de vertedouros e é projetada de maneira a propiciar a formação de ressalto hidráulico em seu interior, dissipando a energia do fluxo efluente a níveis que não causem erosões significativas ao leito do rio e à própria estrutura do aproveitamento. Caracteriza-se por uma região com fundo revestido e pode conter defletores ao longo de sua extensão e defletores na extremidade de jusante (*end sill*). O material do fundo e defletores necessitam resistência para suportar a turbulência e oscilações de pressão do ressalto hidráulico.

Para o dimensionamento hidráulico de bacias de dissipação é necessário definir o comprimento ( $L_{BD}$ ) e a elevação do fundo da bacia. Estes dois parâmetros estão relacionados ao comprimento do ressalto hidráulico e à profundidade conjugada de jusante, respectivamente. Usualmente as bacias de dissipação são dimensionadas para vazões com tempo de recorrência inferior ao da cheia máxima do vertedouro (PINTO, 1987).

O US Army Corps of Engineers (1980) concluiu em seus estudos que para escoamentos com números de Froude ( $F_1$ ) entre 3 e 12, o comprimento da bacia de dissipação ( $L_{BD}$ ) recomendado é de 3 vezes a profundidade conjugada de jusante ( $3,0 D_2$ ). Para escoamentos onde o número de Froude ( $F_1$ ) excede 12, o ideal é utilizar  $3,5 D_2$  devido à magnitude da energia cinética residual a jusante. Quando o leito a jusante da bacia de dissipação for constituído por rocha, o comprimento de  $2,5 D_2$  é adequado. Por outro lado, em leitos sujeitos à erosão, o US Army Corps of Engineers (1980) recomendou  $L_{BD}$  variando de  $3,5 D_2$  a  $4,0 D_2$ .

O gráfico da FIGURA 2.4 apresenta o método de dimensionamento do comprimento de bacias de dissipação proposto pelo Bureau of Reclamation (1998) para números de Froude ( $F_1$ ) acima de 4,5. Este método sugere o uso de blocos no início e no fim da bacia (*end sill*).

FIGURA 2.4 – COMPRIMENTO DA BACIA DE DISSIPACÃO PARA NÚMEROS DE FROUDE ACIMA DE 4,5



FONTE: Adaptado de Bureau of Reclamation (1998)

Onde:

$L_{BD}$  = comprimento da bacia de dissipação (m).

A TABELA 2.2 apresenta um resumo das considerações entre os dois principais métodos de dimensionamento do comprimento de bacias de dissipação: método proposto por Bureau of Reclamation (1998) e US Army Corps of Engineers (1980).

TABELA 2.2 – RESUMO DO DIMENSIONAMENTO DO COMPRIMENTO DE BACIA DE DISSIPACÃO PELOS MÉTODOS DO BUREAU OF RECLAMATION E US ARMY CORPS OF ENGINEERS

$F_1$	Método Bureau	Método Corps	Método Corps: leitos em rocha	Método Corps: leitos muito erodíveis
5	$L_{BD} = 4,0D_2$	$L_{BD} = 3,0D_2$	$L_{BD} = 2,5D_2$	$L_{BD} = 3,5D_2$
6	$L_{BD} = 4,0D_2$	$L_{BD} = 3,0D_2$	$L_{BD} = 2,5D_2$	$L_{BD} = 3,5D_2$
8	$L_{BD} = 4,2D_2$	$L_{BD} = 3,0D_2$	$L_{BD} = 2,5D_2$	$L_{BD} = 4,0D_2$
12	$L_{BD} = 4,3D_2$	$L_{BD} = 3,0D_2$	$L_{BD} = 2,5D_2$	$L_{BD} = 4,0D_2$
14	$L_{BD} = 4,3D_2$	$L_{BD} = 3,5D_2$	$L_{BD} = 2,5D_2$	$L_{BD} = 4,0D_2$

FONTE: Adaptado de Bureau of Reclamation (1998) e US Army Corps of Engineers (1980)

Nota-se que o método do Bureau of Reclamation (1998), em todas as faixas de número de Froude ( $F_1$ ) é sensivelmente mais conservador que o método do US Army Corps of Engineers (1980), porém este apresentou critérios de dimensionamento que consideraram as características do leito a jusante da bacia de dissipação.

Da mesma maneira que a definição do comprimento do ressalto hidráulico ( $L_{RH}$ ), a definição do comprimento de bacias de dissipação ( $L_{BD}$ ) não é um consenso e seu correto dimensionamento deve considerar questões econômicas e de segurança e as particularidades de cada obra.

Mesmo que o comprimento do ressalto hidráulico ( $L_{RH}$ ) seja a base para o dimensionamento do comprimento da bacia de dissipação ( $L_{BD}$ ), esse considera que o comprimento da bacia de dissipação (comprimento do fundo revestido) possa ser menor que o comprimento do ressalto hidráulico formado em seu interior, assumindo possíveis erosões no leito a jusante das estruturas uma vez que o escoamento sub-crítico não se desenvolveu completamente. Isso fica claro quando se analisa o método de dimensionamento do comprimento de bacias de dissipação proposto pelo Bureau of Reclamation (1998) no livro “*Design of Small Dams*” que foi baseado nos estudos de Peterka (1963), pois o comprimento do ressalto hidráulico ( $L_{RH}$ ) segundo Peterka (1963), apresentado na FIGURA 2.3, foi aproximadamente 6,0 vezes  $D_2$ , entretanto o maior comprimento da bacia de dissipação ( $L_{BD}$ ) apresentado pelo Bureau of Reclamation (1998) foi igual a 4,3 vezes  $D_2$ , isto é, 28% menor que o comprimento do ressalto hidráulico apresentado por Peterka (1963).

Essa redução no comprimento da bacia de dissipação em comparação com o comprimento do ressalto hidráulico pode ser explicada pelo advento do uso de defletores tipo na extremidade de jusante da bacia (*end sill*), conforme sugerido pelo método do Bureau of Reclamation (1998). Hager (1992) concluiu que o *end sill* tem importante papel na diminuição da erosão a jusante de bacias, pois o jato proveniente do ressalto hidráulico é desviado e não incide diretamente no leito a jusante.

Deve-se considerar que os métodos de dimensionamento de bacias de dissipação (e ressalto hidráulico) foram propostos a partir de resultados de ensaios em modelo reduzido, onde, dependendo da escala de redução, o fenômeno de incorporação de ar ao escoamento ocorre de maneira diferente em comparação com o protótipo. Em vertedouros (protótipo) longos, o fluxo no início da bacia de dissipação torna-se pré-aerado devido ao desenvolvimento da camada limite turbulenta ao longo da calha do vertedouro. Esta incorporação de ar é um fenômeno que não ocorre em modelos hidráulicos reduzidos devido a efeitos de escala uma vez que as bolhas de ar não são reduzidas na proporção da escala geométrica de redução. Rajaratnam (1967) estudou estes efeitos e denominou “ressalto hidráulico pré-aerado” o ressalto hidráulico formado por um fluxo afluente aerado. Esta aeração provoca um aumento na profundidade conjugada necessária de jusante ( $D_2$ ) em comparação com um ressalto hidráulico sem pré-aeração. Segundo Rajaratnam (1967), para números de Froude ( $F_1$ ) maiores que 5 o valor do acréscimo na profundidade conjugada necessária de jusante ( $D_2$ ) é aproximadamente 10% maior em comparação com a conjugada necessária de jusante em ressaltos sem pré-aeração. Já Hager (1992) concluiu que os efeitos da pré-aeração no ressalto hidráulico são desprezíveis, ratificando os critérios de segurança entre modelo hidráulico reduzido e protótipo.

### 2.1.3 Erosão a Jusante de Ressalto Hidráulico

Mesmo que a principal função da bacia de dissipação seja proteger o leito, erosões podem ocorrer a jusante destas estruturas, e em alguns casos além de ocasionar danos ambientais podem comprometer as estruturas da obra, em caso de erosões regressivas. Neste sentido é importante prever o comportamento das erosões e principalmente as profundidades de erosão para poder minimizar seus efeitos prejudiciais.

Melville e Coleman (2000) citam que a máxima profundidade de erosão de leitos ocasionada por jatos verticais e horizontais, a jusante de vertedouros segue o formato geral da Eq. 2.2.

$$d_s + T_w = CH^{n_1} q^{n_2} \phi^{n_3} \quad (2.2)$$

Onde:

- $d_s$  = maior profundidade da fossa de erosão (m);  
 $T_w$  = profundidade de água de jusante (m);  
 $C$  = coeficiente (adm.);  
 $H$  = diferença entre o nível de água a montante e a jusante do vertedouro (m);  
 $q$  = vazão específica (m<sup>3</sup>/s.m);  
 $\phi$  = diâmetro do material que compõe o leito do rio (mm);  
 $n_1, n_2, n_3$  = coeficientes dependentes das características do escoamento.

Veronese (1937)<sup>2</sup> realizou estudos em modelo reduzido com jatos verticais de vertedouros com salto em esqui e sua contribuição foi muito utilizada e verificada em obras (PINTO, 1987). A Eq. 2.3 apresenta a relação que Veronese (1937) obteve em modelo reduzido com jatos de água incidindo verticalmente em um colchão de água com o fundo móvel erodível.

$$d_s + T_w = 1,9H^{0,225}q^{0,54} \quad (2.3)$$

Nota-se que Veronese (1937) não considerou como variável a granulometria do material do fundo ( $\phi^{n_3} = 1$ ) em sua equação, pois seus ensaios foram realizados com material do fundo granular sem coesão (pedregulho).

Outros autores utilizaram o mesmo formato de equação, porém considerando o diâmetro do material do leito ( $\phi$ ). Jaeger (1939) utilizando jatos verticais em colchões de água, desenvolveu a Eq. 2.4.

$$d_s + T_w = 6,0H^{0,58}q^{0,5}\phi_{90}^{-0,33} \quad (2.4)$$

Para fluxos com jatos horizontais em bacia de dissipação, Schoklitsch (1932) e Eggenberger (1944) desenvolveram respectivamente as Eqs. 2.5 e 2.6.

$$d_s + T_w = 4,75H^{0,2}q^{0,57}\phi_{90}^{-0,32} \quad (2.5)$$

$$d_s + T_w = 22,8H^{0,5}q^{0,6}\phi_{90}^{-0,40} \quad (2.6)$$

Onde:

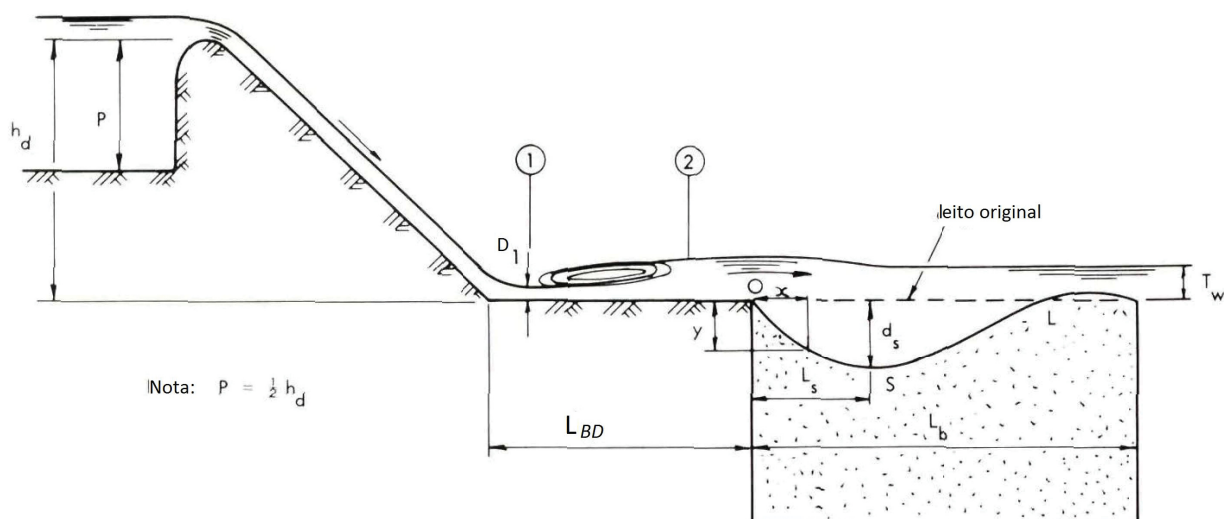
$\phi_{90}$  = diâmetro do material correspondente a 90% em volume da amostra (mm).

Farhoudi e Smith (1985) estudaram a formação de erosão a jusante de ressaltos hidráulicos formados em bacia de dissipação de vertedouros, seus estudos foram

<sup>2</sup> VERONESE, A. Erosioni di Fondo a Valle di uno Scarico. **Annal. Lavori Pubbl.**, v. 75, n. 91, p. 717-726, 1937.

conduzidos em modelo reduzido provido de fundo móvel erodível conforme apresentado na FIGURA 2.5.

FIGURA 2.5 – DETALHES DOS MODELO REDUZIDO UTILIZADO NOS ENSAIOS DE FARHOUDI E SMITH



FONTE: Adaptado de Farhoudi e Smith (1985)

Onde:

$h_d$  = distância vertical entre a crista do vertedouro e a bacia de dissipação (m);

$P$  = paramento de montante do vertedouro (m);

$L_b$  = comprimento da erosão - fossa + barra (m);

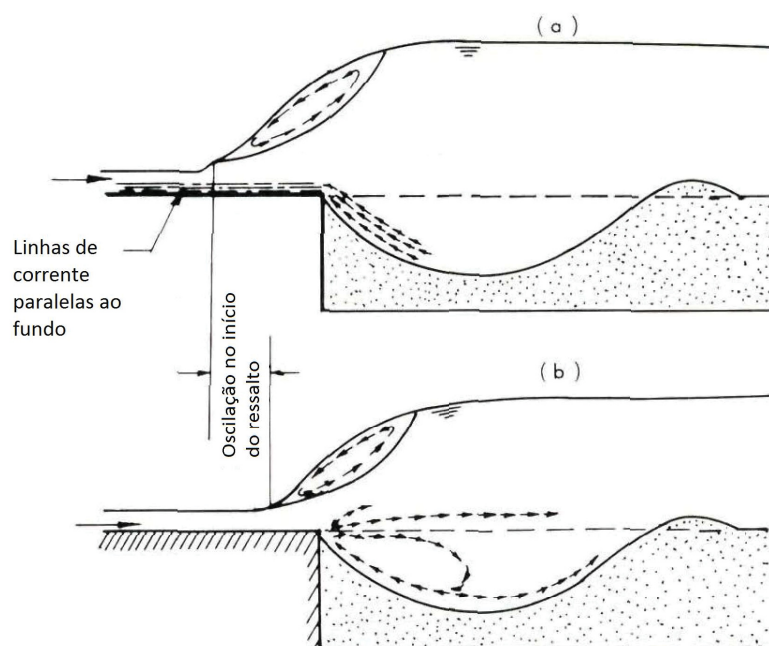
$0$  = início do eixo de coordenadas  $x$  e  $y$ ;

$L_s$  = distância do ponto de maior profundidade de erosão (m);

$L_h$  = comprimento da fossa de erosão (m).

Segundo Farhoudi e Smith (1985) o processo de erosão, nestes casos, inicia-se com o predomínio de sedimentos em suspensão que foram removidos do leito. Com o decorrer do tempo o material do fundo continua a ser removido por suspensão até a formação de uma fossa de erosão. A partir disto, a erosão se propaga dentro da fossa formada e ocorre predomínio de arraste de sedimento do fundo (*bed-load*). No interior da fossa, a erosão se divide em duas partes: uma parte com arraste de sedimento do fundo depositando-se na face de jusante até ser expulsa da fossa ocasionando depósito de material na forma de barra; e outra parte para montante, de menor intensidade que a primeira e quando este material atinge a estrutura terminal da bacia de dissipação é carregada na forma de sedimento em suspensão pelo jato efluente da bacia. Conforme a erosão se desenvolve, a posição do ressalto hidráulico oscila, conforme apresentado na FIGURA 2.6.

FIGURA 2.6 – CARACTERÍSTICA DO PROCESSO DE EROSIÃO A JUSANTE DE RESSALTOS HIDRÁULICOS



FONTE: Adaptado de Farhoudi e Smith (1985)

Farhoudi e Smith (1985) afirmaram que a máxima profundidade de erosão da fossa ( $d_s$ ) pode ser determinada com uma equação exponencial na forma da Eq. 2.7.

$$\frac{d_s}{h_d} = \left( \frac{t}{t_0} \right)^\alpha \quad (2.7)$$

Onde:

$d_s$  = maior profundidade da fossa de erosão no tempo  $t$  (m);

$t$  = tempo onde deseja-se a máxima profundidade (s);

$t_0$  = tempo decorrido até que a profundidade de erosão atinja o valor de  $h_d$  (s);

$\alpha$  = expoente dependente da natureza do processo de erosão.

Farhoudi e Smith (1985) em seus ensaios, considerando o nível de água de jusante ( $T_w$ ) igual à profundidade conjugada de jusante ( $D_2$ ), encontraram uma relação entre a máxima profundidade da fossa de erosão ( $d_s$ ) e as distâncias horizontais da maior profundidade de erosão  $L_s$  e o comprimento da fossa de erosão  $L_h$  (Eqs. 2.8 e 2.9).

$$d_s = \frac{L_h}{7,2} \quad (2.8)$$



$$d_s = \frac{L_s}{3,2} \quad (2.9)$$

O perfil da erosão, segundo Farhoudi e Smith (1985) segue a forma de uma curva catenária. Com vistas à FIGURA 2.5 esses autores definiram, experimentalmente, que o perfil da fossa de erosão pode ser representado conforme a Eq. 2.10.

$$\frac{x_s}{d_s} + 9 = 8 \cosh \left[ \frac{1}{8} \left( \frac{y_s}{d_s} - 3,2 \right) \right] \quad (2.10)$$

Onde:

$x_s$  = abcissa do perfil da fossa de erosão (m);

$y_s$  = ordenada do perfil da fossa de erosão (m).

Dargahi (2003) também estudou em modelo reduzido a erosão a jusante de vertedouro com bacia de dissipação, porém verificou que a erosão formada no leito móvel não foi simétrica transversalmente, apresentando um padrão duas fossas laterais logo a jusante da estrutura terminal da bacia de dissipação e um fossa alongada central mais a jusante das primeiras (FIGURA 2.7).

A partir dos resultados dos ensaios, Dargahi (2003) definiu que a máxima profundidade de erosão ( $d_s$ ) e a distância horizontal desse ponto a partir do fim da bacia ( $L_s$ ) podem ser expressas pelas Eqs. 2.11 e 2.12, válidas para as fossas de erosão laterais e pelas Eqs. 2.13 e 2.14 para a fossa central, conforme a FIGURA 2.7.

$$\frac{d_s}{H_e} = \left( \frac{H_e}{\phi_{50}} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (2.11)$$

$$\frac{L_s}{H_e} = 10 \left( \frac{H_e}{\phi_{50}} \right)^{\frac{1}{12}} \quad (2.12)$$

$$\frac{d_s}{H_e} = 1,7 \left( \frac{H_e}{\phi_{50}} \right)^{\frac{1}{4,5}} \quad (2.13)$$

$$\frac{L_s}{H_e} = 5 \left( \frac{H_e}{\phi_{50}} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (2.14)$$

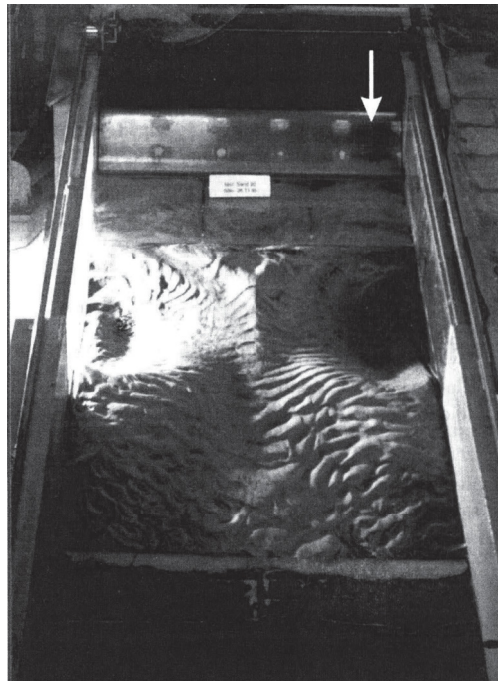
Onde:

$H_e$  = carga de operação do vertedouro (m);

$\phi_{50}$  = diâmetro médio do material do fundo móvel (m).



FIGURA 2.7 – CARACTERÍSTICA DO PROCESSO DE EROÇÃO A JUSANTE DE RESSALTOS HIDRÁULICOS



FONTE: Adaptado de Dargahi (2003)

A determinação do diâmetro do material móvel é de extrema importância para se obter resultados confiáveis, em especial em modelos reduzidos, os quais têm a finalidade de representar fenômenos em uma pequena escala, com seus resultados extrapolados para maiores dimensões.

Quando se utilizam partículas de diâmetro pequenos (menores que 1 centímetro), a viscosidade do líquido pode influenciar os processos erosivos das partículas de material móvel. Shields (1936) determinou a influência da viscosidade da água na capacidade de arraste de material granular não coesivo. Para tanto, utilizou o conceito do número de Reynolds de corte ( $Re_*$ ), apresentado na Eq. 2.15.

$$Re_* = \frac{v_* \cdot \phi_{50}}{\nu} \quad (2.15)$$

Onde:

$Re_*$  = número de Reynolds de corte (adm.);

$v_*$  = velocidade de corte - conforme Eq. 2.16 (m/s);

$\nu$  = viscosidade cinemática da água (m<sup>2</sup>/s).

$$v_* = \sqrt{\frac{\tau}{\rho}} \quad (2.16)$$

Onde:

$v_*$  = velocidade de corte (m/s);

$\tau$  = tensão tangencial junto ao fundo (N/m<sup>2</sup>);

$\rho$  = massa específica da água (kg/m<sup>3</sup>).

Shields (1936) verificou a estabilidade de materiais granulares de fundo devido a uma tensão tangencial proveniente de um escoamento. Utilizou um parâmetro intitulado tensão tangencial adimensional ou parâmetro de Shields ( $\tau_*$ ) (Eq. 2.17).

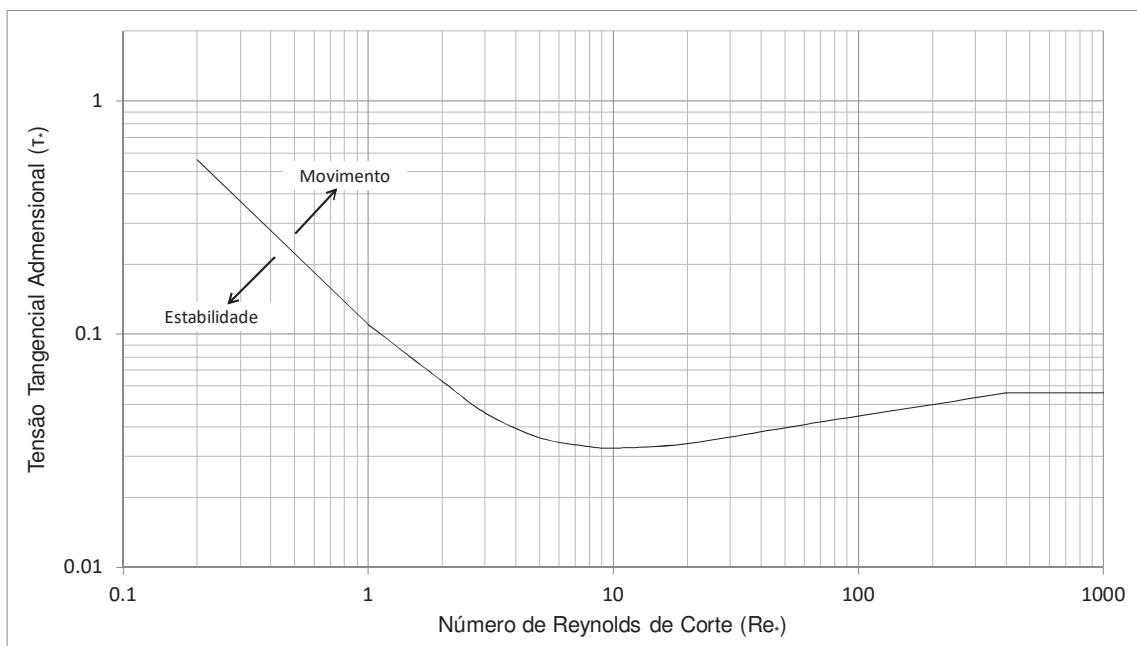
$$\tau_* = \frac{\tau}{(\rho_s - \rho) \cdot g \cdot \phi_{50}} \quad (2.17)$$

$\tau_*$  = tensão tangencial adimensional ou parâmetro de Shields (adm.);

$\rho_s$  = massa específica do material do fundo (kg/m<sup>3</sup>).

Com isso, Shields (1936) desenvolveu o diagrama da FIGURA 2.8, o qual expressa a condição incipiente de arraste de material considerando o efeito da viscosidade da água. A linha de cor preta contínua representa a condição incipiente de arraste, a região acima desta linha é a região de instabilidade e movimento do material do fundo e a região abaixo desta linha, a região de estabilidade do material.

FIGURA 2.8 – DIAGRAMA DE SHIELDS (1936)



FONTE: Adaptado de Shields (1936)

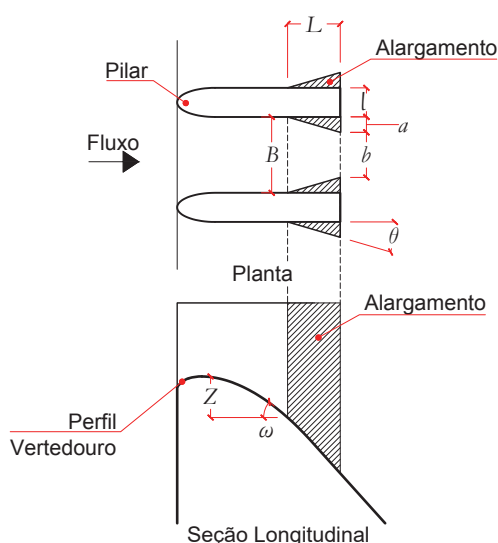
## 2.2 PILARES ALARGADOS TIPO *FLARING PIERS*

### 2.2.1 Definição dos Pilares Alargados

Os *flaring piers* ou pilares alargados, ou ainda pilares que se alargam em uma tradução literal ao português, são um tipo de pilar de comportas de vertedouros em usinas hidrelétricas. Trata-se de um alargamento gradual transversal dos pilares na direção do fluxo, estreitando a livre passagem no vão entre pilares. O primeiro registro encontrado dos *flaring piers* data de 1974 durante o projeto da usina de Ankang no rio Hanjiang, China (LIN; LI; CHEN, 1987).

A FIGURA 2.9 apresenta esquematicamente os detalhes geométricos de um vertedouro com pilares alargados: na região hachurada, se observa o alargamento transversal dos pilares das comportas, o alargamento é gradual e possui seu máximo valor na face de jusante dos pilares.

FIGURA 2.9 – DETALHES GEOMÉTRICOS DOS PILARES ALARGADOS



Com vistas à FIGURA 2.9, apresenta-se os principais parâmetros e detalhes geométricos dos pilares alargados, como segue:

- $B$  = largura da calha entre pilares na seção sem contração (m);
- $b$  = largura da calha entre pilares na seção mais estreita da contração (m);
- $L$  = comprimento do alargamento (m);
- $\theta$  = ângulo de deflexão (graus);
- $a$  = largura do alargamento do pilar (m);
- $Z$  = distância vertical entre a crista do vertedouro e o início do alargamento (m);
- $l$  = largura do pilar sem alargamento (m);
- $\omega$  = ângulo do vertedouro com a horizontal no início do alargamento (graus).

A relação entre a largura da seção mais contraída ( $b$ ) e a seção antes do início do alargamento dos pilares ( $B$ ) denomina-se razão de contração e é expressa pelo símbolo  $\eta$ , conforme nomenclatura utilizada por Lara (2011) e definida pela Eq. 2.18.

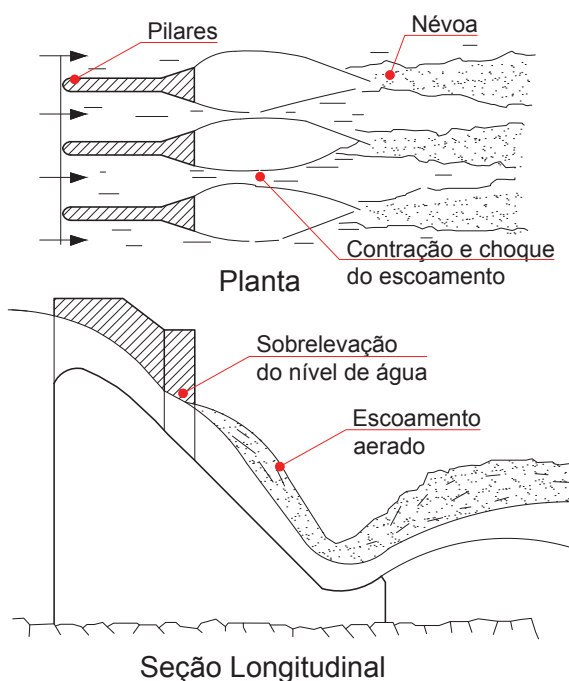
$$\eta = \frac{b}{B} \quad (2.18)$$

O ângulo de deflexão  $\theta$  pode ser calculado conforme a Eq. 2.19.

$$\theta = \arctg\left(\frac{a}{L}\right) \quad (2.19)$$

Nos vertedouros com pilares alargados, o fluxo de água ao longo da calha do vertedouro sofre uma sobrelevação de seu nível a partir da seção onde se inicia o alargamento dos pilares. Conforme o fluxo avança para jusante, após o término dos pilares, devido à contração imposta pelo alargamento dos pilares, o escoamento choca-se transversalmente provocando alongamento vertical do fluxo (“rabo-de-galo”) com incorporação de ar (HOU; YANG; ZHENG, 2014). A FIGURA 2.10 apresenta o padrão de escoamento de um vertedouro com pilares alargados associado a salto de esqui.

FIGURA 2.10 – PADRÃO DE ESCOAMENTO EM VERTEDOUROS COM PILARES ALARGADOS



FONTE: Adaptado de Lara et al. (2011 apud GUO et al., 2006)

Os pilares alargados empregados em obras apresentam diferentes formas de seções transversais. A seção transversal mais simples é a seção retangular que se caracteriza pela mesma seção ao longo do eixo vertical do pilar. As FIGURAS 2.9 e 2.10 são exemplos desse tipo de seção. A FIGURA 2.11 apresenta uma vista de jusante do vertedouro da hidroelétrica de Panjiakou (China) onde foram utilizados os pilares alargados com seção transversal retangular.

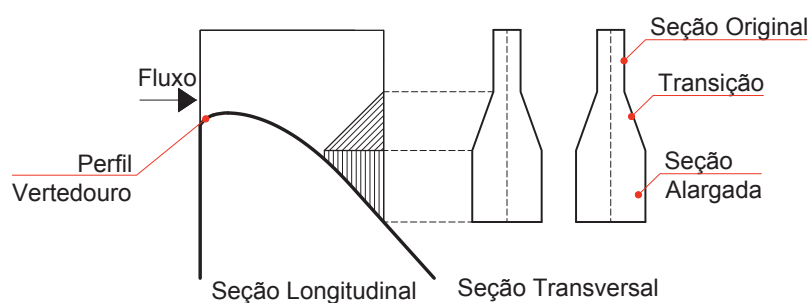
FIGURA 2.11 – VERTEDOURO DE PANJIAKOU - PILARES ALARGADOS DE SEÇÃO RETANGULAR



FONTE: (BBS, 2017)

A seção transversal dos pilares alargados mais comumente utilizada nas obras é a seção transversal em formato de Y. Caracteriza-se pelo alargamento constante tal como na seção retangular, porém a partir de uma determinada elevação gradativamente a seção alargada retorna à largura original do pilar. A FIGURA 2.12 apresenta as características geométricas dos pilares alargados de seção Y.

FIGURA 2.12 – DETALHES GEOMÉTRICOS DOS PILARES ALARGADOS DE SEÇÃO Y





A redução na seção da parte superior do alargamento propicia, para vazões maiores, maior área de escoamento e minimiza possíveis efeitos de perda de capacidade de descarga do vertedouro ocasionada pelo alargamento dos pilares.

Como exemplos de obras onde foram utilizados os pilares alargados de seção Y, citam-se os vertedouros das hidrelétricas de Ankang (1978-89) e de Yantan (1985-95) respectivamente nas FIGURAS 2.13 e 2.14 onde pode-se observar a forma em Y dos pilares do vertedouro.

FIGURA 2.13 – VISTA DO VERTEDOURO DA HIDRELÉTRICA DE ANKANG - CHINA - PILARES ALARGADOS DE SEÇÃO Y



FONTE: Sina (2017)

FIGURA 2.14 – VISTA DE JUSANTE DO VERTEDOURO DA HIDRELÉTRICA DE YANTAN - CHINA - PILARES ALARGADOS DE SEÇÃO Y



FONTE: Gx (2017)

As FIGURAS 2.15 e 2.16 apresentam respectivamente a operação da usina hidrelétrica de Ankang e de Yantan, onde pode-se observar o choque transversal entre os jatos efluentes dos pilares alargados.

FIGURA 2.15 – VISTA DE JUSANTE DA OPERAÇÃO DO VERTEDOIRO DA HIDRELÉTRICA DE ANKANG -CHINA - PILARES ALARGADOS DE SEÇÃO Y



FONTE: Sxdaily (2017)

FIGURA 2.16 – VISTA DE JUSANTE DA OPERAÇÃO DO VERTEDOIRO DA HIDRELÉTRICA DE YANTAN -CHINA - PILARES ALARGADOS DE SEÇÃO Y

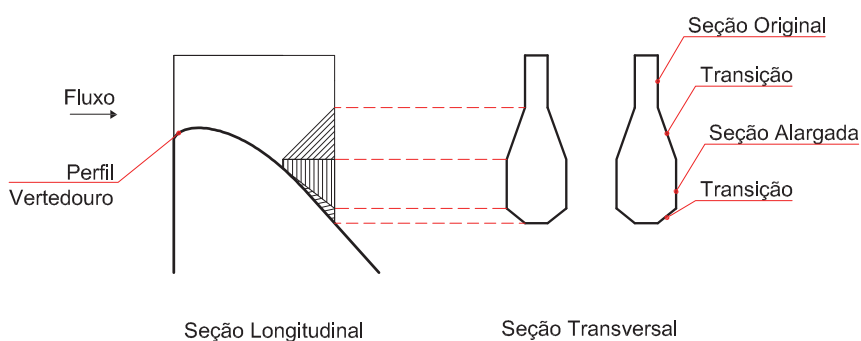


FONTE: Xie, Wu e Chen (2016)

O formato de seção transversal dos pilares alargados mais recente empregados nas obras é o formato em X. Este formato tem como base os pilares alargados de seção Y, porém com uma passagem livre de escoamento devido a uma redução na seção transversal do pilar na parte mais próxima da calha do vertedouro, conforme apresentado na FIGURA 2.17.

Este formato mantém as vantagens dos pilares alargados de seção Y, mas com a abertura da passagem na região mais próxima da calha do vertedouro cria-se uma camada de escoamento sem contração junto a calha, isto minimiza impactos do jato que é expandido verticalmente pelos pilares alargados e reduz possíveis danos na superfície do vertedouro (DAI et al., 2015).

FIGURA 2.17 – PILARES ALARGADOS DE SEÇÃO TRANSVERSAL X



Os pilares alargados de seção transversal em X são comumente utilizados em vertedouros em degraus, uma vez que o fluxo sem contração na parte inferior dos pilares promove uma maior área de escoamento nos degraus do vertedouro promovendo a dissipação de energia ao longo dos degraus.

O vertedouro da hidrelétrica de Suofengying (2002-06), na China, é um exemplo do uso dos pilares alargados de seção transversal X em vertedouro como degraus. A FIGURA 2.18 apresenta uma vista de jusante do vertedouro e a FIGURA 2.19 a operação do vertedouro, onde pode-se observar a parcela do fluxo junto à calha dissipando-se nos degraus.



FIGURA 2.18 – VISTA DE JUSANTE DO VERTEDOIRO DA HIDRELÉTRICA DE SUO-FENGYING - CHINA - PILARES ALARGADOS DE SEÇÃO TRANSVERSAL X



FONTE: Guiyang Engineering Corporation Limited (2016) <<http://www.ghidri.com.cn/site/results/3/list/7B/5C/7D1.>>

FIGURA 2.19 – VISTA DE JUSANTE DA OPERAÇÃO DO VERTEDOIRO DA HIDRELÉTRICA DE SUOFENGYING - CHINA - PILARES ALARGADOS DE SEÇÃO TRANSVERSAL X



FONTE: Gshzx (2017) <<http://www.gshzx.com/uploads/allimg/170423/8-1F423154Z1.jpg>>

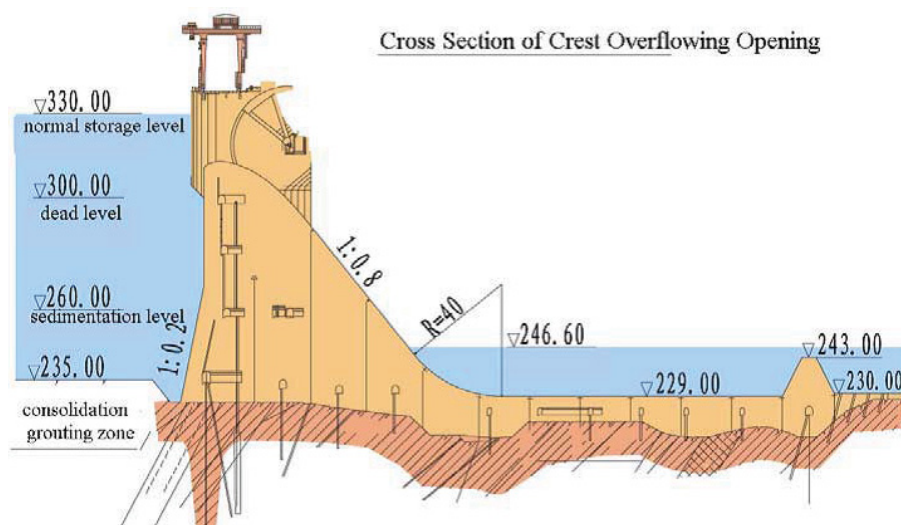
## 2.2.2 Pilares Alargados Associados a Bacia de Dissipação

Os pilares alargados podem ser utilizados em vertedouros com salto em esqui, descargas de fundo, com dissipadores tipo *roller bucket* e bacias de dissipação. Esta seção apresenta a revisão bibliográfica dos pilares alargados associados com bacia de dissipação.

O princípio utilizado em bacias de dissipação é a dissipação de energia hidráulica por formação de ressalto hidráulico no interior da bacia.

Com o uso dos pilares alargados, o escoamento no interior da bacia torna-se bastante turbulento e ocorre a soma de dois efeitos: o primeiro é a turbulência do próprio ressalto hidráulico na transição entre regime de escoamento super-crítico para sub-crítico; e com os pilares alargados um segundo efeito é somado. Trata-se da turbulência causada pelo choque horizontal do escoamento quando sofre contração lateral devido ao alargamento dos pilares. Autores como Chen, Wang e Han (2009) e Yin, Liang e Gong (2010) batizaram o ressalto hidráulico proveniente da associação dos pilares alargados com bacia de dissipação de “*3D hydraulic jump*”, ou ressalto hidráulico 3D. Evidentemente este termo pode causar conflitos, uma vez que os escoamentos são em 3 (três) dimensões, mas o termo utilizado pelos autores se dá pelo efeito transversal que os pilares alargados aplicam no escoamento somado ao efeito longitudinal do ressalto hidráulico. A FIGURA 2.20 apresenta uma seção longitudinal da hidrelétrica de Ankang, onde foi utilizado o conceito de pilares alargados de seção transversal Y associado com bacia de dissipação.

FIGURA 2.20 – SEÇÃO LONGITUDINAL DO VERTEDOIRO DE ANKANG, CHINA - PILARES ALARGADOS DE SEÇÃO Y ASSOCIADOS A UMA BACIA DE DISSIPÇÃO



FONTE: ankang. . . ()

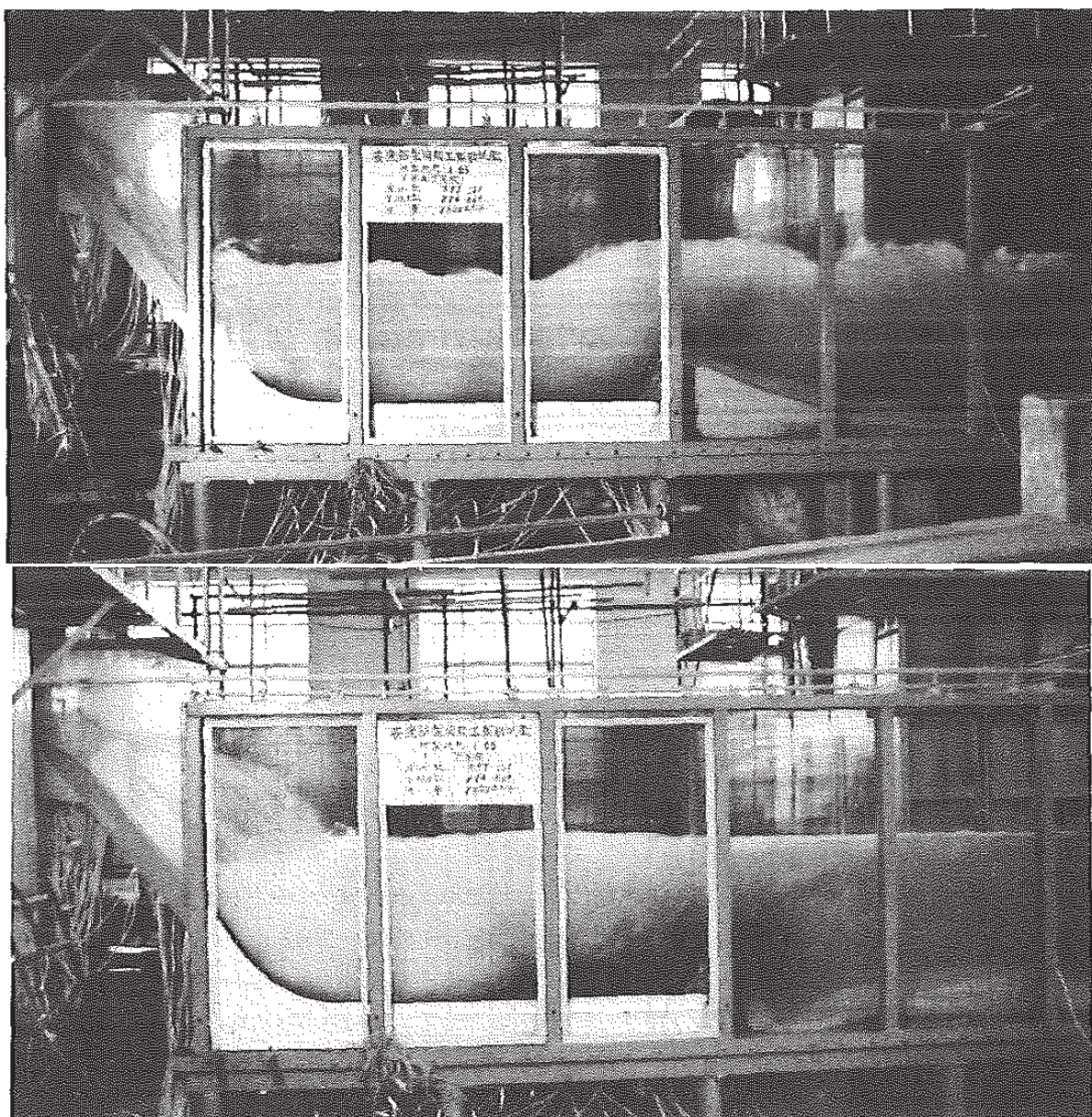
Esta associação é adequada para vertedouros que estão sujeitos a grandes vazões específicas, médias a altas cargas hidráulicas e baixos número de Froude na aproximação (CHEN, 2015).

A vantagem da associação de pilares alargados com bacia de dissipação está na possibilidade de redução do comprimento da bacia em relação às obras com pilares retos. Esta redução está ligada ao aumento da dissipação de energia na região dos pilares provida pelos pilares alargados. Li et al. (2000) verificaram em ensaios em modelo reduzido que a inclusão dos alargamento nos pilares aumenta a dissipação de energia na região dos pilares em cerca de 25%. Chen, Wang e Han (2009) estudaram em modelo reduzido o comprimento do ressalto hidráulico 3D e obtiveram como resultado uma redução de 48% em comparação ao comprimento do ressalto hidráulico sem pilares alargados.

Outra vantagem está na diminuição da energia residual a jusante da bacia de dissipação. Esta energia está diretamente ligada às profundidades de erosão causadas pelo escoamento na região de jusante, Lin, Li e Chen (1987) em seus estudos, obtiveram uma redução de 82% na profundidade de erosão a jusante com o uso de pilares alargados associados com bacia de dissipação. A FIGURA 2.21 apresenta uma comparação entre o ressalto hidráulico em uma bacia de dissipação com (abaixo) e sem (acima) a associação com os pilares alargados. Pode-se observar elevação no nível de escoamento na região supercrítica e uma aparente diminuição no comprimento total do ressalto hidráulico com a associação com pilares alargados.



FIGURA 2.21 – RESSALTO HIDRÁULICO COM PILARES RETOS (ACIMA) E COM PILARES ALARGADOS (ABAIXO) COM ASSOCIAÇÃO DE BACIA DE DISSIPATIVAÇÃO



FONTE: adaptado de Lin, Li e Chen (1987)

### 2.2.3 Dimensionamento dos Pilares Alargados

O dimensionamento do alargamento dos pilares envolve a definição da razão de contração ( $\eta$ ), o ângulo de contração ( $\theta$ ), a posição do início do alargamento ( $Z$ ) e o formato da seção transversal do alargamento. Apresenta-se a seguir estes parâmetros.

A taxa e o ângulo de contração dos pilares alargados não é diretamente obtida através de equações. Os projetistas que utilizaram o conceito de pilares alargados realizaram o dimensionamento em ensaios de modelos hidráulicos reduzidos. Esta

revisão bibliográfica buscou então valores desses parâmetros em vertedouros de usinas hidrelétricas que utilizaram os pilares alargados. A TABELA 2.3 apresenta a geometria dos pilares alargados utilizados em vertedouros.

TABELA 2.3 – DADOS DE PILARES ALARGADOS UTILIZADOS EM VERTEDOUROS

Vertedouro	$H_d$ (m)	$\eta$	$\theta(^{\circ})$	$Z$ (m)
Panjiakou	-	0,65	20,00	-
Ankang	21	0,40	21,80	8,5
Yantan	21	0,50	18,00	10,7
Wuqiangxi	20	0,37	16,70	10,8
Geheyang	-	0,30	11,05	-
Yang Jia Wai Zi	-	0,60	14,05	-

Onde:

$H_d$  = carga de projeto do vertedouro (m);

$\eta$  = razão de contração dos pilares alargados conforme Eq. 2.18 (adm.);

$\theta$  = ângulo de contração dos pilares alargados conforme Eq. 2.19 (graus);

$Z$  = posição do início do alargamento dos pilares (m).

Nota-se uma grande variação entre obras nos parâmetros geométricos dos pilares alargados, a razão de contração ( $\eta$ ) varia desde 0,30 até 0,65, o ângulo de contração varia de 11,05° a 21,80° e a posição do início do alargamento entre 8,5 m até 10,8 m.

A posição de início do alargamento dos pilares alargados é um fator importante de seu dimensionamento, uma vez que, se os pilares alargados estiverem muito próximos da crista do vertedouro, pode-se reduzir a capacidade de descarga do vertedouro e se por outro lado os pilares alargados estiverem muito para jusante, pode ocorrer pouca contração lateral diminuindo a dissipação de energia promovida pelos pilares alargados.

Mo et al. (2007) investigaram a posição do início do alargamento dos pilares alargados e encontraram uma relação entre o ponto ideal de início de alargamento com o número de Froude nesta seção. Mo et al. (2007) calcularam o valor do número de Froude na seção de início do alargamento em obras que obtiveram êxito no uso de pilares alargados, os resultados estão apresentados na TABELA 2.4.



TABELA 2.4 – NÚMERO DE FROUDE NO INÍCIO DO ALARGAMENTO DOS PILARES

Vertedoro	$H_d$ (m)	$H_e$ (m)	$Z/H_d$	$B + l$ (m)	$B$ (m)	$\cos \omega$	$q$ (m <sup>3</sup> /s.m)	$F_z$
Wuqiangxi	20,0	23,8	0,538	24,5	19	0,723	243,9	1,813
Yantan	21,0	25,2	0,510	20,0	15	0,731	230,3	1,997
Ankang	21,0	20,1	0,406	19,0	15	0,766	196,8	1,738
Suofengying	20,0	19,5	0,512	16,0	13	0,731	179,0	1,946
Baise	17,5	19,7	0,764	22,0	14	0,665	177,9	2,274
Dazhaoshan	19,0	17,0	0,581	18,0	14	0,710	139,9	2,227
Gaobazhou	17,0	16,5	0,614	18,2	14	0,701	131,9	2,232
Taolinkou	15,3	15,1	0,693	18,2	15	0,681	123,8	2,234
Bajiangkou	16,0	13,7	0,534	15,4	13	0,724	104,2	2,128
Shuidong	13,6	15,0	0,347	18,0	15	0,788	100,2	1,827

FONTE: adaptado de Mo et al. (2007)

Onde:

$H_d$  = carga de projeto do vertedouro (m);

$H_e$  = carga de operação do vertedouro (m);

$Z$  = posição do início do alargamento dos pilares (m);

$B + l$  = largura entre eixos dos pilares (m);

$B$  = largura do vão dos pilares na seção sem alargamento (m);

$l$  = largura dos pilares sem alargamento (m);

$\cos \omega$  = cosseno do ângulo da calha do vertedouro no início do alargamento (adm.);

$q$  = vazão específica no vão entre pilares do vertedouro (m<sup>3</sup>/s.m);

$F_z$  = número de Froude na seção de início de alargamento dos pilares (adm.).

Com vistas à TABELA 2.4, Mo et al. (2007) verificaram em seus estudos que na seção de início de alargamento o número de Froude deve ser em torno de 2 para que ocorra boa dissipação de energia.

Mo et al. (2007) definiram uma variável para representar o escoamento considerando as condições de escoamento e a geometria dos pilares e denominaram como “número característico do escoamento” representado pela variável  $F_0$  e calculado conforme Eq. 2.20.

$$F_0 = \frac{B \cdot q}{(B + l) H_e \sqrt{g \cdot H_e}} \quad (2.20)$$

Onde:

$F_0$  = “número característico do escoamento” segundo Mo et al. (2007) (adm.);

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

Com base na perda de carga na aproximação do vertedouro, Mo et al. (2007) apresentaram a Eq. 2.21 relacionando o número de Froude no início do alargamento ( $F_z$ ) com a posição do início do alargamento dos pilares ( $Z$ ).

$$\frac{Z}{H_e} = \left(\frac{1}{\zeta}\right) \left(\frac{B+l}{B}\right)^{\frac{2}{3}} \left(\frac{F_0}{F_z}\right)^{\frac{2}{3}} \left(\cos\omega + \frac{F_z^2}{2}\right) - 1 \quad (2.21)$$

Onde:

$F_0$  = número característico do escoamento, conforme Eq. 2.20 (adm.);

$F_z$  = número de Froude no início do alargamento (adm.);

$\zeta$  = redução da carga na aproximação devido a perdas (adm.).

O valor do coeficiente  $\zeta$  varia entre 0,80 a 0,85 segundo Mo et al. (2007).

Utilizando as Eqs. 2.20 e 2.21, com o número de Froude no início do alargamento ( $F_z$ ) igual a 2, pode-se calcular a posição de início do alargamento dos pilares para que não ocorra perda da capacidade de descarga do vertedouro ou pouca dissipação de energia na bacia de dissipação.

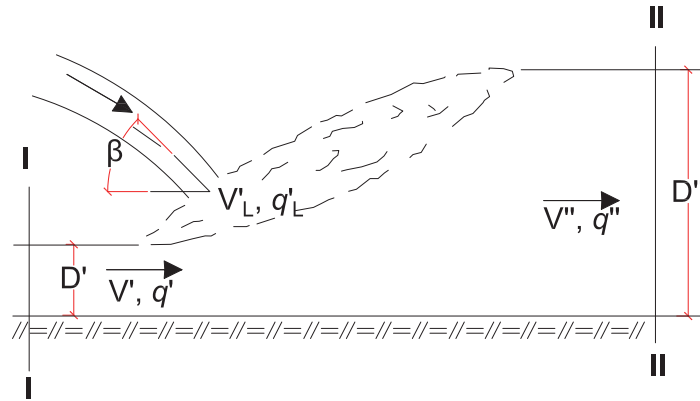
Em linhas gerais, o que define o formato da seção transversal dos pilares alargados é o tipo de vertedouro onde ele será empregado, ou seja, seção retangular e Y são utilizados em vertedouros com bacia de dissipação, lançamento submerso e salto esqui; a seção transversal em X é utilizada em vertedouros em degraus. Ressalta-se que o formato retangular é mais propenso a afetar a capacidade de descarga do vertedouro. Fontanelli (2017) realizou estudo de pilares alargados com seção transversal retangular em descarregadores de fundo e concluiu que, para determinadas vazões, pilares alargados com esta seção transversal podem afetar a capacidade de descarga.

#### 2.2.4 Ressalto Hidráulico em Vertedouros com Pilares Alargados

Como visto anteriormente, o uso de pilares alargados em vertedouros com bacia de dissipação modifica a característica do ressalto hidráulico que usualmente se formaria sob a bacia de dissipação. As dimensões dos pilares alargados afetam diretamente as características do ressalto hidráulico. Com isso, é necessário compreender o impacto causado pelos pilares alargados no dimensionamento do próprio alargamento e, também, no dimensionamento da bacia de dissipação.

Ni (1998) desenvolveu uma equação empírica para determinar a profundidade conjugada de jusante do ressalto hidráulico em vertedouros com pilares alargados. Seu estudo foi realizado em ensaios no modelo reduzido do vertedouro da usina de Ankang, onde foram utilizados pilares alargados de seção transversal em Y com bacia de dissipação.

FIGURA 2.22 – RESSALTO HIDRÁULICO A JUSANTE DE VERTEDOUROS COM PILARES ALARGADOS



FONTE: adaptado de Ni (1998)

Onde:

$q'$  = vazão específica que escoam junto ao fundo da bacia ( $\text{m}^3/\text{sm}$ );

$q'_L$  = vazão específica lançada pelos pilares alargados ( $\text{m}^3/\text{sm}$ );

$q''$  = vazão específica na seção II ( $\text{m}^3/\text{sm}$ );

$D'$  = profundidade conjugada de montante do ressalto com pilares alargados (m);

$D''$  = profundidade conjugada de jusante do ressalto com pilares alargados (m);

$\beta$  = ângulo entre o escoamento lançado e a horizontal (graus);

$V'$  = velocidade média que escoam junto ao piso da bacia (m/s);

$V'_L$  = velocidade do escoamento lançado pelos pilares alargados (m/s);

$V''$  = velocidade média na seção II (m/s).

Com vistas à FIGURA 2.22, o método de Ni (1998) segue a premissa de que parte do escoamento, quando atinge os pilares alargados é lançado ( $q'_L$ ) e parte escoam junto à superfície da bacia de dissipação ( $q'$ ). A esta divisão do escoamento, Ni (1998) denominou “divisão de fluxo equivalente”,  $\alpha_e$ , que foi obtida experimentalmente em modelo reduzido conforme Eqs. 2.22 e 2.23.

$$\alpha_e = 0,9566 \left( \frac{b}{B+l} \right) + 0,1977 \left( \frac{E_0}{D_{1c}} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2.22)$$

$$D_1 \alpha_e = D' \quad (2.23)$$

Onde:



- $\alpha_e$  = divisão do fluxo equivalente (adm.);  
 $b$  = largura da seção mais contraída dos pilares (m);  
 $B$  = largura da seção sem contração (m);  
 $l$  = largura dos pilares do vertedouro (m);  
 $E_0$  = distância vertical entre o nível do reservatório e o fundo da bacia (m);  
 $D_{1c}$  = profundidade crítica a montante do ressalto sem pilares alargados (m);  
 $D_1$  = profundidade conjugada de montante do ressalto sem pilares alargados (m);  
 $D'$  = profundidade conjugada de montante do ressalto com pilares alargados (m).

Com a Eq. 2.22 pode-se determinar a profundidade conjugada de montante com pilares alargados ( $D'$ ).

A relação entre as profundidades conjugadas do ressalto hidráulico com pilares alargados,  $D'$  e  $D''$ , foi definida por Ni (1998) como  $N$ , o qual é calculado conforme Eqs. 2.24 e 2.25.

$$N^3 - 2 \left( \frac{F_1^2}{\alpha_e} + \frac{1}{2} \right) N + \frac{2}{\alpha_e^3} F_1^2 = 0 \quad (2.24)$$

$$N = \frac{D''}{D'} \quad (2.25)$$

Onde:

- $N$  = relação entre as profund. conjugadas do ressalto com pilares alargados (adm.);  
 $F_1$  = Froude na seção a montante do ressalto sem pilares alargados (adm.);  
 $\alpha_e$  = divisão do fluxo equivalente (adm.);  
 $D'$  = profundidade conjugada de montante do ressalto com pilares alargados (m);  
 $D''$  = profundidade conjugada de jusante do ressalto com pilares alargados (m).

Para que o fluxo se divida em duas parcelas quando passa pelos pilares alargados, o valor de  $\alpha_e$  deve ser menor ou igual a 1,  $\alpha_e \leq 1$ , reescrevendo a Eq. 2.22 pode-se encontrar um limite do valor da razão de contração ( $\eta$ ) dos pilares alargados (Eq. 2.26) para que o fluxo divida-se em duas parcelas e com isso, aumente a dissipação de energia no ressalto.

$$\frac{b}{B+l} \leq \left( \frac{1}{0,9566} \right) \left[ 1 - 0,1977 \left( \frac{E_0}{D_{1c}} \right)^{\frac{1}{2}} \right] \quad (2.26)$$

Além das profundidades conjugadas, também é importante determinar o comprimento do ressalto hidráulico em vertedouros com pilares alargados. Nesse sentido, Li et al. (2000) realizaram estudos em modelo reduzido com pilares alargados de seção transversal em Y. Li et al. (2000) concluíram que o comprimento do ressalto hidráulico em vertedouros com pilares alargados ( $L'_{RH}$ ) varia muito pouco com a variação da

razão de contração dos pilares ( $\eta$ ). Com isso definiram experimentalmente a Eq. 2.27 para determinação do comprimento do ressalto hidráulico em vertedouros com pilares alargados.

$$L'_{RH} = 7,3D_1(F_1 - 1) \quad (2.27)$$

Onde:

$L'_{RH}$  = comprimento do ressalto hidráulico com pilares alargados (m);

$D_1$  = profundidade conjugada de montante sem pilares alargados (m);

$F_1$  = número de Froude na seção de montante sem *flaring piers* (adm.).

Já Yin, Liang e Gong (2010), definiram experimentalmente o comprimento do ressalto hidráulico com pilares alargados em função da vazão específica e energia, conforme Eq. 2.28.

$$L'_{RH} = 17,51 \left( \frac{q''}{\sqrt{g \cdot E_0^{1,5}}} \right) + 0,34 \quad (2.28)$$

Onde:

$q''$  = vazão específica na bacia de dissipação ( $m^3/s.m$ );

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

$E_0$  = distância vertical entre o nível do reservatório e a elevação do fundo da bacia (m).

Yin, Liang e Gong (2010) concluíram que para valores altos de vazão específica, o comprimento do ressalto com pilares alargados tende a se igualar com o comprimento do ressalto sem pilares alargados, porém Yin, Liang e Gong (2010) não apresentaram valores numéricos que definam a grandeza da vazão específica mencionada.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia empregada para avaliar os efeitos dos pilares alargados no escoamento e erosão a jusante de bacias de dissipação foi a realização de ensaios em modelo hidráulico reduzido utilizando fundo móvel erodível.

O modelo reduzido objeto deste estudo é composto por um vertedouro com bacia de dissipação em acrílico instalado em um canal horizontal de seção transversal retangular construído na escala geométrica 1:50, utilizando água em temperatura ambiente e operando segundo o critério de semelhança de Froude. Para a realização dos ensaios, definiu-se como vazão específica ( $q$ ) no protótipo nos vãos entre pilares do vertedouro o valor de 99 m<sup>3</sup>/s.m que corresponde a 78 m<sup>3</sup>/s.m na bacia de dissipação.

O modelo reduzido faz parte do projeto de P&D Aneel número 6491-0369/2015 intitulado: “Desenvolvimento de critérios para dimensionamento de bacias de dissipação de energia com o uso de *flaring piers* utilizando modelo hidráulico reduzido”. Este projeto está sendo executado com parceria entre a Companhia Paranaense de Energia - Copel e Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento - Lactec/Cehpar.

A seguir, apresenta-se as definições do modelo hidráulico reduzido e, por fim, a metodologia empregada nos ensaios.

#### 3.1 MODELO HIDRÁULICO REDUZIDO

##### 3.1.1 Definição da Escala de Redução Geométrica

Para simular escoamentos de superfície livre em modelos reduzidos, onde o escoamento depende em grande parte da ação da gravidade sob a massa de líquido, o modelo de semelhança de Froude é o mais indicado. O modelo de semelhança de Froude assume que o número de Froude no modelo seja o mesmo que o observado no protótipo. Possui a vantagem da utilização do mesmo líquido entre protótipo e modelo uma vez que despreza os efeitos da viscosidade do líquido utilizado (em vertedouros de usinas hidrelétricas, a água).

Quando se utiliza o modelo de semelhança de Froude, a determinação da escala de redução deve levar em conta que escalas muito pequenas podem apresentar efeitos indesejáveis oriundos da viscosidade do líquido, e por outro lado, escalas muito grandes podem inviabilizar a construção do modelo.

Em modelos reduzidos para estudos de erosões, é desejável que a escala não seja muito reduzida. Nos estudos de Lara (2011) e Fontanelli (2017), onde utilizou-se modelo reduzido para estudos erosões ocasionadas por pilares alargados, utilizou-se

escala de redução em 100 vezes. Estes pesquisadores não relataram que a escala de redução utilizada influenciou de maneira negativa nos resultados de erosão.

No presente estudo, optou-se por uma escala geométrica de redução menor, em 50 vezes, ou seja, a escala geométrica do modelo reduzido utilizado no presente estudo é 1:50.

### 3.1.2 Definições das Vazões

A TABELA 3.1 apresenta valores de vazão específica nos vãos de alguns vertedouros que utilizaram bacias de dissipação como dissipador de energia hidráulica.

TABELA 3.1 – VERTEDOUROS COM BACIAS DE DISSIPÇÃO - VAZÕES ESPECÍFICAS NO VÃO DO VERTEDOURO

Usina Hidrelétrica	Vazão Específica m <sup>3</sup> /s.m
Camargos	27
Funil (MG)	147
Ibitinga	37
Igarapava	145
Ilha Solteira	98
Porto Colômbia	98
Sinop	175
Colíder	144
Baixo Iguaçu	160
Marimbondo	131
Nova Avanhandava	105
Jurumin	52

FONTE: Adaptado de CBDB (2002)

Nota-se grande variabilidade nos valores da TABELA 3.1, isso se deve às condições hidrológicas particulares de cada obra. Nesta dissertação, adotou-se a vazão de 175 m<sup>3</sup>/s.m como valor extremo de vazão específica, correspondente à máxima vazão específica nos vãos do vertedouro das obras apresentadas na TABELA 3.1. E como vazão específica de maior recorrência, adotou-se o valor de 99 m<sup>3</sup>/s.m. A TABELA 3.2 apresenta as vazões específicas utilizadas nesta dissertação.

TABELA 3.2 – VAZÕES ESPECÍFICAS DEFINIDAS PARA OS ESTUDOS

Descrição	Vazão Específica no Vão m <sup>3</sup> /s.m	Vazão Específica na Bacia m <sup>3</sup> /s.m
Vazão extrema	175	138
Vazão recorrente	99	78

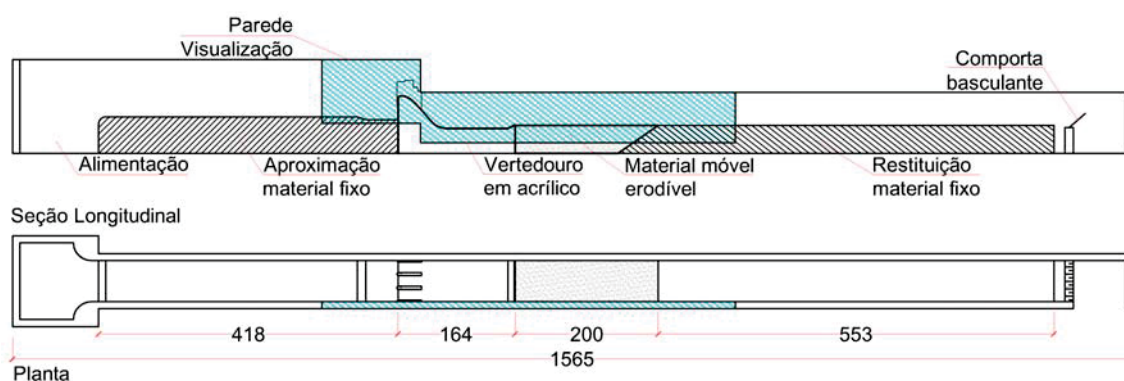
Os valores de vazões totais são os mesmos no vão e na bacia de dissipação, a diferença de valores de vazão específica entre esses dois locais, deve-se à diferença de largura na bacia de dissipação (mais larga que os vãos do vertedouro).

### 3.1.3 Dimensionamento do Canal

O modelo reduzido está instalado em um canal retangular horizontal, com largura de 1,128 m e um comprimento total de 31,30 m. Destes, 8,30 m a montante e 15,00 m a jusante do vertedouro, sendo estas distâncias suficientes para evitar efeitos indesejáveis ao escoamento causados por correntes secundárias e para propiciar uma alimentação e restituição simétrica ao vertedouro. O canal conta com uma região de 4,00 m de comprimento onde se pode representar um leito erodível com material móvel.

O canal foi executado em alvenaria de tijolos com acabamento em emboço e cimento e impermeabilizado com argamassa polimérica. Na região do vertedouro e fundo móvel, a lateral direita do canal conta com uma parede translúcida em vidro para possibilitar a visualização do escoamento e processo de erosão. A FIGURA 3.1 apresenta um croqui da implantação do canal do modelo reduzido.

FIGURA 3.1 – DETALHES DA IMPLANTAÇÃO DO MODELO HIDRÁULICO REDUZIDO



A alimentação de água do modelo é fornecida por meio de duas tubulações de diâmetro nominal de 300 mm cada, equipadas com dois medidores de vazão eletromagnéticos da marca Krohne / Conault modelo Optiflux 4000 podendo-se alimentar o modelo com vazões de até 450 L/s (vazão volumétrica em medidas de modelo).

Na extremidade de jusante do canal está instalada uma comporta basculante composta por um sistema de rosca sem fim para ajuste fino dos níveis de água de jusante.

Como referência de nível definiu-se a região mais baixa da fossa de erosão como a EL. 0,00 m, as demais elevações apresentadas estão referenciadas a partir desta elevação.

### 3.1.4 Dimensionamento do Modelo do Vertedouro e Bacia de Dissipação

O modelo do vertedouro e bacia de dissipação foram construídos em acrílico. Com a escala geométrica definida conforme já apresentada (1:50), o dimensionamento foi realizado utilizando valores de protótipo com a finalidade de tornar as dimensões mais palpáveis e comparáveis com vertedouros de usinas hidrelétricas em operação.

O modelo do vertedouro representa um vertedouro com três vãos inteiros com 14,8 m de largura, com dois pilares inteiros com 4,00 m de largura e 2 meio-pilares com 2,00 m de largura. A crista do vertedouro está na EL. 80,20 m. O controle do escoamento é realizado por comportas segmento com raio de 16,00 m. A partir da vazão específica extrema de 175 m<sup>3</sup>/s.m, apresentada no item 3.1.2, calculou-se a carga de operação do vertedouro ( $H_e$ ) conforme a Eq. 3.1.

$$\begin{aligned} q &= C_{des} \cdot H_e^{\frac{3}{2}} \\ 175 &= 2,16 \cdot (H_e)^{\frac{3}{2}} \\ H_e &= 18,8 \text{ m} \end{aligned} \quad (3.1)$$

$q$  = vazão específica nos vãos dos pilares (m<sup>3</sup>/s.m);

$C_{des}$  = coeficiente de descarga do vertedouro, utilizado 2,16 (m<sup>1/2</sup>.s<sup>-1</sup>);

$H_e$  = carga de operação do vertedouro (m).

O perfil vertente foi dimensionado a partir de um perfil Creager (US Army Corps of Engineers, 1977) com  $\frac{H_e}{H_d}$  aproximadamente de 1,06, resultando em uma carga de projeto ( $H_d$ ) igual a 17,70 m, conforme Eq. 3.2.

$$\frac{y}{H_d} = 0,5 \left( \frac{x}{H_d} \right)^{1,86} \quad (3.2)$$

Onde:

$y$  = abcissa da coordenada com relação à crista do vertedouro (m);

$x$  = ordenada da coordenada com relação à crista do vertedouro (m);

$H_d$  = carga de projeto, utilizada 17,70 m (m).

As extremidades de jusante dos pilares do modelo do vertedouro foram construídas de tal forma que possam ser substituídas por pilares alargados. As FIGURAS 3.2 e 3.3 respectivamente apresentam um croqui do vertedouro e os detalhes da crista.

FIGURA 3.2 – DETALHES DO PROTÓTIPO DO VERTEDOURO - PLANTA E SEÇÃO LONGITUDINAL

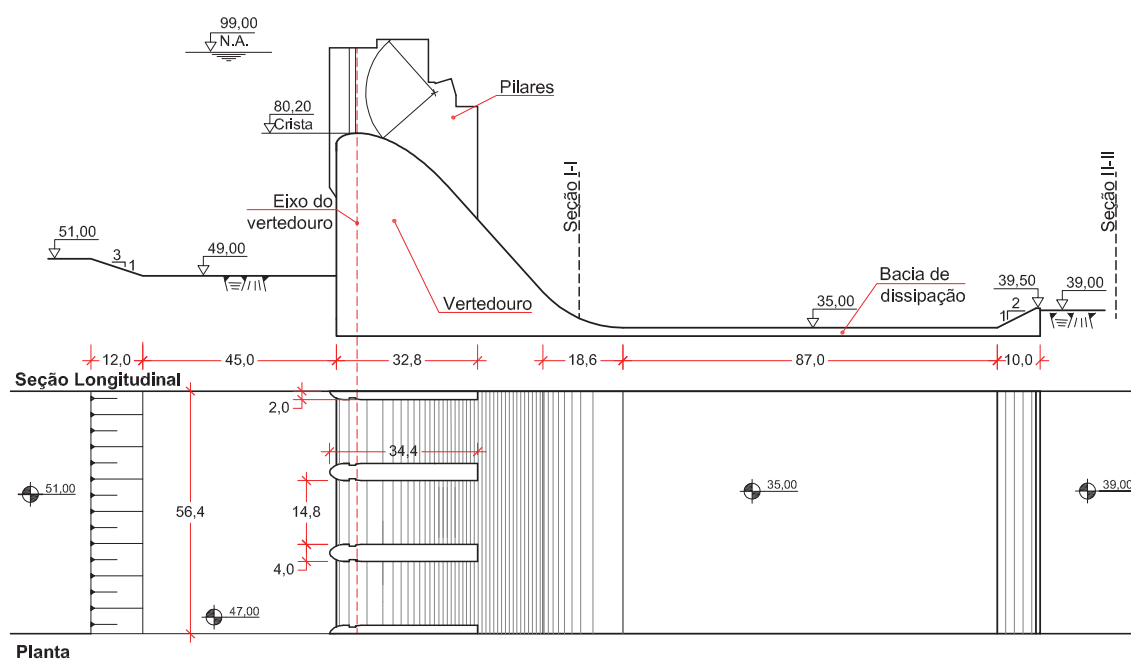
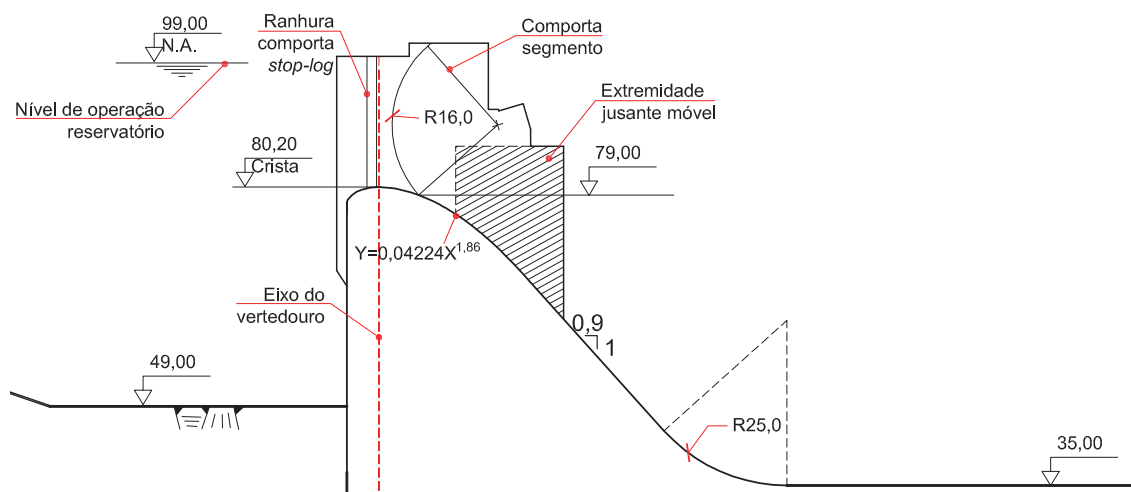


FIGURA 3.3 – DETALHES DA CRISTA DO PROTÓTIPO DO VERTEDOURO



A bacia de dissipação foi dimensionada pelo do método apresentado no estudo do Bureau of Reclamation (1998). A vazão específica utilizada para o dimensionamento da bacia de dissipação foi igual a 78 m<sup>3</sup>/s.m, conforme apresentado no item 3.1.2, uma vez que usualmente as bacias de dissipação são dimensionadas com vazões menores que às máximas enfrentadas pelo vertedouro (PINTO, 1987).

Desconsiderando as perdas de energia por atrito na superfície do vertedouro, utilizou-se a equação do balanço de energia (Bernoulli) entre o reservatório e a seção na entrada da bacia (seção I-I conforme FIGURA 3.2) para calcular as condições de escoamento nesta seção, apresentado conforme Eq. 3.3.

$$\begin{aligned}
 Z_{res.} + \frac{p_{res.}}{\gamma} + \frac{V_{res.}^2}{2g} &= Z_1 + \frac{p_1}{\gamma} + \frac{V_1^2}{2g} \\
 99,0 + 0 + 0 &= (35 + D_1) + 0 + \frac{V_1^2}{2g} \\
 \text{como: } q &= D_1 * V_1 \implies D_1 = 78/V_1 \\
 V_1 &= 34,81 \text{ m/s} \\
 D_1 &= 2,23 \text{ m}
 \end{aligned}
 \tag{3.3}$$

Onde:

- $Z_{res.}$  = cota do nível de água no reservatório (m);
- $p_{res.}$  = pressão de água relativa na superfície do reservatório (Pa);
- $V_{res.}$  = velocidade média na superfície do reservatório (m/s);
- $Z_1$  = cota do nível de água na seção I-I (m);
- $p_1$  = pressão de água relativa na superfície da seção I-I (Pa);
- $V_1$  = velocidade média na superfície da seção I-I (m/s);
- $D_1$  = profundidade do escoamento na seção I-I (m);
- $\gamma$  = peso específico da água (N/m<sup>3</sup>);
- $q$  = vazão específica na seção I-I, entrada da bacia (m<sup>3</sup>/s.m).

O número de Froude na seção I-I ( $F_1$ ) foi calculado conforme Eq.3.4.

$$\begin{aligned}
 F_1 &= \frac{V_1}{\sqrt{g * D_1}} \implies \frac{34,81}{\sqrt{9,81 * 2,23}} \\
 F_1 &= 7,44
 \end{aligned}
 \tag{3.4}$$

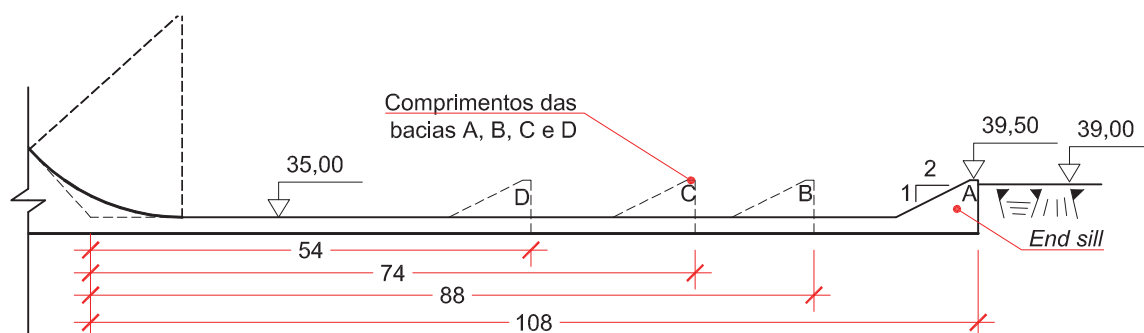
Com a equação das profundidades conjugadas do ressalto hidráulico (Eq. 2.1), obtém-se a profundidade conjugada necessária de jusante ( $D_2$ ) igual a 22,39 m. Nesta faixa de número de Froude ( $F_1 = 7,44$ ), utilizando método do (US Army Corps of Engineers, 1980) apresentado na TABELA 2.2 o valor do comprimento da bacia de dissipação é aproximadamente  $L_{BD} = 4,0D_2$ , com isso obteve-se o comprimento da bacia de dissipação de 89,56 m, representada pela bacia B (FIGURA 3.4) que por limitações construtivas teve seu comprimento aproximado para 88 m.

O modelo da bacia de dissipação foi construído de modo a se poder modificar o comprimento da bacia de dissipação, conforme apresentado na FIGURA 3.4 a bacia pode ser ensaiada nos seguintes comprimentos: bacia A = 108 m, bacia B = 88 m,



bacia C = 74 m e bacia D = 54 m. Esses comprimentos foram definidos para poder realizar uma avaliação da possível redução do comprimento da bacia de dissipação com o uso dos pilares alargados.

FIGURA 3.4 – DETALHES DA BACIA DE DISSIPACÃO



As FIGURAS 3.5 a 3.7 apresentam a implantação do modelo reduzido.

FIGURA 3.5 – MODELO HIDRÁULICO REDUZIDO - VISTA LATERAL DO VERTEDOURO



FIGURA 3.6 – MODELO HIDRÁULICO REDUZIDO - VISTA DE JUSANTE DO VERTEDOURO

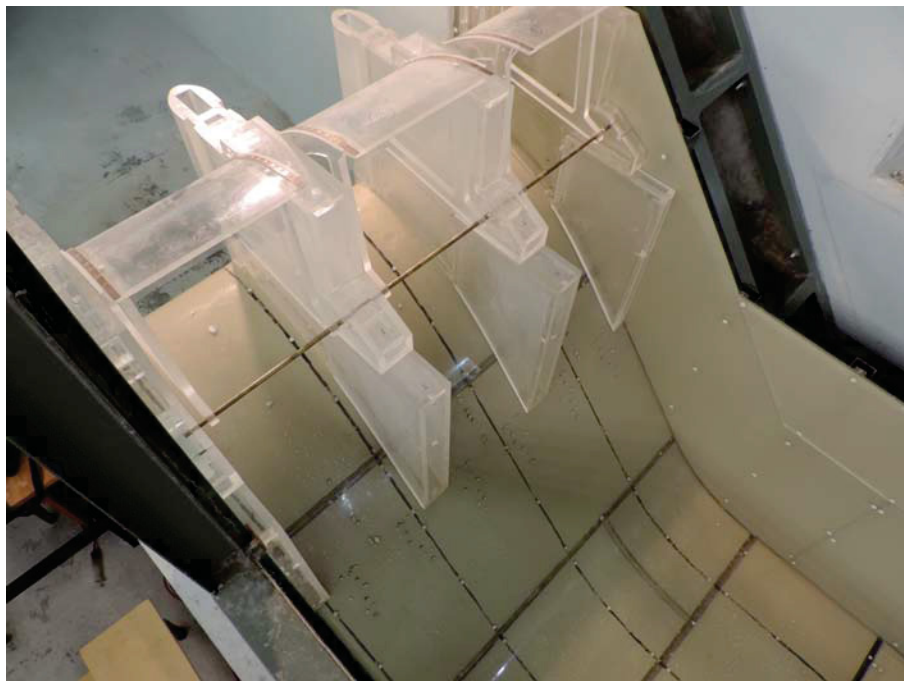


FIGURA 3.7 – MODELO HIDRÁULICO REDUZIDO - FUNDO MÓVEL VISTA DE JUSANTE



### 3.1.5 Definição do Material Erodível

A fim de avaliar o potencial erodível do escoamento efluente do vertedouro de pilares alargados, a jusante da bacia de dissipação o fundo do canal foi implantado com material móvel. O fundo móvel caracteriza-se por uma região de 4,00 m de comprimento para representar um fundo erodível, e que na escala de 1:50 representa 200,00 m.

A escolha do diâmetro do material granular foi realizada de tal forma a representar no protótipo rochas de 0,56 m de diâmetro médio (0,64 m máximo e 0,48 m mínimo). O qual está em conformidade com diâmetros utilizados em estudos anteriores. Lara (2011) utilizou em seus ensaios material que representa diâmetro médio de 1,10 m no protótipo, Fontanelli (2017) utilizou material que representa 0,76 m em protótipo e Carvalho (2017) utilizou diâmetros de material ente 0,47 m e 0,95 m.

Para representar o material de 0,56 m na escala geométrica de 1:50, utilizou-se no modelo, material granular não coesivo com diâmetro médio de 11,2 mm (12,8 mm máximo e 9,6 mm mínimo). A massa específica do material granular utilizado é igual a 2.650 Kg/m<sup>3</sup>.

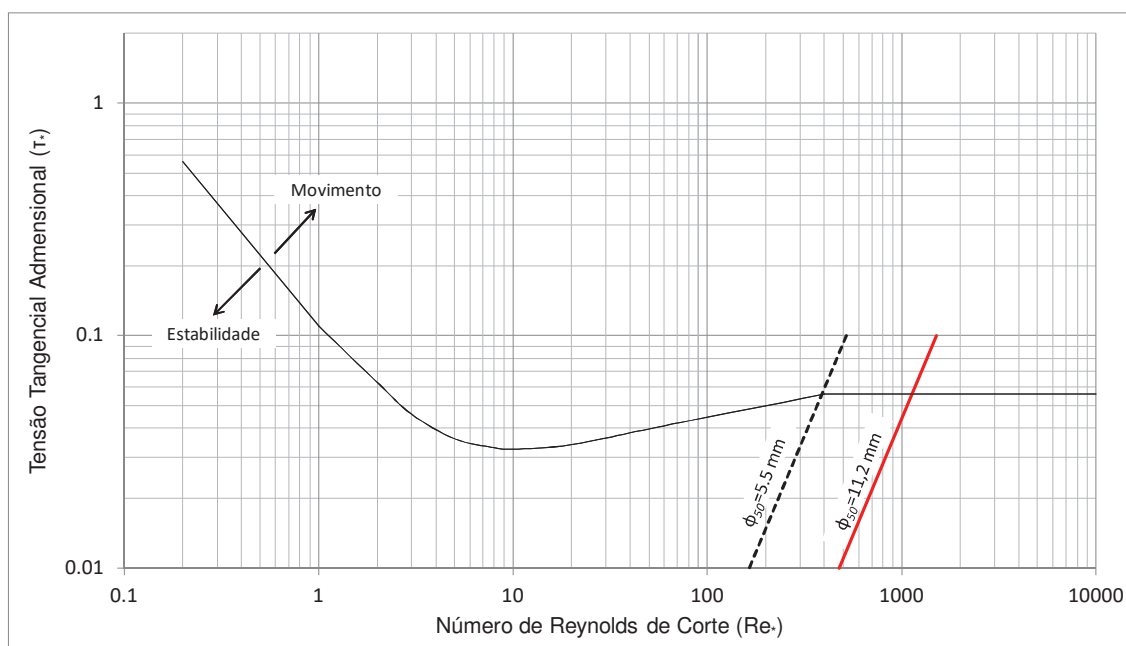
O material selecionado para os ensaios em modelo ( $\phi_{50} = 11,2$  mm) foi verificado com o critério de Shields (1936). Esta verificação foi feita para avaliar se o material de 11,2 mm utilizado no modelo representa, de maneira adequada (na escala de 1:50), o material do protótipo de 0,56 m sem sofrer influência da viscosidade da água.

Utilizando o Diagrama de Shields, arbitrou-se dois valores para a tensão tangencial adimensional,  $\tau_* = 0,1$  e  $\tau_* = 0,01$ . Com ambos valores, calculou-se a tensão tangencial junto ao fundo ( $\tau$ ), a velocidade de corte ( $v_*$ ) e por fim, o número de Reynolds de corte ( $Re_*$ ) com as Eqs. 2.15 a 2.17.

$$\begin{aligned}\tau_* &= 0,1 \\ \tau &= 18,129 \text{ N/m}^2 \\ v_* &= 0,175 \text{ m/s} \\ Re_* &= 1508 \\ \tau_* &= 0,01 \\ \tau &= 1,8129 \text{ N/m}^2 \\ v_* &= 0,0425 \text{ m/s} \\ Re_* &= 476,9\end{aligned}$$

Com os dois pares ordenados calculados do número de Reynolds de corte e a tensão tangencial adimensional, plotou-se estes dois pontos no diagrama de Shields, dando origem a reta em vermelho da FIGURA 3.8.

FIGURA 3.8 – DIAGRAMA DE SHIELDS (1936) - ANÁLISE DE PARTÍCULAS DE 5,5 mm E 11,2 mm PARA MATERIAIS COM MASSA ESPECÍFICA DE 2.650 Kg/m<sup>3</sup>



FONTE: Adaptado de Shields (1936)

Nota-se que a linha em vermelho, a qual representa o material granular de  $\phi_{50} = 11,2 \text{ mm}$  de massa específica igual a 2.650 Kg/m<sup>3</sup>, está na região do diagrama de Shields onde a tensão tangencial adimensional é constante ( $\tau_* = 0,056$ ), ou seja, não depende do número de Reynolds de corte e não sofre influencia da viscosidade da água. Isso significa que o material utilizado no modelo,  $\phi_{50} = 11,2 \text{ mm}$ , não é afetado pela viscosidade da água no que diz respeito às questões de arraste e erosões, e pode representar, na escala de 1:50, materiais granulares de  $\phi_{50} = 0,56 \text{ m}$  no protótipo.

### 3.1.6 Dimensionamento dos Pilares Alargados

O dimensionamento da geometria dos pilares alargados baseou-se na premissa de que o alargamento tivesse boa dissipação de energia e não afetasse a capacidade de descarga do vertedouro. Este dimensionamento foi realizado com os dados de protótipo apresentados no item 3.1.4.

O limite máximo da razão de contração dos pilares alargados para que ocorra a divisão do fluxo em duas parcelas, foi calculado pela Eq. 2.26 utilizando a vazão específica no protótipo igual a 99 m<sup>3</sup>/s.m., definida no item 3.1.2. Utilizou-se esta vazão específica para que se garanta a dissipação de energia pelos pilares alargados para vazões com maior recorrência. A Eq. 3.5 apresenta o cálculo do limite máximo da taxa

de contração dos pilares alargados.

$$\frac{b}{B+4} \leq \left( \frac{1}{0,9566} \right) \left[ 1 - 0,1977 \left( \frac{64}{9,97} \right)^{\frac{1}{2}} \right] \quad (3.5)$$

$$\frac{b}{B} = \eta \leq 0,66$$

Ou seja, o limite máximo da razão de contração  $\eta$  para que haja divisão do fluxo ocasionada pelos pilares alargados é 0,66. A definição da razão de contração foi baseada nos valores já utilizados em obras (TABELA 2.3), nos valores utilizados nos ensaios de Fontanelli (2017) e no limite máximo calculado, então definindo-se como razão de contração o valor 0,50, ou seja  $\eta = 0,50$ .

O valor do ângulo de contração dos pilares alargados,  $\theta$ , foi definido como  $21,80^\circ$ , utilizando o maior valor apresentado na TABELA 2.3.

A posição do início do alargamento foi calculada com a vazão específica de  $175,00 \text{ m}^3/\text{s.m}$  uma vez que dependendo da posição do início do alargamento a capacidade de descarga do vertedouro pode ser afetada negativamente (MO et al., 2007).

Inicialmente calculou-se o valor do “número característico do escoamento”  $F_0$  com a Eq. 2.20. O cálculo está apresentado na Eq. 3.6.

$$F_0 = \frac{14,8 \cdot 175,0}{(14,8 + 4) \cdot 18,8 \sqrt{9,81 \cdot 18,8}} \quad (3.6)$$

$$F_0 = 0,5458$$

Onde:

$F_0$  = “número característico do escoamento” (adm.).

A posição do início do alargamento dos pilares,  $Z$ , foi calculada conforme Eq. 2.21, os cálculos estão apresentados na Eq. 3.7.

$$\frac{Z}{18,8} = \left( \frac{1}{0,825} \right) \left( \frac{14,8 + 4}{14,8} \right)^{\frac{2}{3}} \left( \frac{0,5458}{2} \right)^{\frac{2}{3}} \left( 0,695 + \frac{2^2}{2} \right) - 1 \quad (3.7)$$

$$Z = 14,00 \text{ m}$$

Onde:

$Z$  = distância vertical entre a crista e o início do alargamento (m).

O cálculo da Eq. 3.7 foi realizado para que o alargamento não afete negativamente a capacidade de descarga do vertedouro.

A definição da seção transversal dos pilares alargados baseou-se em obras que utilizaram os pilares alargados em vertedouros com bacia de dissipação, onde há predominância dos pilares em formato de Y. Então, foi definida a seção transversal em formato de Y para os estudos.

A TABELA 3.3 apresenta o resumo do dimensionamento da geometria dos pilares alargados em medidas de protótipo. A FIGURA 3.9 apresenta um croqui do protótipo dos pilares alargados e a FIGURA 3.10 uma vista de jusante do modelo dos pilares alargados.

TABELA 3.3 – PILARES ALARGADOS UTILIZADOS NO MODELO HIDRÁULICO REDUZIDO

Seção	$a$ (m)	$L$ (m)	$B$ (m)	$b$ (m)	$\eta$	$\theta(^{\circ})$	$Z$ (m)
Y	3,70	9,25	14,8	7,40	0,50	21,80	14,00

FIGURA 3.9 – CROQUI DO PROTÓTIPO DOS PILARES ALARGADOS

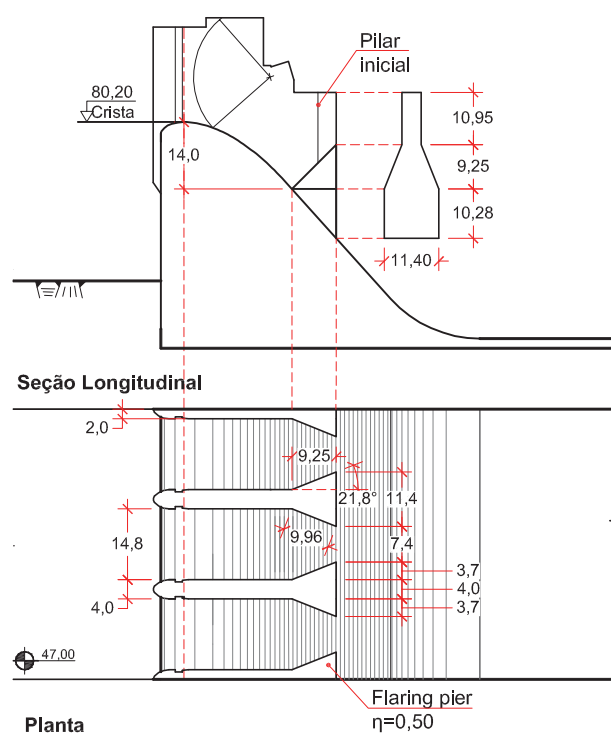




FIGURA 3.10 – VISTA DE JUSANTE DO MODELO DOS PILARES ALARGADOS



### 3.2 DEFINIÇÃO DOS ENSAIOS

A fim de avaliar o potencial erosivo do escoamento efluente de um vertedouro de pilares alargados com bacia de dissipação, foram definidos oito ensaios. Os ensaios consideraram as quatro bacias de dissipação (A, B, C e D), e o vertedouro com os pilares retos e com pilares alargados. Os ensaios com pilares retos tiveram a finalidade de criar parâmetros, e com estes, poder avaliar os efeitos dos pilares alargados em comparação com uma metodologia já consagrada. A TABELA 3.4 apresenta as características dos ensaios.

TABELA 3.4 – ENSAIOS NO MODELO HIDRÁULICO REDUZIDO

Ensaio	Bacia de dissipação	Pilares	$q$ (m <sup>3</sup> /s.m) no vão	Tempo de exposição (h)	$L_{BD}$ (m)	observação
1	A	Retos	99,0	21,4	108	23% maior
2	A	Alargados	99,0	21,4	108	23% maior
3	B	Retos	99,0	21,4	88	padrão USBR
4	B	Alargados	99,0	21,4	88	padrão USBR
5	C	Retos	99,0	21,4	74	16% menor
6	C	Alargados	99,0	21,4	74	16% menor
7	D	Retos	99,0	21,4	54	39% menor
8	D	Alargados	99,0	21,4	54	39% menor

A seguir, apresenta-se as definições, metodologia e materiais utilizados nos ensaios.

### 3.2.1 Vazão e Tempo de Exposição

A vazão utilizada nos ensaios em modelo, 280 l/s.m, é equivalente, no protótipo, a uma vazão específica nos vãos de  $q = 99 \text{ m}^3/\text{s.m}$ . Esta vazão representa valores com grande recorrência em obras com vertedouros com bacia de dissipação e foi a mesma vazão utilizada no dimensionamento da bacia de dissipação do modelo hidráulico reduzido, ver TABELA 3.1 e item 3.1.2.

Definiu-se o nível de jusante a partir da profundidade conjugada de jusante calculada no item 3.1.4 igual a 22,39 m, porém a fim de garantir que o ressalto hidráulico se mantivesse contido no interior da bacia de dissipação, esse nível foi aumentado em 0,80 m, resultando um nível de escoamento de jusante igual a 23,19 m, ou seja, EL. 58,19 m.

O tempo de exposição do fundo móvel ao escoamento nos ensaios foi igual a três horas em modelo, equivalente a 21,4 horas no protótipo. A definição desse tempo objetivou buscar um tempo mínimo para que a erosão no material móvel se estabilizasse. O tempo de exposição utilizado (21,4 horas) foi superior ao tempo utilizado em estudos anteriores sobre erosão. Nos estudos de Fontanelli (2017) e Carvalho (2017), foram utilizados 10 horas e 6,5 horas respectivamente como tempo de exposição do material móvel ao escoamento.

### 3.2.2 Metodologia dos Ensaios

A metodologia empregada em cada ensaio foi definida como segue:

- Inicia-se com o material móvel submerso e o nível de jusante acima do previsto para o ensaio, a fim de garantir que, na fase de enchimento do modelo, o material do fundo móvel não seja solicitado com tensões tangenciais acima das previstas durante do ensaio;
- Inicia-se a imposição da vazão com as comportas *stop-logs* do vertedouro fechadas. Essas comportas são gradativamente abertas mantendo-se o nível de montante na EL. 99,00 m e garantindo o controle por orifício das comportas segmento;
- O nível de jusante é gradualmente abaixado até o nível correto para o ensaio;
- A partir desta etapa, inicia-se efetivamente a contagem do tempo de exposição do material móvel ao fluxo, equivalente a 21,4 horas;

- Ao término do tempo de exposição, desliga-se a vazão e o nível de jusante é esgotado gradativamente;
- Realiza-se o levantamento batimétrico para avaliar as erosões na região do fundo móvel.

### 3.2.3 Equipamentos Utilizados

Os equipamentos utilizados nos ensaios são os seguintes:

- régua linimétrica: utilizada para leituras de nível de escoamento, possui um vernier com precisão de décimos de milímetro. A régua é periodicamente nivelada conforme referência de nível do modelo para garantia de sua precisão;
- medidor eletromagnético de vazão : utilizado para imposição de vazão de água no modelo, possui precisão de 2% em fluxo de volume. Marca Krohne / Conault modelo Optiflux 4000;
- scanner manual: utilizado para o levantamento altimétrico da região do fundo móvel, possui precisão espacial de aproximadamente 2 mm. Marca Faro modelo Freestyle 3D.

## 4 RESULTADOS

Este capítulo apresenta os resultados obtidos nos oito ensaios realizados no modelo hidráulico reduzido. Considerando os ensaios com pilares retos como referência, inicialmente apresenta-se a caracterização do escoamento, na sequência os resultados de erosão e por fim, a análise de volumes de concreto dos alargamentos dos pilares e das bacias de dissipação.

### 4.1 CARACTERIZAÇÃO DO ESCOAMENTO

#### 4.1.1 Escoamento ao Longo do Vertedouro

Dentre os oito ensaios realizados, o escoamento ao longo da calha do vertedouro não se alterou com a troca das bacias de dissipação. Resumindo-se em apenas dois padrões de escoamento ao longo da calha: com pilares retos e com pilares alargados. As FIGURAS 4.1 e 4.2 apresentam as condições de escoamento observadas nos ensaios com pilares reto e com pilares alargados, respectivamente.

Com pilares retos (ensaios 1, 3, 5 e 7), o escoamento se propagou em regime supercrítico junto à calha. Não houve incorporação de ar no escoamento nesta região. Após o escoamento passar pelos pilares, foi observada a formação de pequenos rabos-de-galo a jusante destes (FIGURA 4.1a), mas de dimensões muito pequenas.

Nos ensaios com pilares alargados (ensaios 2, 4, 6 e 8), parte do escoamento sofre um salto junto às paredes dos pilares e são direcionadas para o centro do vão na região do alargamento dos pilares. Estas parcelas adjacentes do escoamento que saltam, chocam-se formando um rabo-de-galo promovendo a incorporação de ar ao escoamento, conforme apresentado na FIGURA 4.1b. Mesmo havendo um estreitamento na passagem de água, não foram observadas ondulações ou propagação de turbulências para a região de montante do vertedouro ocasionadas pelos alargamentos dos pilares. Este é um indicativo de que nas condições ensaiadas, os pilares alargados não prejudicam a capacidade do vertedouro de descarregar cheias, porém são necessárias melhores avaliações no que diz respeito à capacidade de descarga do vertedouro.

FIGURA 4.1 – ESCOAMENTO AO LONGO DO MODELO DO VERTEDOURO



(a) Ensaio com pilares retos



(b) Ensaio com pilares alargados



FIGURA 4.2 – ESCOAMENTO AO LONGO DO MODELO DO VERTEDOURO - VISTA LATERAL



(a) Ensaio com pilares retos



(b) Ensaio com pilares alargados



#### 4.1.2 Escoamento na Bacia de Dissipação

Esta seção apresenta as condições de escoamento observadas ao longo da bacia de dissipação e a jusante da mesma. A fim de facilitar a comparação entre as estruturas com pilares retos e com pilares alargados, os resultados estão agrupados por ensaios com a mesma bacia de dissipação.

Bacia de dissipação A - Ensaios 1 e 2 ( $L_{BD} = 108$  m - 23% maior):

Nos ensaios 1 e 2, os quais foram realizados com a bacia A ( $L_{BD} = 108$  m), em ambos, o rolo superficial do ressalto hidráulico formou-se no interior da bacia, a montante do *end sill* (FIGURA 4.3). O rolo superficial no ensaio 2 (com pilares alargados) apresentou menor comprimento em comparação com o ensaio 1 (com pilares retos). Na região do fim da bacia, junto ao fundo, o ensaio com pilares alargados apresentou (visualmente) menor quantidade de ar incorporado ao escoamento, o que significa que o processo de dissipação e transformação de energia já havia sido completado nesta região.

A FIGURA 4.4 apresenta o escoamento a jusante da bacia de dissipação nos ensaios 1 e 2 (bacia A). Nota-se que no ensaio com pilares retos (ensaio 1), a parcela do escoamento junto ao fundo, quando transpõe o *end sill*, apresenta formação de vórtices horizontais de eixo transversal ao alinhamento do canal, ocasionando correntes de retorno junto ao material móvel (FIGURA 4.4a). Por apresentar velocidade junto ao fundo menor que no ensaio 1, este efeito não foi observado no ensaio 2 (FIGURA 4.4b). No ensaio com pilares retos foi observada a movimentação de material móvel em suspensão no escoamento (FIGURA 4.4a). Este efeito não foi observado no ensaio com pilares alargados.

Bacia de dissipação B - Ensaios 3 e 4 ( $L_{BD} = 88$  m - padrão USBR):

Com a bacia de dissipação na posição B (ensaios 3 e 4), a qual corresponde à bacia com comprimento dimensionado pelo método do Bureau of Reclamation (1998) ( $L_{BD} = 88$  m), o escoamento apresentou características semelhantes às observadas nos ensaios com a bacia A (ensaio 1 e 2). No ensaio com pilares retos, o rolo superficial do ressalto hidráulico ficou contido no interior da bacia e seu término localizou-se na seção do *end sill* (FIGURA 4.5a) e no ensaio com pilares alargados, o rolo teve comprimento de 2/3 o comprimento da bacia conforme FIGURA 4.5b. O escoamento junto ao fundo, no final da bacia (seção do *end sill*), apresentou maiores velocidades no ensaio com pilares retos (ensaio 3 - FIGURA 4.5a) comparado com o ensaio com pilares alargados (ensaio 4 - FIGURA 4.5b). Assim como no ensaio 2, no ensaio 4 (ambos com pilares alargados) ocorreu menor incorporação de ar ao escoamento junto ao fundo no final da bacia de dissipação (FIGURA 4.5b).

A FIGURA 4.6 apresenta o escoamento na região a jusante da bacia de

dissipação , onde nota-se, no ensaio 3 (FIGURA 4.6a), que o escoamento apresenta recirculação junto ao material móvel nas proximidades do fim da bacia, assim como observado no ensaio 1. Este efeito não foi observado no ensaio 4, com pilares alargados conforme FIGURA 4.6b. Assim como observado nos ensaios com bacia A, nestes ensaios houve movimentação de material por suspensão somente no ensaio com pilares retos (ensaio 3). O uso de pilares alargados mostrou-se bastante benéfico.

Bacia de dissipação C - Ensaios 5 e 6 ( $L_{BD} = 74$  m - 16% menor):

A FIGURA 4.7 apresenta as condições de escoamento na bacia C ( $L_{BD} = 74$  m) durante os ensaios 5 e 6. No ensaio 5, com pilares retos, o rolo superficial do ressalto hidráulico formou-se, parte no interior da bacia e parte fora da bacia, conforme FIGURA 4.7a a bacia não conteve inteiramente o ressalto hidráulico. Neste ensaio, nota-se que o *end sill*, defletiu o escoamento alterando o formato do rolo, em comparação com os ensaios 1 e 3 (bacias A e B ambas com pilares retos). No ensaio 6 o rolo superficial ficou contido no interior da bacia apresentando menor comprimento, comparado com o ensaio 5 (FIGURA 4.7b).

Na saída da bacia de dissipação C , devido ao *end sill*, em ambos os ensaios, o escoamento projeta-se para a superfície livre com grande intensidade. Logo a jusante deste, ambos os ensaios apresentaram recirculações no escoamento junto ao material móvel, porém com menor intensidade no ensaio 6 (FIGURA 4.8). Foi observado movimento de material por suspensão somente no ensaio com pilares retos, este efeito não ocorreu no ensaio com pilares alargados.

Bacia de dissipação D - Ensaios 7 e 8 ( $L_{BD} = 54$  m - 39% menor):

Os ensaios 7 e 8 foram realizados com a bacia de dissipação D, a mais curta entre as ensaiadas, com comprimento de  $L_{BD} = 54$  m. No ensaio 7, com pilares retos, o rolo superficial do ressalto foi menor que o observado nos demais ensaios com pilares retos (1, 3 e 5). Porém, formou-se para fora da bacia e foi modificado pelo fluxo intenso defletido pelo *end sill* (FIGURA 4.9a). No ensaio 8, o rolo superficial do ressalto ficou contido no interior da bacia (FIGURA 4.9b). Ao contrário do observado no ensaio com pilares retos (ensaio 7), o ressalto não sofreu influência do fluxo defletido pelo *end sill*.

A FIGURA 4.10 apresenta o escoamento a jusante da bacia de dissipação. No ensaio 7, o escoamento ao transpor o *end sill* foi defletido e se propagou com grande intensidade para cima em direção à superfície livre do escoamento. Com isso, na superfície do escoamento foi observada a formação de rolos com regiões de retorno, ver FIGURA 4.10a. Na região a jusante do *endsill*, junto ao fundo do canal, em ambos ensaios foi observada a formação de correntes de retorno, conforme FIGURAS 4.9 e 4.10, porém com menor intensidade no ensaio com pilares alargados (ensaio 8). Assim como observado em todos os ensaios com pilares retos (ensaio 7), ocorreu o

movimento de material e este entrou em suspensão no escoamento. Este efeito não foi observado no ensaio 8 (pilares alargados), o material do fundo móvel moveu-se, porém não entrou em suspensão, assim como em todos os ensaios com pilares alargados. Sem dúvidas, os ensaios alargados conduziram a melhores resultados em termos de dissipação de energia hidráulica.

FIGURA 4.3 – ESCOAMENTO AO LONGO DO MODELO DA BACIA DE DISSIPÇÃO A  
( $L_{BD} = 108$  m - 23% maior)



(a) Ensaio 1 - pilares retos



(b) Ensaio 2 - pilares alargados



FIGURA 4.4 – ESCOAMENTO AO LONGO DO MODELO - JUSANTE DA BACIA DE DISSIPACÃO A ( $L_{BD} = 108$  m - 23% maior)



(a) Ensaio 1 - pilares retos



(b) Ensaio 2 - pilares alargados

FIGURA 4.5 – ESCOAMENTO AO LONGO DO MODELO DA BACIA DE DISSIPACÃO B  
( $L_{BD} = 88$  m - padrão USBR)



(a) Ensaio 3 - pilares retos



(b) Ensaio 4 - pilares alargados



FIGURA 4.6 – ESCOAMENTO AO LONGO DO MODELO - JUSANTE DA BACIA DE DISSIPACÃO B ( $L_{BD} = 88$  m - padrão USBR)



(a) Ensaio 3 - pilares retos



(b) Ensaio 4 - pilares alargados

FIGURA 4.7 – ESCOAMENTO AO LONGO DO MODELO DA BACIA DE DISSIPACÃO C  
( $L_{BD} = 74$  m - 16% menor)



(a) Ensaio 5 - pilares retos



(b) Ensaio 6 - pilares alargados



FIGURA 4.8 – ESCOAMENTO AO LONGO DO MODELO - JUSANTE DA BACIA DE DISSIPACÃO C ( $L_{BD} = 74$  m - 16% menor)



(a) Ensaio 5 - pilares retos



(b) Ensaio 6 - pilares alargados

FIGURA 4.9 – ESCOAMENTO AO LONGO DO MODELO DA BACIA DE DISSIPÇÃO D  
( $L_{BD} = 54$  m - 39% menor)



(a) Ensaio 7 - pilares retos



(b) Ensaio 8 - pilares alargados



FIGURA 4.10 – ESCOAMENTO AO LONGO DO MODELO - JUSANTE DA BACIA DE DISSIPAÇÃO D ( $L_{BD} = 54$  m - 39% menor)



(a) Ensaio 7 - pilares retos



(b) Ensaio 8 - pilares alargados

## 4.2 LEVANTAMENTO ALTIMÉTRICO DO FUNDO MÓVEL

Esta seção apresenta os resultados obtidos pelo levantamento altimétrico do fundo móvel do modelo após cada ensaio. O levantamento foi realizado com o Scanner 3D. A FIGURA 4.11 apresenta o resultado do escaneamento da superfície do fundo móvel antes dos ensaios.

A TABELA 4.1 apresenta, em resumo, os volumes de erosão, as máximas profundidades da fossa de erosão e a elevação de material depositado em forma de barra observados ao final de cada ensaio em medidas de protótipo.

FIGURA 4.11 – RESULTADO DO SCANNER ANTES DOS ENSAIOS - SUPERFÍCIE INICIAL

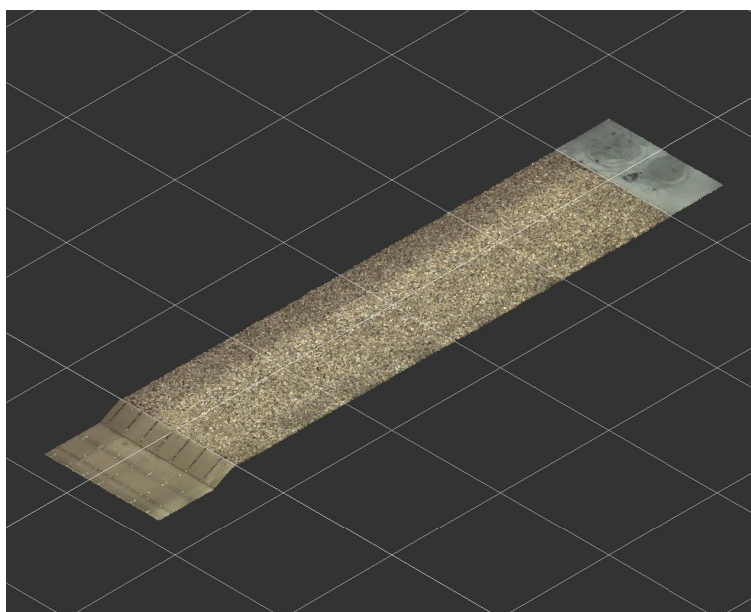


TABELA 4.1 – RESULTADOS DE VOLUMES DE EROSIÃO DE MATERIAL MÓVEL APÓS OS ENSAIOS

Ensaio	Bacia de dissipação	Pilares	Profundidade de erosão $d_s$ (m)	Altura da barra (m)	Volume erodido (m <sup>3</sup> )	Observação
1	A	Retos	3,5	5,2	3.100	bacia
2	A	Alargados	1,1	1,5	340	23% maior
3	B	Retos	4,3	5,6	3.900	bacia
4	B	Alargados	2,3	4,3	490	padrão USBR
5	C	Retos	4,9	5,4	6.100	bacia
6	C	Alargados	3,7	5,3	2.200	16% menor
7	D	Retos	5,5	5,5	7.700	bacia
8	D	Alargados	4,5	5,3	3.800	39% menor

Obs: unidades em medidas de protótipo.



A seguir, apresenta-se os resultados dos levantamentos altimétricos agrupados por ensaios com mesma bacia de dissipação.

Bacia de dissipação A - Ensaios 1 e 2 ( $L_{BD} = 108$  m - 23% maior):

A FIGURA 4.12 apresenta os resultados dos ensaios com a bacia de dissipação A em forma de curva-de-nível do material móvel. Nota-se que ocorreu erosão com formação de barra de material, porém com menores intensidades no ensaio com pilares alargados. No ensaio com pilares retos, a erosão caracterizou-se por uma fossa única centralizada no canal e a barra de depósito de material com avanço mais acentuado nas laterais do canal. No ensaio com pilares alargados a erosão caracterizou-se por uma fossa e barra única com leve tendência à formação junto à lateral esquerda do canal e de menores intensidades que as observadas no ensaio com pilares retos.

A maior profundidade de erosão no ensaio com pilares retos foi de 3,5 m, isto é, 2,4 m maior que no ensaio com pilares alargados ( $d_s = 1,1$  m). O maior depósito de material móvel em forma barra (bacia A) foi observado no ensaio com pilares retos, igual a 5,2 m, ao passo que no ensaio com pilares alargados, a barra atingiu apenas 1,5 m acima da superfície inicial.

O volume de material erodido no ensaio com pilares retos foi de 3.100 m<sup>3</sup>. Com pilares alargados o volume observado foi de apenas 340 m<sup>3</sup>, cerca de 10 % do ensaio 1. Estes ensaios foram executados com a bacia de dissipação A, a qual é 20,0 m maior em comprimento que a bacia B, dimensionada pelo método do Bureau of Reclamation (1998). Nesse contexto, nota-se diminuição de volumes em ambos ensaios comparados à bacia de referência (bacia B).

Bacia de dissipação B - Ensaios 3 e 4 ( $L_{BD} = 88$  m - padrão USBR):

Estes ensaios foram executados com a bacia B, a qual foi dimensionada pelo método do Bureau of Reclamation (1998), considerada como bacia de referência.

Nestes ensaios, ocorreu formação de fossa de erosão e depósito de material em forma de barra, conforme FIGURA 4.13. No ensaio com pilares retos (ensaio 3), a configuração final da erosão foi semelhante à observada no ensaio 1 (mesma configuração dos pilares). No ensaio 4 (pilares alargados), a erosão caracterizou-se por duas fossas junto ao *end sill* e uma única barra na região central do canal.

No ensaio 3, com pilares retos, a maior erosão registrada foi de 4,3 m e a maior elevação da barra foi de 5,6 m. No ensaio 4 foi registrada menor fossa de erosão 2,3 m e menor altura da barra 4,3 m.

Os volumes de materiais erodidos foram maiores em comparação com os ensaios com a bacia A, explicado pela redução de 20 m de comprimento da bacia B (de 108 m para 88 m). No ensaio com pilares retos, o volume de erosão foi de 3.900 m<sup>3</sup>,

contra 3.100 m<sup>3</sup> do ensaio 1 (bacia A). O ensaio com pilares alargados apresentou uma redução no volume erodido em comparação com o ensaio com pilares retos, de 3.410 m<sup>3</sup> (ver TABELA 4.1).

Bacia de dissipação C - Ensaio 5 e 6 ( $L_{BD} = 74$  m - 16% menor):

A bacia de dissipação C é 14 m menor, em comprimento, que a bacia B (bacia de referência). Com isso, as erosões resultantes destes ensaios foram semelhantes às observadas nos ensaios com a bacia B, porém com maiores intensidades.

Com pilares retos, a erosão caracterizou-se por única fossa de erosão centralizada no canal e barra com avanço de material mais acentuado junto às paredes do canal (ensaio 5). No ensaio com pilares alargados (ensaio 6), observou-se formação de duas fossas de erosão nas laterais do canal e uma única barra centralizada no eixo do canal, conforme FIGURA 4.14.

Conforme TABELA 4.1, a maior erosão no ensaio com pilares retos foi de 4,9 m e de 3,7 m no ensaio com pilares alargados, ou seja, 1,2 m menor com pilares alargados. Com relação à barra de material depositado, ambos os ensaios apresentaram valores semelhantes, 5,4 m no ensaio com pilares retos e 5,3 m com pilares alargados.

Nestes ensaios, os volumes de materiais erodidos resultaram maiores que nos ensaios com a bacia B. Observou-se aumento de aproximadamente 56 % no ensaio com pilares retos (6.100 m<sup>3</sup> contra 3.900 m<sup>3</sup> do ensaio 3) e aumento de 3,5 vezes no ensaio com pilares alargados (2.200 m<sup>3</sup> contra 490 m<sup>3</sup> do ensaio 4). Mesmo com este aumento no volume, o ensaio com pilares alargados e bacia C apresentou menores volumes e profundidades de erosões em comparação com o ensaio de pilares retos e bacia B, ou seja, mesmo com diminuição do comprimento da bacia de dissipação (14 m), os resultados são melhores quando se associa o vertedouro com pilares alargados.

Bacia de dissipação D - Ensaio 7 e 8 ( $L_{BD} = 54$  m - 39% menor):

Estes ensaios foram realizados com a bacia de dissipação D, a menor bacia em comprimento para esta série de ensaios. Possui comprimento de  $L_{BD} = 54$  m (34 m menor que a bacia B). Por possuir menor área revestida, os resultados destes ensaios apresentaram a maiores erosões em comparação com as demais bacias.

As curvas de nível da FIGURA 4.15 apresentam o resultado do levantamento topográfico ao final destes dois ensaios. Nota-se que o formato final da erosão foi semelhante ao formato dos ensaios com bacia B e C: no ensaio com pilares retos, uma fossa de erosão centralizada ao eixo do canal e barra de material erodido com depósito mais acentuado às margens do canal; no ensaio com pilares alargados, duas fossas de erosão e barra alinhada com o eixo do canal.

As máximas profundidades de erosão nestes ensaios foram de 5,5 m com pila-

res retos e de 4,5 m com pilares alargados. A maior elevação da barra de material foi de 5,5 m no ensaio com pilares retos e de 5,3 m no ensaio com pilares alargados. O resultado do volume de erosão do ensaio com pilares retos foi 7.700 m<sup>3</sup>, aproximadamente 50 % maior que o resultado do ensaio com pilares alargados, 3.800 m<sup>3</sup>.

FIGURA 4.12 – CURVA DE NÍVEL BACIA A - EROÇÃO APÓS 20 HORAS PROTÓTIPO - COMPARAÇÃO ENTRE PILARES RETOS E ALARGADOS

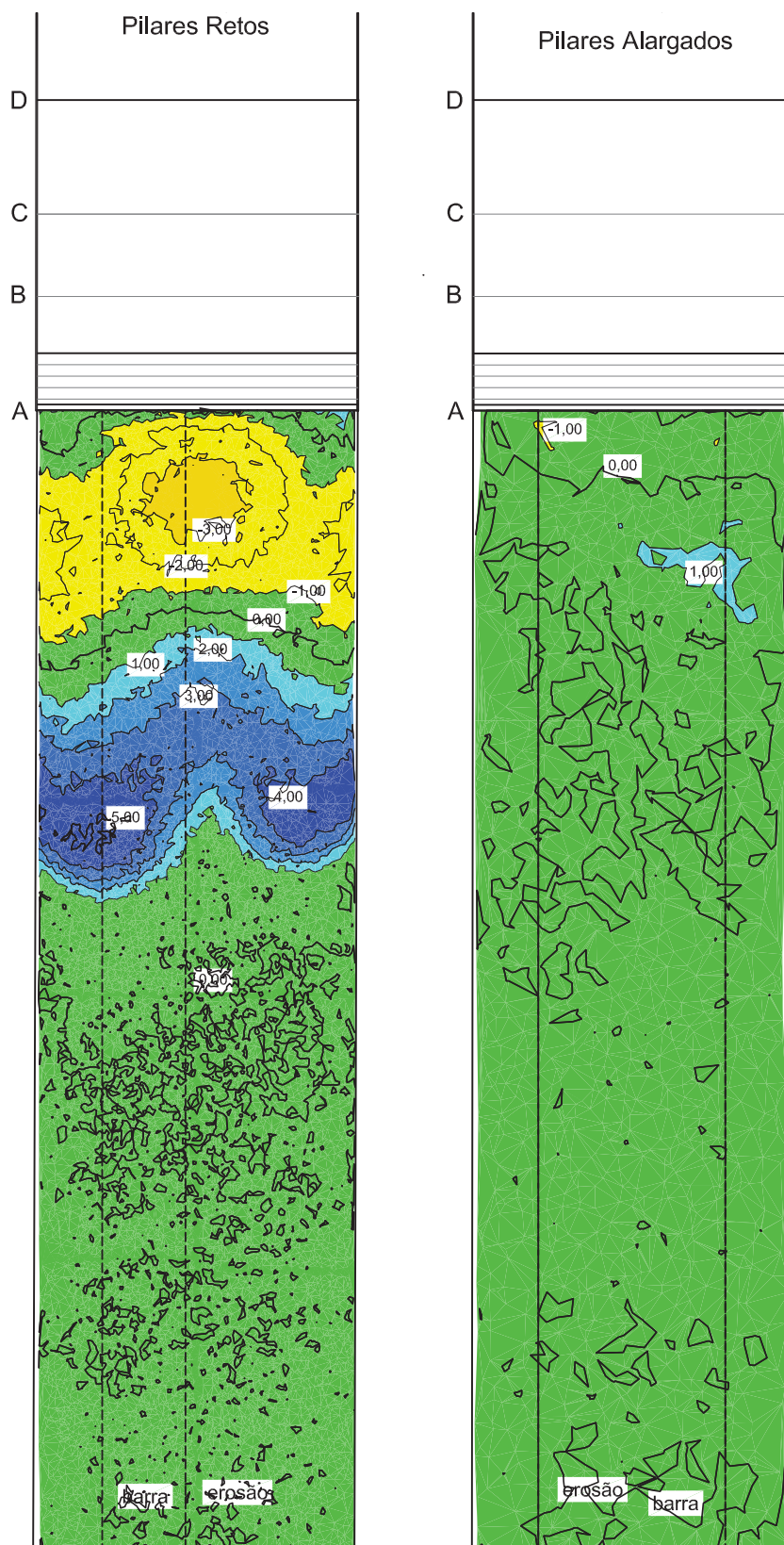


FIGURA 4.13 – CURVA DE NÍVEL BACIA B - COMPARAÇÃO ENTRE PILARES RETOS E ALARGADOS - PROTÓTIPO

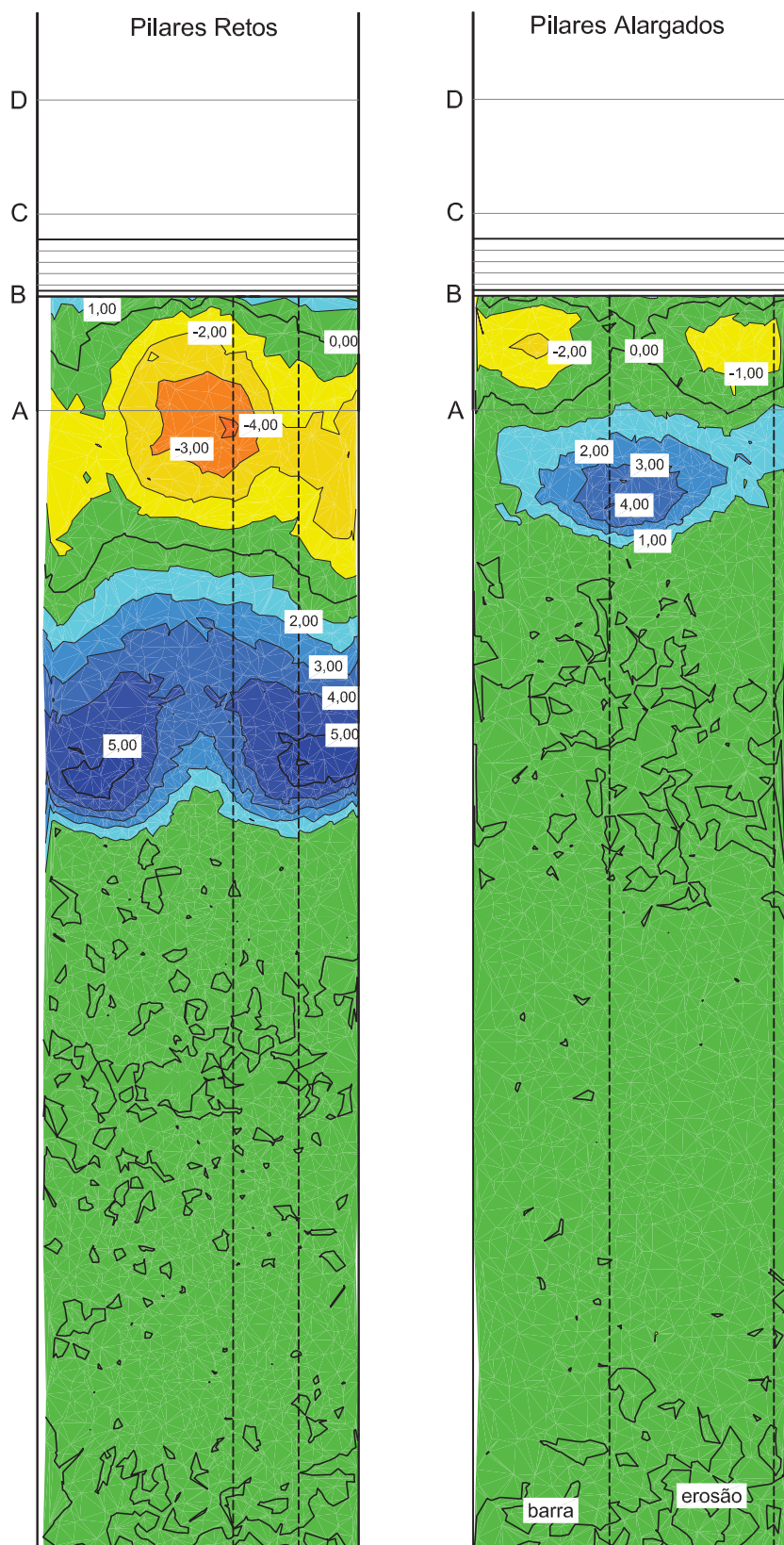




FIGURA 4.14 – CURVA DE NÍVEL BACIA C - COMPARAÇÃO ENTRE PILARES RETOS E ALARGADOS - PROTÓTIPO

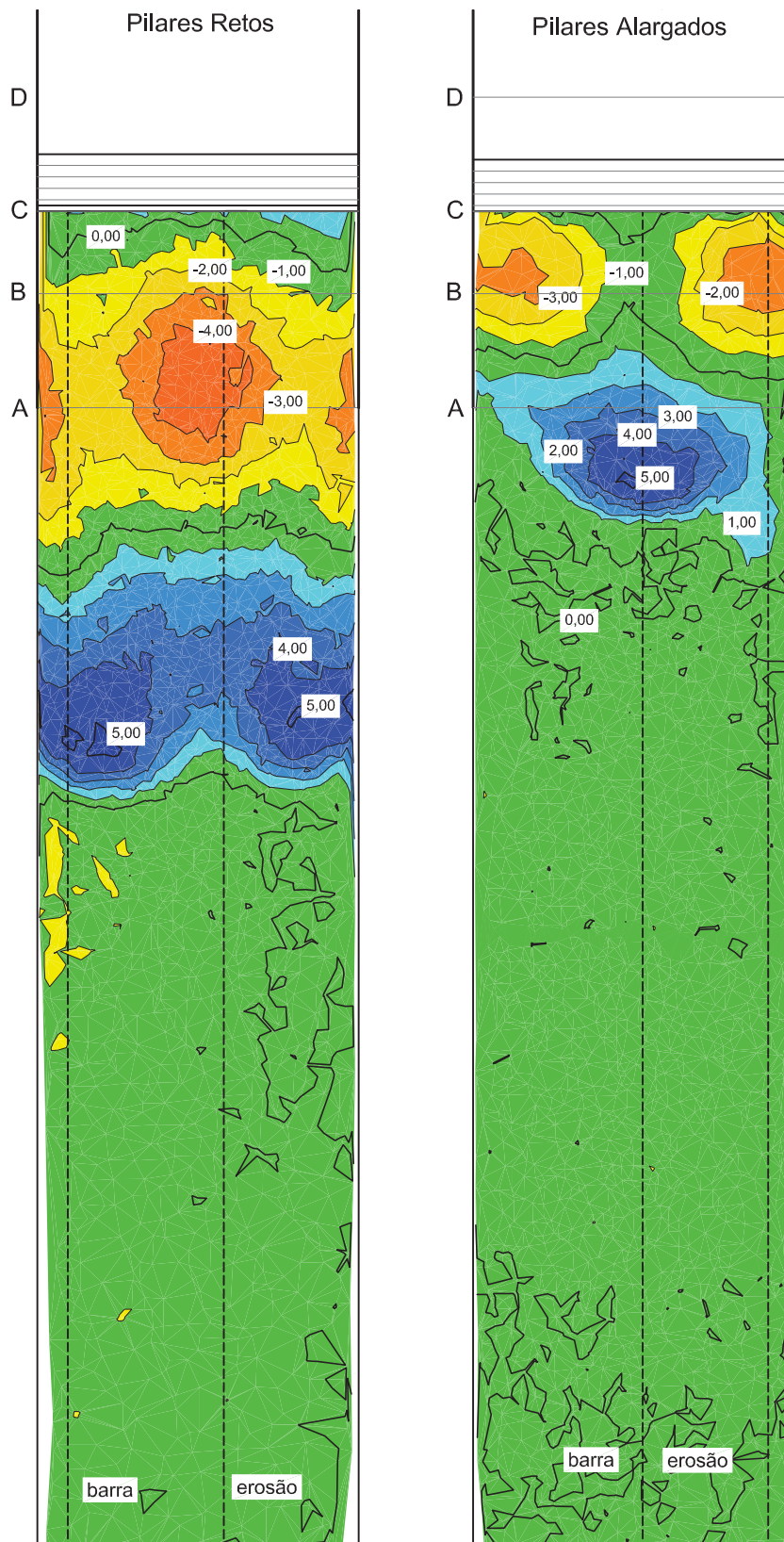
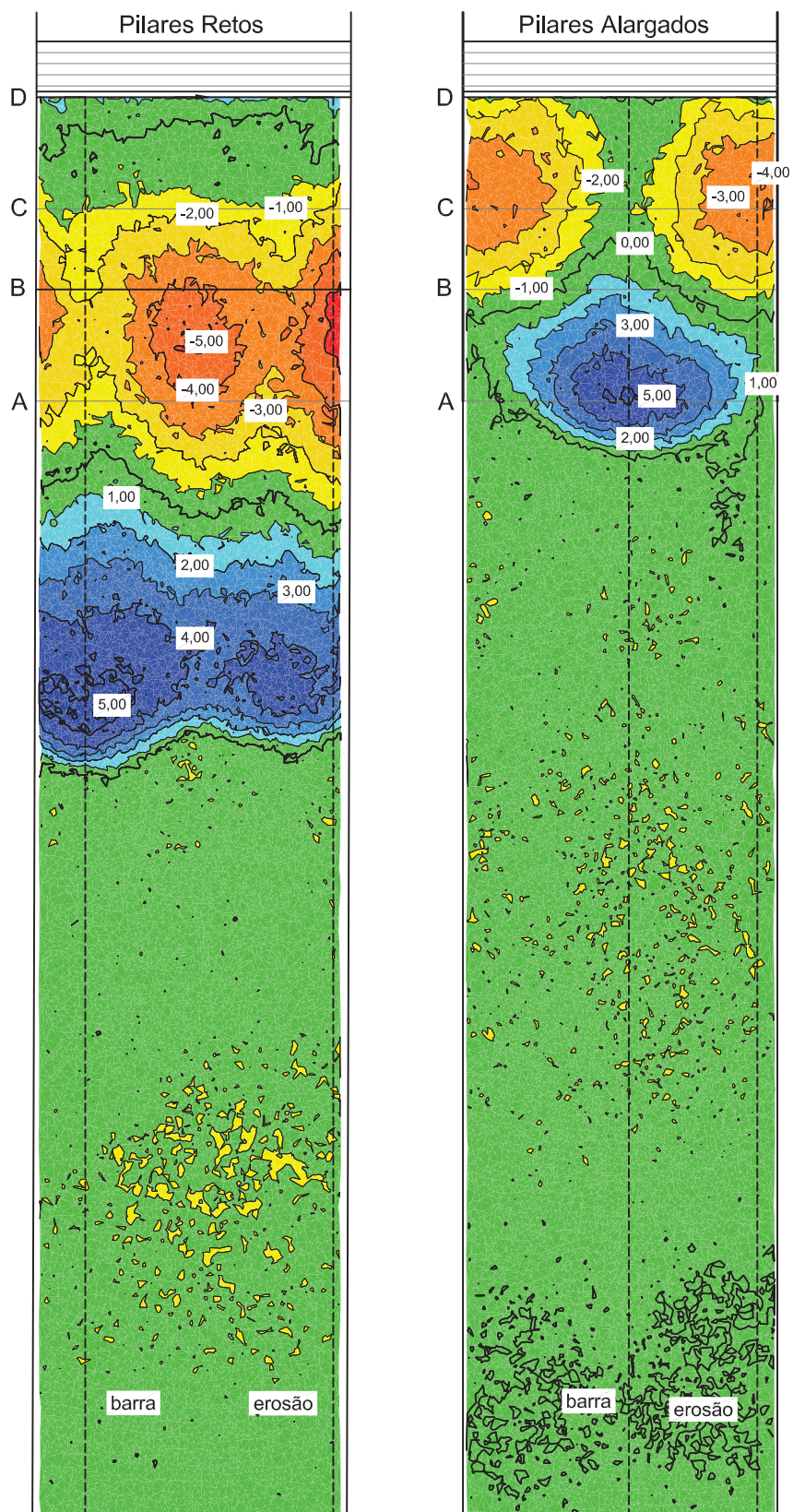




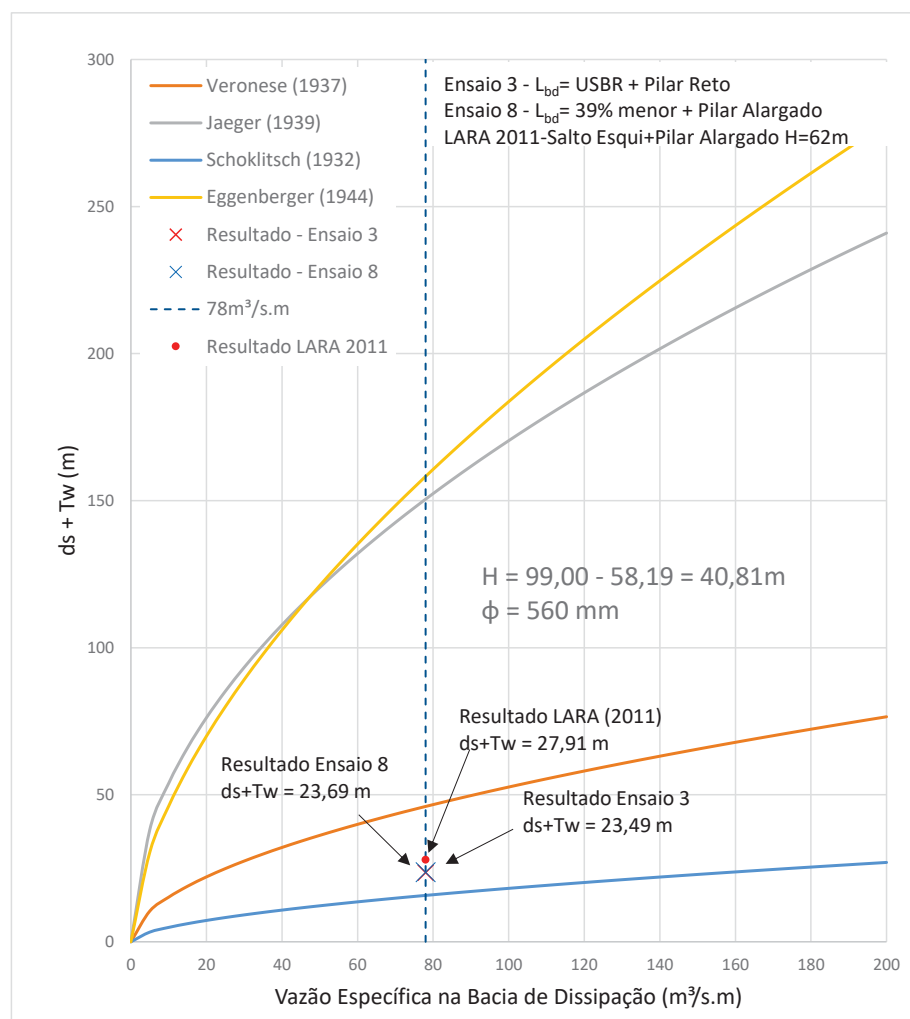
FIGURA 4.15 – CURVA DE NÍVEL BACIA D - COMPARAÇÃO ENTRE PILARES RETOS E ALARGADOS - PROTÓTIPO



### 4.3 ANÁLISE DAS PROFUNDIDADES DE EROSÕES

A partir dos resultados de máximas profundidades de erosões ( $d_s$ ) apresentados na TABELA 4.1, e a partir das Eqs. 2.3 a 2.6, desenvolveu-se o gráfico da FIGURA 4.16.

FIGURA 4.16 – PROFUNDIDADES DE EROSÕES - RESUMO



No gráfico da FIGURA 4.16, o eixo das abcissas representa a vazão específica na bacia de dissipação ( $q$ ) e o eixo das ordenas a máxima profundidade de erosão somada ao nível de escoamento de jusante ( $d_s + T_w$ ). As linhas contínuas, apresentam as equações de Veronese (1937), Jaeger (1939), Schoklitsch (1932) e Eggenberger (1944) com carga  $H = 40,81 \text{ m}$ , diâmetro do material igual a  $\phi = 560 \text{ mm}$ . A linha tracejada vertical representa a faixa de vazão específica na bacia de dissipação nos ensaios ( $q = 78 \text{ m}^3/s.m$ ).

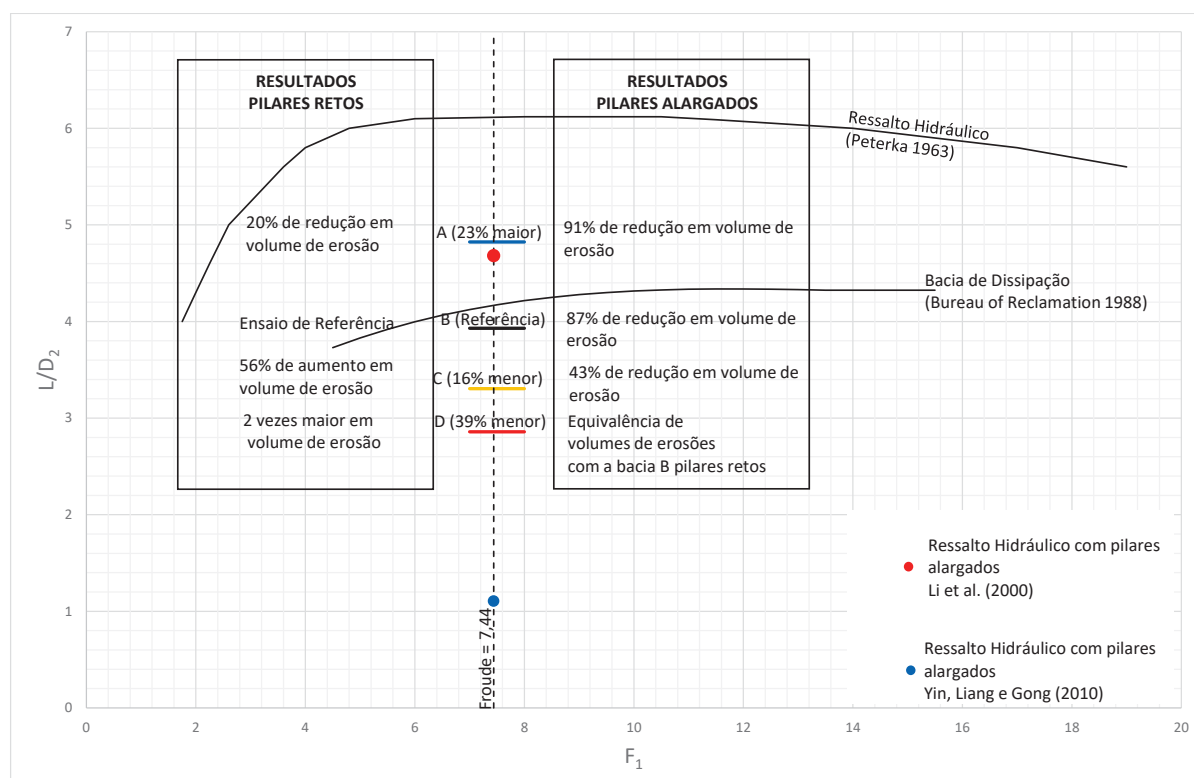
O ensaio 3, o qual foi realizado com pilares retos e bacia de dissipação com comprimento padrão Bureau of Reclamation (1998), apresentou máxima profundidade erosão de  $d_s = 4,3 \text{ m}$  e nível de jusante igual a  $T_w = 19,19 \text{ m}$  (nível de jusante acima da elevação inicial do fundo, EL. 39,00 m). O ensaio 8, com pilares alargados e bacia

de dissipação 39% menor, apresentou equivalência de profundidade de erosão com o ensaio 3, resultando em  $d_s = 4,5$  m com mesmo nível de jusante,  $T_w = 19,19$  m. Para fins de comparação, plotou-se nesse gráfico o resultado obtido nos estudos de Lara (2011), o qual resultou maior que os obtidos nessa dissertação,  $d_s + T_w = 27,91$  m, porém, este resultado foi obtido com ensaios em modelo reduzido de vertedouro de salto esqui (Usina Hidrelétrica de Mauá) e carga  $H = 62$  m.

#### 4.4 ANÁLISE DO COMPRIMENTO DA BACIA DE DISSIPACÃO E RESSALTO HIDRÁULICO

Baseando-se no estudo de Peterka (1963), elaborou-se um gráfico para análise dos comprimentos das bacias e resultados de erosão, que é apresentado na FIGURA 4.17. No eixo das abcissas está apresentado o número de Froude na seção a montante do ressalto hidráulico ( $F_1$ ) e o eixo das ordenadas os comprimentos ( $L$ ) em função da profundidade conjugada de jusante ( $D_2$ ).

FIGURA 4.17 – ANÁLISE DO COMPRIMENTO DA BACIA DE DISSIPACÃO E DO RESSALTO HIDRÁULICO



Com vistas à FIGURA 4.17, o comprimento do ressalto hidráulico (PETERKA, 1963) e o comprimento da bacia de dissipação (Bureau of Reclamation, 1998) estão apresentados em linhas pretas contínuas, e podem ser tomados como valores consolidados pela bibliografia (FIGURAS 2.3 e 2.4 respectivamente). A linha tracejada

vertical representa a faixa de número de Froude onde foram realizados os oito ensaios ( $F_1 = 7,44$ ). Os segmentos de linha das cores: azul, preto, laranja e vermelho, representam os comprimentos das bacias de dissipação A, B, C e D respectivamente (108 m, 88 m, 74 m e 54 m). Os pontos de cor vermelho e azul representam o comprimento do ressalto hidráulico calculados pelas Eqs. 2.27 e 2.28 respectivamente.

Nota-se que a bacia de referência, bacia B, resultou um pouco menor que o indicado pelo Bureau of Reclamation (1998), isto se deve a limitações construtivas apresentadas no capítulo 3 - Materiais e Métodos. A bacia A, maior bacia ensaiada, ainda é menor que o comprimento do ressalto hidráulico definido por Peterka (1963).

Em relação aos comprimentos de ressalto hidráulico com pilares alargados ( $L'_{RH}$ ), o resultado da Eq. 2.27 (LI et al., 2000) ficou 23% menor e da Eq. 2.28 (YIN; LIANG; GONG, 2010) 80% menor em comparação com o comprimento do ressalto hidráulico ( $L_{RH}$ ) dos estudos de Peterka (1963) apresentando uma diminuição no comprimento do ressalto com a utilização de pilares alargados no vertedouro.

No que diz respeito ao comprimento de bacia de dissipação ( $L_{BD}$ ), a bacia D ( $L_{BD} = 54$  m) com pilares alargados apresentou equivalência, em termos de erosão, com a bacia B ( $L_{BD} = 88$  m) com pilares retos.

#### 4.5 ANÁLISE SOBRE VOLUMES DE CONCRETO PARA A UTILIZAÇÃO DE PILARES ALARGADOS

Partindo-se do princípio de que a bacia de dissipação B é a bacia dimensionada pelo método consagrado do Bureau of Reclamation (1998) e considerada, para fins de erosão, como a bacia de referência, apresenta-se nesta seção uma análise da relação entre os volumes de concreto dos pilares alargados e volumes de concreto das bacias de dissipação.

A TABELA 4.2 apresenta os volumes de concreto dos alargamentos dos pilares, volumes de cada módulo de bacia de dissipação e o volume líquido de concreto. Para o cálculo do volume dos pilares alargados, considerou-se apenas os alargamentos dos pilares. No cálculo do volume do módulo da bacia, considerou-se cada módulo de bacia com 1 m de profundidade e com muros laterais da bacia com altura igual a 23,19 m (curva-chave de jusante) e largura de 1 m. O volume líquido é a diferença entre os volumes dos pilares alargados e bacia de dissipação.

TABELA 4.2 – VOLUMES DE CONCRETO DOS PILARES ALARGADOS E BACIA DE DISSIPACÃO

Ensaio	Bacia de dissipação	Pilar	Volume pilares alargados (m <sup>3</sup> )	Volume da bacia (m <sup>3</sup> )	Volume líquido (m <sup>3</sup> )	Obs.
1	A	Retos	0	+2.430	+2.430	bacia
2	A	Alargados	+1.370	+2.430	+3.800	23% maior
3	B	Retos	0	0	0	bacia
4	B	Alargados	+1.370	0	+1.370	padrão USBR
5	C	Retos	0	-1.760	-1.760	bacia
6	C	Alargados	+1.370	-1.760	-390	16% menor
7	D	Retos	0	-4.190	-4.190	bacia
8	D	Alargados	+1.370	-4.190	-2.820	39% menor

Obs: unidades em medidas de protótipo.

Nota-se que na bacia C, mesmo adicionando os pilares alargados com o acréscimo em volume de concreto de 1.370 m<sup>3</sup>, economiza-se 390 m<sup>3</sup> de concreto com a redução da bacia B para C (1.760 m<sup>3</sup>). Na bacia D, a economia é ainda maior, 2.820 m<sup>3</sup> mesmo com o acréscimo no volume de concreto pela adição dos alargamentos dos pilares.



## 5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Este trabalho estuda a eficiência de uma nova tecnologia que propicia uma melhor dissipação de energia em vertedouros dotados de bacias de tranquilização do escoamento (*stilling basins*) ou bacia de dissipação como é conhecida no Brasil. Trata-se de uma modificação dos pilares, alargando os mesmos para provocar um estreitamento relativamente abrupto ao escoamento. Esses pilares modificados recebem o nome de "*flaring piers*" e são utilizados em obras recentes da China. Estudou-se, portanto, os efeitos combinados dos pilares alargados e bacias de dissipação.

As bacias de dissipação operam com ressalto hidráulico em seu interior e o seu comprimento é normalmente projetado com o critério de dimensionamento do *Bureau of Reclamation*. No entanto, a modificação dos pilares transforma o padrão do escoamento e afeta o ressalto hidráulico introduzindo uma dissipação extra, o que a literatura técnica chinesa chama de "*3D hydraulic jump*" isto é, transforma o ressalto hidráulico de características bidimensionais em escoamento com aspectos altamente tridimensionais, diminuindo assim efeitos erosivos. Assim, este trabalho estuda a possibilidade de encurtar a bacia de dissipação em relação à bacia padrão *Bureau of Reclamation*, verificando como os pilares alargados podem contribuir na diminuição da profundidade de erosão e volume de material erodido.

Escolheu-se um vertedouro com a vazão específica nos vãos entre pilares de  $99 \text{ m}^3/\text{s.m}$  ( $280 \text{ L/s.m}$  na modelo na escala de 1:50) e o número de Froude do escoamento torrencial no início da bacia de  $F_1 = 7,44$  (faixa de bons ressaltos segundo Peterka (1963)). Foram reproduzidas três passagens (três comportas) com pilares cuja razão de contração é igual a  $\eta = 0,5$  e a seção de escoamento em forma da letra Y. A bacia de dissipação cujo comprimento foi definido pelo critério do *Bureau of Reclamation* é de 88 m (bacia B) para pilares retos convencionais e foi encurtada em 17% (bacia C) e 39% (bacia D) para verificação de sua eficiência.

Este trabalho utilizou ensaios em modelo hidráulico reduzido com fundo móvel para avaliar erosões a jusante de vertedouros com pilares alargados com bacia de dissipação. O estudo partiu da hipótese de que adicionar pilares alargados, em vertedouros com bacia de dissipação, pode-se diminuir as profundidades e volumes de erosões. Para essa avaliação, realizaram-se oito ensaios, com vertedouro de pilares retos e de pilares alargados (*flaring piers*) com quatro comprimentos de bacias (108 m, 88 m, 74 m e 54 m). A seguir, apresenta-se as conclusões e recomendações acerca dos resultados deste estudo.

Nos ensaios com o vertedouro de pilares retos, o escoamento se propagou em



regime supercrítico formando um ressalto hidráulico clássico na bacia de dissipação. No vertedouro com pilares alargados, parte do escoamento sofre um salto na região do estrangulamento da livre passagem. O escoamento oriundo do salto dos pilares adjacentes, chocam-se formando um rabo-de-galo e incorporando ar ao escoamento. Este efeito, somado com a parcela do fluxo que escoou junto ao vertedouro, altera o ressalto hidráulico na bacia de dissipação. Este é intitulado pela bibliografia como ressalto hidráulico 3D ("*3D hydraulic jump*").

Nos ensaios realizados, este ressalto hidráulico apresentou menores comprimentos do rolo superficial em comparação com o ressalto proveniente dos pilares retos. Visualmente, o ressalto hidráulico, nos ensaios com pilares alargados, apresentou menores velocidades de escoamento junto ao fundo da bacia de dissipação na região do *end sill*, comparado aos ensaios com pilares retos. Com isso, notou-se que durante os ensaios com pilares retos, o escoamento foi capaz de arrastar material móvel e colocá-los em suspensão no escoamento. Este efeito não foi observado nos ensaios com pilares alargados (não houve transporte em suspensão).

De maneira geral, os ensaios com vertedouro de pilares alargados apresentaram menores profundidades de erosões e menores volumes de material erodido, comparado aos ensaios com pilares retos (TABELA 4.1). As maiores erosões foram observadas nos ensaios com a bacia de dissipação D ( $L_{BD} = 54$  m) correspondente aos ensaios 7 e 8, com pilares retos (ensaio 7), a maior profundidade de erosão foi de 5,5 m e o maior volume erodido foi de 7.700 m<sup>3</sup>, e com pilares alargados (ensaio 8), foi de 4,5 m e 3.800 m<sup>3</sup> respectivamente. As maiores elevações da barra de material depositado também foram observadas nos ensaios com bacia D, porém foram semelhantes entre os pilares retos e pilares alargados, 5,5 m e 5,3 m respectivamente.

Partindo-se do princípio, de que a bacia de dissipação B ( $L_{BD} = 88$  m) é a bacia de referência, uma vez que seu comprimento foi dimensionado por um método consolidado (Bureau of Reclamation, 1998), em termos de erosão (profundidades e volumes), o vertedouro de pilares alargados e bacia de dissipação D ( $L_{BD} = 54$  m) apresentou equivalência em desempenho com o vertedouro de pilares retos utilizando a bacia de referência. Com isso, baseado nas condições ensaiadas, pode-se concluir que: ao adicionar pilares alargados em um vertedouro com bacia de dissipação, pode-se reduzir o comprimento da bacia em 34 m, garantindo a equivalência no potencial erosivo do escoamento com a bacia de referência. Esta redução no comprimento da bacia, de 88 m para 54 m implicaria uma economia de 2.820 m<sup>3</sup> de concreto mesmo com a adição de pilares alargados (ver TABELA 4.2).

Como sugestão para próximos trabalhos, pode-se aumentar o poder erosivo do escoamento, pois mesmo com a menor bacia de dissipação, as profundidades de erosão máximas registradas foram de 5,5 m (ensaio 7 - pilares retos e bacia D). Esta

erosão não implicaria em grandes problemas para a estrutura do vertedouro e bacia de dissipação. Nesse sentido, sugere-se aumentar o poder erosivo do escoamento mediante a ensaios com maiores vazões ou menores níveis de jusante (abaixo da conjugada de jusante).

Sugere-se também avaliar outras geometrias de pilares alargados, obtendo uma sensibilidade para valores de taxa de contração, ângulo de contração e posição do início do alargamento dos pilares.

Ainda neste contexto, sugere-se avaliar o impacto na capacidade de descarga do vertedouro pela adição dos pilares alargados, uma vez que o estrangulamento pode aumentar as pressões ao longo da calha e dos pilares.

## REFERÊNCIAS

- ANKANG downstream. Disponível em: <[https://dimg05.c-ctrip.com/images/100r070000002lovz9EB3{\\\_}R{\\\_}1000{\\\_}1000](https://dimg05.c-ctrip.com/images/100r070000002lovz9EB3{\_}R{\_}1000{\_}1000)>. Citado na página 41.
- BBS. **panjiakou**. 2017. Disponível em: <<http://attach.bbs.china.com.cn/forum/201306/02/085024ww86pu8lculj6870.jpg>>. Citado na página 36.
- Bureau of Reclamation. **Design of Small Dams**. [S.l.: s.n.], 1998. 2580–2585 p. Citado 9 vezes nas páginas 25, 26, 54, 68, 80, 87, 88, 89 e 92.
- CARVALHO, R. R. de. **Erosão a Jusante de Bacias de Dissipação por Ressalto Hidráulico de Vertedouros: Aplicação de Modelagem Computacional**. 137 p. Tese (Doutorado) — UFPR, 2017. Citado 2 vezes nas páginas 58 e 63.
- CBDB, B. C. o. D. **Large Brazilian Spillways**. [S.l.: s.n.], 2002. 205 p. Citado na página 51.
- CHEN, D.; WANG, S.; HAN, J. Experimental Research on the Length of 3D Hydraulic Jump in Joint Energy Dissipator. In: **Advances in Water Resources and Hydraulic Engineering: Proceedings of 16th IAHR-APD Congress and 3rd Symposium of IAHR-ISHS**. [S.l.: s.n.], 2009. v. 6, p. 2037–. Citado 2 vezes nas páginas 41 e 42.
- CHEN, S.-H. **Hydraulic Structures**. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2015. v. 2. 342 p. Disponível em: <<http://link.springer.com/10.1007/978-3-662-47331-31>>. Citado na página 42.
- CRUZ, S. T. **Avaliação do Escoamento com Superfície Livre a Jusante de Descarregadores de Fundo Providos de Pilares de Seção Variável - Estudo em Modelo Hidráulico Reduzido**. 79 p. Tese (Trabalho de Conclusão de Curso) — UP, 2016. Citado na página 18.
- DAI, S.-b. et al. Method of Calculating the Hydraulic Jump Equation of X-shape Flaring Gate Pier. **Journal of Yangtze River Scientific Research Institute**, v. 32, n. 10, p. 47–52, 2015. Citado na página 39.
- DARGAHI, B. Scour development downstream of a spillway. **Journal of Hydraulic Research - IAHR**, v. 41, n. 4, p. 417–426, 2003. Citado 2 vezes nas páginas 31 e 32.
- EGGENBERGER, W. **Die Kolkbildung beim einen Überströmen und beider Kombination Überströmen- Unterströmen**. Tese (Doutorado) — ETH Zurich, 1944. Citado 2 vezes nas páginas 28 e 87.
- ELEVATORSKI, E. A. **Hydraulic Energy Dissipators**. [S.l.]: McGraw-Hill, 1959. Citado na página 24.
- FARHOUDI, J.; SMITH, K. V. H. Local scour profiles downstream of hydraulic jump. **Journal of Hydraulic Research - IAHR**, v. 23, n. 4, p. 343–358, 1985. ISSN 0022-1686. Citado 4 vezes nas páginas 28, 29, 30 e 31.

FONTANELLI, C. **Utilização de Pilares de Vertedouros com Seção Variável para Redução de Processos Erosivos a Jusante de Estruturas Hidráulicas**. 224 p. Tese (Dissertação de Mestrado) — UFPR, 2017. Citado 6 vezes nas páginas 18, 46, 50, 58, 60 e 63.

GSHZX. **suofengying operation**. 2017. Disponível em: <<http://www.gshzx.com/uploads/allimg/170423/8-1F423154Z1.jpg>>. Citado na página 40.

Guiyang Engeneering Corporation Limited. **Superioridade Técnica**. 2016. Disponível em: <[http://www.ghidri.com.cn/site/results/3/list{\\\_}1.>](http://www.ghidri.com.cn/site/results/3/list{\_}1.>) Citado na página 40.

GUO, J. et al. Recent achievements on the hydraulic research in IWHR. In: **Recent Developments on Hydraulic Structures - IAHR**. [S.l.: s.n.], 2006. p. 15. ISBN 9801221771. Citado na página 35.

GX. **yantan dam**. 2017. Disponível em: <<http://www.gx12301.net/images/upload/img/20120727113811i4759.jpg>>. Citado na página 37.

HAGER, W. H. **Energy Dissipators and Hydraulic Jump**. Dordrecht: Springer Netherlands, 1992. v. 8. 645 p. (Water Science and Technology Library, September 1981). ISSN 1098-6596. ISBN 978-90-481-4106-7. Disponível em: <<http://www.springer.com/earth+sciences+and+geography/hydrogeology/book/978-1-4020-0866-5http://link.springer.com/10.1007/978-94-015-8048-9>>. Citado 2 vezes nas páginas 26 e 27.

HOU, X. X.; YANG, J. R.; ZHENG, J. S. The Numerical Simulation for Effects of Y-Shape Flaring Gate Pier Body Type on Aerated Cavity Length and Negative Pressure of Steps. **Applied Mechanics and Materials**, v. 488-489, p. 847–853, 2014. ISSN 1662-7482. Disponível em: <<http://www.scientific.net/AMM.488-489.847>>. Citado na página 35.

JAEGER, C. ÜberdieAhnlichkeitbeiflussbaulichen Modellversuchen. **Wasserwirtschaft und Wassertechnik**, v. 34, n. 32/27, p. 269, 1939. Citado 2 vezes nas páginas 28 e 87.

LARA, R. et al. Estudo da Eficiência Hidráulica de Dissipadores de Energia tipo Flaring Piers. **VI CITENEL (ANEEL) - Artigo projeto P&D ANEEL nº6491-017/2007**, n. Fortaleza CE, 2011. Citado na página 35.

LARA, R. de. **Utilização de Defletores em Fenda e Pilares Alargados para Redução da Erosão Provocada por Vertedouros com Salto de Esqui**. 158 p. Tese (Dissertação de mestrado) — UFPR, 2011. Citado 5 vezes nas páginas 18, 35, 50, 58 e 88.

LI, Z.-s. et al. Hydraulics of Stilling Basin with Flaring Gate Piers. **Advances in Water Science - CHES**, v. 11, n. 1, 2000. Citado 3 vezes nas páginas 42, 48 e 89.

LIN, B. B.; LI, G.; CHEN, H. Hydraulic Research in China. **Journal of hydraulic Engineering - ASCE**, v. 113, n. 1, p. 47–60, 1987. Citado 4 vezes nas páginas 17, 34, 42 e 43.

MARQUES, M. G. **Análise de Macroturbulência em Estruturas de Dissipação de Energia por Meio do Estudo de Variação Instantânea das Propriedades dos Escoamentos** In: \_\_\_\_\_. [S.l.: s.n.], 2004. 3–42 p. Citado na página 23.

- MELVILLE, B. W.; COLEMAN, S. E. **Bridge Scour**. Highlands Ranch, 2000. ISBN 1887201181. Disponível em: <<http://trove.nla.gov.au/work/33270845>>. Citado na página 27.
- MO, Z.-y. et al. Relationship of Location of Flaring Gate Piers, Froude Number at Section of Starting Flare and Weir Head. **Journal of Sichuan University**, v. 39, n. 4, p. 26–30, 2007. Citado 4 vezes nas páginas 44, 45, 46 e 60.
- NI, H.-g. Simplified Calculation Method Stilling Basin with Flaring Gate Pier. **Journal of hydraulic Engineering**, n. 6, p. 19–25, 1998. Citado 3 vezes nas páginas 46, 47 e 48.
- NOVAK, P. et al. **Hydraulic Structures**. Third edit. [S.l.: s.n.], 2001. Citado 2 vezes nas páginas 17 e 20.
- PEREIRA, G. M.; VASCONCELOS, A. A. de; CAVALCANTI, A. J. C. T. Tratamento Do Descarregador De Fundo Da Uhe Sobradinho. **XXX Seminário Nacional de Grandes Barragens**, p. 1–14, 2015. Citado na página 17.
- PETERKA, A. J. **Hydraulic Design of Stilling Basin and Energy Dissipators**. [S.l.: s.n.], 1963. Citado 7 vezes nas páginas 21, 22, 23, 26, 88, 89 e 91.
- PINTO, N. L. d. S. **Notas de Aula de Hidráulica Aplicada do Curso de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental - UFPR**. [S.l.: s.n.], 1987. Citado 3 vezes nas páginas 25, 28 e 54.
- RAJARATNAM, N. Hydraulic Jumps. In: CHOW, V. T. (Ed.). **Advances in Hydrosience**. [S.l.]: Academic Press Inc., 1967. v. 4, cap. 4, p. 197–280. ISBN 9780123815149. Citado 2 vezes nas páginas 23 e 27.
- RODRIGUES, L. J. P.; PEREIRA, G. M. Erosões a Jusante de Estruturas Hidráulicas Notas Sobre o Desempenho de Alguns Vertedores da Companhia Energética de São Paulo. **XIX Seminário Nacional de Grandes Barragens**, p. 203–214, 1991. Citado na página 18.
- SCHOKLITSCH, A. Kolkbildung unter Überfallstrahlen. **Die Wasserwirtschaft**, p. 341, 1932. Citado 2 vezes nas páginas 28 e 87.
- SHIELDS, A. Application of Similarity Principles and Turbulence Research to Bed-Load Movement. **Communications of the Prussian Research Center for Wet Construction and Shipbuilding**, v. 26, n. 5-24, p. 47, 1936. Citado 4 vezes nas páginas 32, 33, 58 e 59.
- SINA. **ankang downstream view**. 2017. Disponível em: <<http://s11.sinaimg.cn/middle/97714a67hbf33e97a6a0a{&}>>>. Citado na página 37.
- SXDAILY. **ankang\_operation**. 2017. Disponível em: <<http://www.sxdaily.com.cn/n/2016/0527/c1207-5888191-5.html>>. Citado na página 38.
- US Army Corps of Engineers. **Hydraulic Design Criteria**. [s.n.], 1977. Disponível em: <<http://www.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/a092237.pdf>>. Citado na página 53.
- US Army Corps of Engineers. **Hydraulic Deseign of Reservoir Outlet Works**. [S.l.: s.n.], 1980. 705–711 p. ISBN 1110345100. Citado 3 vezes nas páginas 25, 26 e 55.



U.S. Department of the Interior. **Scour Hole Development Downstream of High-Head Dams - Susitna Hydroelectric Project**. 1982. Citado na página 17.

VERONESE, A. Erosioni di Fondo a Valle di uno Scarico. **Annal. Lavori Pubbl**, v. 75, n. 91, p. 717–726, 1937. Citado 2 vezes nas páginas 28 e 87.

XIE, S.; WU, Y.; CHEN, W. New Technology and Innovation on Flood Discharge and Energy Dissipation of High Dams in China. **Journal of hydraulic Engineering CHES**, v. 47, n. 3, p. 324–336, 2016. Citado na página 38.

YIN, J.-b.; LIANG, Z.-x.; GONG, H.-l. Experimental study on characteristics of 3D hydraulic jump of flaring gate piers. **Journal of hydraulic Engineering CHES**, v. 41, n. 11, p. 1333–1338, 2010. Citado 3 vezes nas páginas 41, 49 e 89.