

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

**Débora Saccaro Turella**

**CRITÉRIOS DE DIMENSIONAMENTO PARA BACIA DE  
DISSIPACÃO POR RESSALTO HIDRÁULICO TIPO I**

Porto Alegre  
junho 2010

**DÉBORA SACCARO TURELLA**

**CRITÉRIOS DE DIMENSIONAMENTO PARA BACIA DE  
DISSIPACÃO POR RESSALTO HIDRÁULICO TIPO I**

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

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

Porto Alegre  
junho 2010

**DÉBORA SACCARO TURELLA**

**CRITÉRIOS DE DIMENSIONAMENTO PARA BACIA DE  
DISSIPACÃO POR RESSALTO HIDRÁULICO TIPO I**

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

Porto Alegre, 14 de julho de 2010

Prof. Marcelo Giulian Marques  
PhD pelo Département de Génie Civil,  
Université Laval/Québec  
Orientador

Alexandre Augusto Mees Alves  
Mestre em Recursos Hídricos e Saneamento  
Ambiental, UFRGS/Porto Alegre  
Coorientador

Profa. Carin Maria Schmitt  
Coordenadora

**BANCA EXAMINADORA**

**Eng. Maurício Dai Prá**  
Me. pela UFRGS

**Eng. Rafael André Wiest**  
Me. pela UFRGS

**Eng. Alexandre Augusto Mees Alves**  
Me. pela UFRGS

**Prof. Marcelo Giulian Marques**  
PhD pela Université Laval/Québec

Dedico este trabalho à minha família.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço ao Prof. Marcelo Giulian Marques pela orientação, pela motivação e por todos os conhecimentos positivos proporcionados para o meu aprendizado e para a elaboração deste trabalho.

Agradeço ao doutorando Alexandre Augusto Mees Alves, coorientador deste trabalho pela oportunidade de aprendizado, pelo apoio e pela grande contribuição na realização deste trabalho.

Agradeço a professora Carin, coordenadora deste trabalho, por sempre ajudar no correto andamento do mesmo e pela motivação.

Agradeço a todos aqueles que, direta ou indiretamente, colaboraram na execução deste trabalho.

Aprender é a única coisa de que a mente nunca se cansa,  
nunca tem medo e nunca se arrepende.

*Leonardo da Vinci*

## RESUMO

TURELLA, D. S. **Crêterios de dimensionamento para bacia de dissipacão por ressalto hidráulico tipo I**. 2010. 86 f. Trabalho de Diploma o (Gradua o em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

O presente trabalho aborda os critérios de projeto para o dimensionamento de uma bacia de dissipacão por ressalto hidráulico tipo I e apresenta um estudo de caso onde são aplicados estes critérios. Esta estrutura é uma das obras que pode vir a compor o sistema extravasor de uma barragem, que é o dispositivo responsável pela segurança da obra nos períodos de cheias, por onde são descartadas as vazões excedentes. A partir da revisão bibliográfica, foi feita uma análise sobre as obras que compõem este sistema de segurança que são, obrigatoriamente, vertedouro e dissipador de energia, mas dependendo das condi oes topográficas, geológicas, construtivas e de arranjo podem ser necessárias outras estruturas complementares, tais como canal de aproxima o, canal rápido, canal de descarga, entre outros. Na primeira etapa do trabalho são descritas as estruturas que compõem o sistema extravasor e os tipos de dissipadores de energia, que são os dispositivos com a finalidade de dissipar a energia cinética do escoamento vertido e adequá-lo ao curso natural do rio, minimizando os possíveis efeitos erosivos do escoamento que poderiam comprometer a funda o e, conseqüentemente, a segurança da barragem. Na fase seguinte, parte-se para o detalhamento de bacias de dissipacão por ressalto hidráulico, apresentando os modelos existentes mais frequentes classificados de acordo com a *United States Bureau of Reclamation*. Como o dissipador em análise utiliza o ressalto hidráulico, é feita uma descri o deste fenômeno, que ocorre na transi o do regime rápido para o regime lento com elevada intensidade de turbulência e, conseqüentemente, com significativa dissipacão de energia. Nesta etapa são abordadas de forma mais minuciosa as bacias de dissipacão por ressalto hidráulico tipo I. Após a exposi o destas estruturas, são definidos e detalhados os critérios de projeto necessários para um dissipador situado em condi oes climáticas e geológicas similares às do Brasil, sendo por fim apresentado uma análise em um caso hipotético onde são aplicados os conhecimentos apresentados neste trabalho.

Palavras-chave: sistema extravasor; dissipador de energia; bacia de dissipacão; ressalto hidráulico; critérios de projeto.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: diagrama de etapas da pesquisa .....	18
Figura 2: exemplo de sistema extravasor da Usina Hidrelétrica de Itaipu com dissipador de energia em salto de esqui .....	21
Figura 3: exemplo de sistema extravasor da Usina Hidrelétrica de Porto Colômbia com dissipador de energia do tipo bacia de dissipação por ressalto hidráulico tipo I .....	21
Figura 4: (a) vertedouro de soleira delgada; (b) vertedouro de soleira normal (perfil Creager) .....	25
Figura 5: (a) ilustração de um vertedouro com comportas e (b) Barragem Takato Dam, Japão, com operação por comportas.....	26
Figura 6: (a) representação em corte de um vertedouro tulipa e (b) vertedouro da barragem Monticello Dam, na Califórnia.....	28
Figura 7: vertedouro em sifão .....	28
Figura 8: concha de arremesso.....	31
Figura 9: ressalto hidráulico no dissipador tipo concha de arremesso .....	31
Figura 10: dissipador salto de esqui .....	32
Figura 11: vertedouro em degraus .....	33
Figura 12: croqui de bacia de dissipação por ressalto hidráulico .....	33
Figura 13: vertedouro em degraus com bacia de dissipação por ressalto hidráulico .....	34
Figura 14: bacia de dissipação USBR II .....	35
Figura 15: bacia de dissipação USBR III .....	36
Figura 16: efeito da cavitação junto aos blocos anexos na laje de fundo do dissipador de energia da Barragem de Bonneville .....	36
Figura 17: danos causados pela cavitação na laje de fundo do dissipador de energia da Usina Hidrelétrica Porto Colômbia .....	37
Figura 18: bacia de dissipação por ressalto hidráulico tipo I .....	38
Figura 19: ressalto formado a jusante de um vertedouro com comportas .....	39
Figura 20: ressalto hidráulico formado a jusante de uma comporta plana .....	39
Figura 21: identificação das variáveis do ressalto hidráulico .....	40
Figura 22: formas do ressalto hidráulico .....	41
Figura 23: ressalto formado a jusante de vertedouro .....	43
Figura 24: representação esquemática do ressalto hidráulico .....	44
Figura 25: demonstração dos comprimentos do ressalto hidráulico e do rolo .....	45
Figura 26: parâmetros a serem definidos para o dimensionamento de uma bacia de dissipação por ressalto hidráulico tipo I .....	50
Figura 27: parâmetros para definição das características do ressalto hidráulico .....	56

Figura 28: cota de fundo da bacia de dissipação de energia e demonstração da localização limite a jusante para o início do ressalto hidráulico .....	59
Figura 29: relação da curva chave com a curva do ressalto quando o nível de jusante $N_j$ é insuficiente para a altura $y_1$ requerida .....	60
Figura 30: relação da curva chave com a curva do ressalto quando $N_j$ é suficiente para o $y_1$ requerido e demonstração dos ressaltos nas posições possíveis de se formarem .....	60
Figura 31: relação da curva chave com a curva do ressalto quando esta tem comportamento diferente em função da vazão e demonstração dos ressaltos possíveis de serem formados .....	61
Figura 32: relação da curva chave com a curva do ressalto quando esta tem comportamento diferente em função da vazão e demonstração dos ressaltos possíveis de se formarem .....	61
Figura 33: soleira terminal de uma bacia de dissipação por ressalto hidráulico tipo I .....	65
Figura 34: raio de transição entre a laje de fundo e o vertedouro .....	68
Figura 35: curva chave de montante de uma barragem de grande altura do caso hipotético (obtido do estudo hidrológico) .....	70
Figura 36: curva chave de jusante de uma barragem de grande altura do caso hipotético (obtido do estudo hidrológico) .....	70
Figura 37: curva chave de jusante e nível de jusante requerido para a cota fixada inicialmente em 275,00 m .....	72
Figura 38: curva chave de jusante e nível de jusante requerido após rebaixamento do dissipador para a cota de 258,00 m .....	73
Figura 39: croqui de solução a ser adotada no caso hipotético de uma barragem de grande altura .....	75
Figura 40: curva chave de montante de uma barragem de pequena altura do caso hipotético (obtido do estudo hidrológico) .....	76
Figura 41: curva chave de jusante de uma barragem de pequena altura do caso hipotético (obtido do estudo hidrológico) .....	76
Figura 42: curva chave de jusante e nível de jusante requerido para a cota fixada inicialmente em 142,00 m .....	78
Figura 43: curva chave de jusante e nível de jusante requerido requeridas após rebaixamento do dissipador para a cota de 139,80 m .....	79
Figura 44: croqui de solução a ser adotada no caso hipotético de uma barragem de pequena altura .....	81
Figura 45: sugestão de caminho para dimensionamento de bacia de dissipação por ressalto hidráulico tipo I .....	83

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1: equações sugeridas por diversos pesquisadores para determinação do comprimento do rolo $L_r$ .....	46
Quadro 2: equações sugeridas para determinação do comprimento do ressalto hidráulico $L_j$ .....	47
Quadro 3: equações para a determinação do comprimento da influência do ressalto hidráulico $L_n$ .....	48
Quadro 4: classificação de barragens de acordo com a capacidade do reservatório e a altura .....	53
Quadro 5: cheia máxima provável (CMP) para projeto de vertedouros .....	54
Quadro 6: tempo de recorrência para vertedouros de Pequenas Centrais Hidrelétricas ..	54
Quadro 7: valores das cargas a montante para as vazões de projeto .....	71
Quadro 8: cota de fundo calculada e $T_w$ após o rebaixamento do dissipador .....	71
Quadro 9: características do ressalto para estrutura fixada na cota 258,00m .....	72
Quadro 10: comprimentos da bacia ( $L_b$ ) calculados .....	73
Quadro 11: dimensionamento da soleira terminal .....	74
Quadro 12: determinação da cota dos muros laterais .....	74
Quadro 13: raios de transição calculados .....	74
Quadro 14: valores das cargas a montante para as vazões de projeto .....	77
Quadro 15: cota de fundo calculada e $T_w$ após o rebaixamento do dissipador .....	77
Quadro 16: características do ressalto para estrutura fixada na cota 139,80m .....	78
Quadro 17: comprimentos da bacia ( $L_b$ ) calculados .....	79
Quadro 18: dimensionamento da soleira terminal .....	80
Quadro 19: determinação da cota dos muros laterais .....	80
Quadro 20: raios de transição calculados .....	80

## LISTA DE SÍMBOLOS

$v$	Velocidade [L/T]
$g$	aceleração da gravidade [L/T <sup>2</sup> ]
$y_r$	altura conjugada rápida [L]
Fr	número de Froude
Q	vazão [L <sup>3</sup> /T]
A	área da seção transversal [L <sup>2</sup> ]
$y_l$	altura conjugada lenta [L]
$L_r$	comprimento do rolo [L]
Fr <sub>r</sub>	número de Froude no início do ressalto
$L_j$	comprimento do ressalto hidráulico [L]
$H_r$	carga no início do ressalto [L]
$H_l$	carga no final do ressalto [L]
H	carga [L]
y	altura da lâmina d'água [L]
$v_c$	velocidade crítica [L/T]
$L_n$	comprimento da influência do ressalto hidráulico [L]
$L_b$	comprimento da bacia de dissipação [L]
e	espessura da bacia e ancoragem [L]
$C_L$	altura dos muros laterais [L]
R	raio de transição [L]

$Q_{1.000}$	vazão de 1.000 anos de tempo de retorno [ $L^3/T$ ]
$T_w$	<i>tail water</i> , altura da lamina d'água no leito do rio [L]
$Q_p$	cheia de projeto [ $L^3/T$ ]
$Q_{máxmax}$	cheia máxima maximorum [ $L^3/T$ ]
$T_r$	tempo de retorno [T]
$Q_{10.000}$	cheia decamilenar (10.000 anos de tempo de retorno) [ $L^3/T$ ]
$Q_{max}$	cheia máxima [ $L^3/T$ ]
B	largura da bacia de dissipação [L]
$v_a$	velocidade de aproximação [L/T]
$z_r$	cota do ponto onde ocorre o início do ressalto [L]
$H_T$	carga a montante [L]
z	cota da crista do vertedouro [L]
h	altura da lâmina d'água no vertedouro [L]
$C_f$	cota de fundo [L]
$N_j$	nível de jusante [L]
$\alpha$	fator de correção da curva chave
$\alpha_a$	declividade de montante da soleira terminal
s	altura da soleira terminal [L]
$z_t$	diferença de cota entre o topo da soleira terminal e o leito de jusante [L]
$t_s$	espessura do topo da soleira terminal [L]
f	folga a ser somada na altura dos muros laterais [L]

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	14
<b>2 MÉTODO DE PESQUISA</b> .....	16
2.1 QUESTÃO .....	16
2.2 OBJETIVOS DO TRABALHO .....	16
<b>2.2.1 Objetivo Principal</b> .....	16
<b>2.2.2 Objetivos Secundários</b> .....	16
2.3 PREMISSAS .....	17
2.4 DELIMITAÇÕES .....	17
2.5 LIMITAÇÕES .....	17
2.6 DELINEAMENTO .....	17
<b>3 SISTEMA EXTRAVASOR DE BARRAGENS</b> .....	20
3.1 VERTEDOURO .....	22
<b>3.1.1 Vertedouros de Superfície</b> .....	23
3.1.1.1 Vertedouro Livre .....	24
3.1.1.2 Vertedouro com Comportas .....	25
<b>3.1.2 Vertedouros Não Convencionais</b> .....	26
3.1.2.1 Vertedouro Tulipa .....	27
3.1.2.2 Vertedouro Sifão .....	28
3.2 DISSIPADORES DE ENERGIA .....	29
<b>3.2.1 Dissipadores de Lançamento</b> .....	30
3.2.1.1 Concha de Arremesso .....	30
3.2.1.2 Salto de Esqui .....	31
<b>3.2.2 Dissipação Distribuída ao Longo da Própria Estrutura de Condução</b> .....	32
<b>3.2.3 Estruturas com Finalidade de Conter a Zona de Dissipação de Energia Hidráulica no seu Interior</b> .....	33
<b>4 BACIA DE DISSIPAÇÃO POR RESSALTO HIDRÁULICO TIPO I</b> .....	38
4.1 O RESSALTO HIDRÁULICO .....	38
<b>4.1.1 Ressalto Clássico</b> .....	41
<b>4.1.2 Ressalto a Jusante de Vertedouro (ressalto sobre plano inclinado)</b> .....	42
<b>4.1.3 Alturas Conjugadas</b> .....	43
<b>4.1.4 Comprimentos Característicos do Ressalto</b> .....	44
4.1.4.1 Comprimento do Ressalto ( $L_j$ ) .....	45
4.1.4.2 Comprimento do Rolo ( $L_r$ ) .....	46

4.1.4.3 Comprimento da Influencia do Ressalto ( $L_n$ ) .....	48
<b>4.1.5 Distribuição de Pressões</b> .....	48
4.2 RESSALTO HIDRÁULICO COMO DISSIPADOR DE ENERGIA .....	48
4.3 CRITÉRIOS DE PROJETO .....	50
<b>5 MÉTODO</b> .....	53
5.1 CHEIA DE PROJETO ( $Q_p$ ) .....	53
5.2 LARGURA DA BACIA (B) .....	55
5.3 CARACTERÍSTICAS DO RESSALTO HIDRÁULICO .....	55
5.4 COTA DE FUNDO ( $C_f$ ) .....	58
5.5 COMPRIMENTO DA BACIA ( $L_b$ ) .....	62
5.6 SOLEIRA TERMINAL .....	65
5.7 ALTURA DOS MUROS LATERAIS .....	66
5.8 RAIOS DE TRANSIÇÃO (R) .....	67
5.9 ESPESSURA DA BACIA E ANCORAGEM (e) .....	68
<b>6 APLICAÇÃO DOS CRITÉRIOS A UM CASO HIPOTÉTICO</b> .....	69
6.1 BARRAGEM DE GRANDE ALTURA .....	69
6.2 BARRAGEM DE PEQUENA ALTURA .....	75
<b>7 CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> .....	82
REFERÊNCIAS .....	84

## 1 INTRODUÇÃO

Com objetivo de combater os efeitos das secas no Nordeste e garantir o abastecimento de água nas grandes cidades, no final do século XIX iniciou-se no Brasil a construção de barragens de maior porte, obras que mais tarde serviriam também para gerar energia elétrica. Já a partir do século XX, um grande número dessas obras foi construído para as mais diversas finalidades. Hoje as barragens representam um estimável patrimônio público e privado, dada sua importância para a economia e o bem estar da população, pois estas estruturas facilitam a utilização dos recursos hídricos. Entretanto, estas obras devem ser funcionais e seguras.

Entre as causas mais frequentes de acidentes e incidentes que ocorrem em barragens, aproximadamente 56% (INTERNATIONAL COMMISSION OF LARGE DAMS, 1983), são devido a problemas de galgamento, erosões internas (*piping*) ou a jusante, causadas pelo mau dimensionamento do vertedouro ou do dissipador de energia (fator hidráulico), má escolha da cheia de projeto (fator hidrológico) e/ou falhas operacionais (fator humano ou elétrico-mecânico no caso de barragens com comportas). Somente em 2004 estima-se que mais de 400 obras, de diversos tamanhos e tipos, tenham se rompido em todo o Brasil (MARQUES, 2010).

Para atender às atuais demandas da sociedade, existe uma grande necessidade de se construir novas barragens, sendo então fundamental que se aprenda com os acidentes e incidentes ocorridos anteriormente, buscando conseguir obras mais seguras. Dentre as inúmeras consequências da ruptura dessas obras cabe salientar os efeitos à jusante (perdas de vidas e econômicas) e o custo envolvido na reconstrução. Neste contexto, o conhecimento aprofundado a respeito dos critérios de dimensionamento contribui para prevenção desses desastres decorrentes de falhas em algum dos elementos integrantes desse conjunto e garantir a segurança do local onde a barragem encontra-se inserida.

Desta forma, o presente trabalho inicia com um capítulo apresentando o método de pesquisa utilizado. Em seguida, um capítulo faz uma abordagem inicial sobre sistemas extravasores de barragens, que são responsáveis pela segurança da obra. É feito um detalhamento deste conjunto através de uma apresentação de sistemas extravasores como um todo e as obras

obrigatórias que os compõem (que são vertedouro e dissipador de energia). Na sequência do trabalho é apresentado um capítulo dando um foco maior na bacia de dissipação por ressalto hidráulico tipo I, fazendo a exposição desta estrutura, descrição de sua geometria típica e método de funcionamento, além de uma abordagem sobre ressalto hidráulico, que é o fenômeno responsável pela dissipação de energia no escoamento. Por fim, tem-se um capítulo sobre a análise dos critérios de projeto envolvidos, uma aplicação em caso hipotético e apresentação das considerações finais.

## **2 MÉTODO DE PESQUISA**

### **2.1 QUESTÃO DE PESQUISA**

A questão de pesquisa deste trabalho é: quais são os critérios de projeto que devem ser considerados para o dimensionamento de uma bacia de dissipação por ressalto hidráulico no sistema extravasor de uma barragem?

### **2.2 OBJETIVOS DO TRABALHO**

#### **2.2.1 Objetivo Principal**

O objetivo principal deste trabalho é a apresentação dos critérios de detalhamento do projeto de uma bacia de dissipação por ressalto hidráulico em um sistema extravasor exemplificando em um caso hipotético.

#### **2.2.2 Objetivos Secundários**

Os objetivos secundários deste trabalho são:

- a) identificação das variáveis envolvidas no dimensionamento de uma bacia de dissipação por ressalto hidráulico em um sistema extravasor;
- b) detalhamento do fenômeno ressalto hidráulico.

## 2.3 PREMISSAS

O correto dimensionamento e execução do dissipador de energia contribuem para a segurança das barragens e reduz a frequência de acidentes envolvendo estas obras.

## 2.4 DELIMITAÇÕES

O trabalho ficou delimitado ao estudo de dissipadores de energia em sistemas extravasores de barragens situadas no Brasil ou em regiões com condições climáticas e geológicas semelhantes.

## 2.5 LIMITAÇÕES

A pesquisa limita-se a consideração de:

- a) bacia de dissipação por ressalto hidráulico tipo I;
- b) não haverá transporte de materiais pela água que escoar sobre o vertedouro;
- c) não é feita análise de custos;
- d) não serão mostrados a distribuição longitudinal das pressões do ressalto, o dimensionamento estrutural das lajes de fundo e dos muros laterais.

## 2.6 DELINEAMENTO

O trabalho foi desenvolvido conforme etapas apresentadas a seguir:

- a) pesquisa bibliográfica;
- b) caracterização dos modelos de sistemas extravasores;
- c) caracterização de vertedouro;
- d) caracterização da estrutura de dissipação de energia;
- e) revisão sobre ressalto hidráulico;
- f) verificação e detalhamento dos critérios de projeto;
- g) aplicação em um caso hipotético;
- h) considerações finais.

O diagrama da figura 1 mostra o encadeamento entre as etapas da pesquisa.

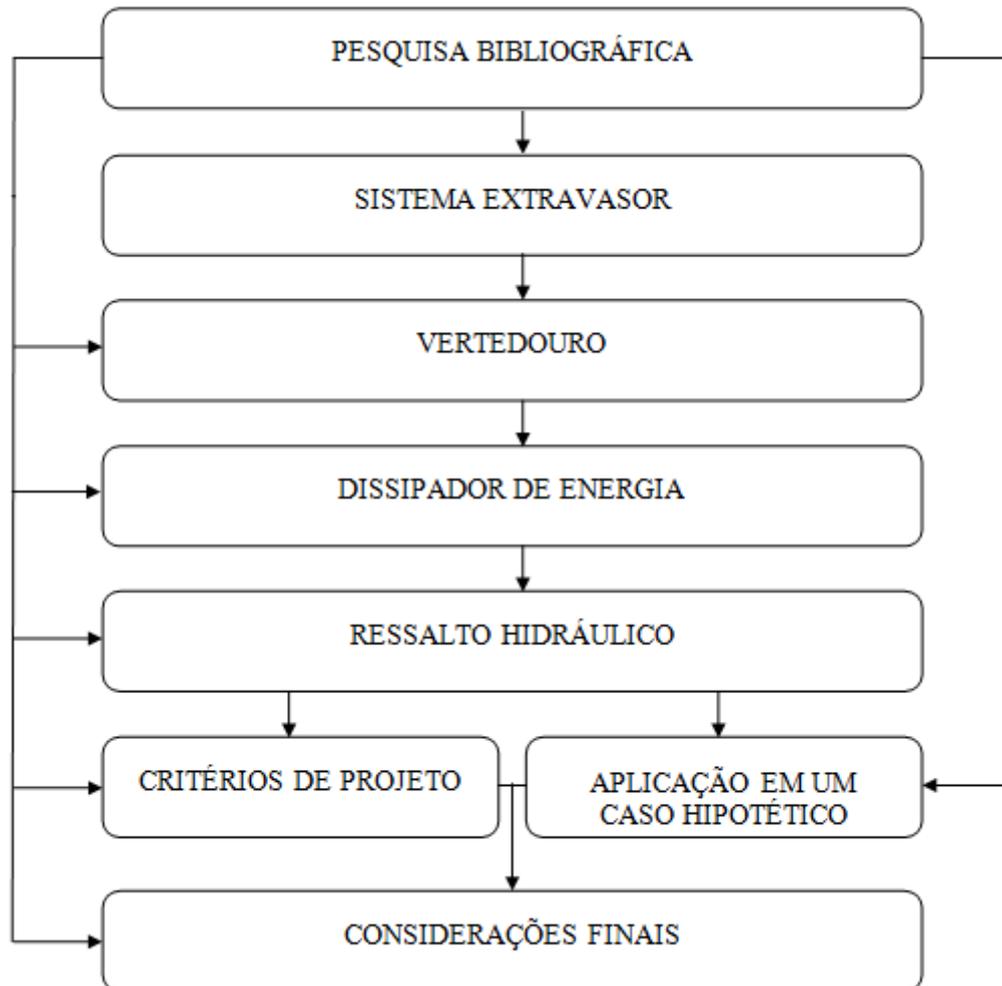


Figura 1: diagrama de etapas da pesquisa

Desde o início do trabalho e durante o decorrer do mesmo foi desenvolvida a pesquisa bibliográfica, buscando adquirir conhecimento sobre o tema bacia de dissipação por ressalto hidráulico. Esta pesquisa foi feita baseada em informações contidas em livros, periódicos, teses e dissertações relacionadas ao tema. Como o sistema extravasor pode compreender diversas estruturas, o estudo focou dissipadores de energia por ressalto hidráulico, mais especificamente bacias de dissipação do tipo I, que é um dos modelos mais utilizados. Entretanto, uma abordagem inicial sobre vertedouros se fez necessária, visto que estes são condicionantes para escolha das demais estruturas do sistema extravasor. O estudo sobre vertedouros incluiu a apresentação dos modelos mais utilizados e princípios de funcionamento

dos mesmos, pois este conhecimento é indispensável para a etapa seguinte, que é a definição do dissipador de energia.

A pesquisa bibliográfica sobre dissipadores de energia teve como objetivo apresentar as principais configurações, suas características e critérios de dimensionamento que devem ser considerados nos projetos de barragens. Foi realizado, também, um estudo sobre ressalto hidráulico para melhor compreensão deste fenômeno, que determinante para o bom desempenho da bacia de dissipação. A partir das informações obtidas sobre estas estruturas foi feita aplicação do conhecimento adquirido em um caso hipotético. Por fim, foram relatadas as considerações finais sobre o assunto, que foram sendo obtidas durante o decorrer do trabalho.

### 3. SISTEMA EXTRAVASOR DE BARRAGENS

A necessidade de armazenar água para utilização em períodos de seca, para abastecer a indústria e a agricultura com água para os bens materiais e alimentares, para fornecer água para fins recreativos em quantidades cada vez maiores e a alta demanda de energia elétrica exigiu o uso de barragens (UNITED STATES OF AMERICA, 1974, p. 21; NOVAK et al., 2007, p. 4). Entretanto, estas obras necessitam de uma estrutura que permita a passagem das águas excedentes para jusante e efetue o controle hidráulico (vertedouro), e outra com a finalidade de dissipar a energia cinética do escoamento vertido e restituí-lo ao curso natural do rio de acordo com a capacidade de suporte do leito (dissipador de energia), minimizando os possíveis efeitos erosivos do escoamento que poderiam comprometer a estrutura em si e/ou a fundação e, conseqüentemente, a segurança da barragem.

Desta forma, pode-se dizer que o sistema extravasor é o conjunto dos dispositivos responsáveis pela segurança em barragens, garantindo sua integridade frente às águas excedentes. De acordo com Baptista e Coelho (2003, p. 350):

A construção das estruturas de reservação, as barragens, pressupõe o controle de cursos d'água. Estes, por sua própria natureza, apresentam variações significativas das vazões, tornando necessário, em diversas situações, permitir a passagem das águas excedentes dos reservatórios sem ocasionar danos à barragem ou às outras estruturas hidráulicas adjacentes, [...].

As estruturas extravasoras deverão ser dimensionadas para a descarga efluente de projeto resultante do amortecimento no reservatório. Esta vazão é definida a partir dos estudos hidrológicos e hidráulicos defluentes e da dinâmica do reservatório. A partir destes dados e com as cotas dos níveis d'água no reservatório e a jusante do mesmo, é possível então definir a geometria das estruturas, conforme os critérios de projeto.

Um sistema extravasor pode compreender vertedouro, dissipador de energia, canais de aproximação, de fuga e de descarga. Baptista e Coelho (2003, p. 351) ressaltam que:

Quando as condições do arranjo hidráulico exigirem, principalmente para o caso da necessidade de vencer desníveis significativos, devem ser previstas estruturas de descarga, implantadas com declividades acentuadas, associadas aos vertedores. Estas estruturas podem ser constituídas de tubulações, túneis ou canais, sendo que no último caso denominam-se rápidos.

Entretanto, é obrigatório em todas as obras de barragens, o vertedouro e o dissipador de energia (UNITED STATES OF AMERICA, 1974, p. 345; BAPTISTA; COELHO, 2003, p. 337; NOVAK et al., 2007, p. 20), conforme ilustram as figuras 2 e 3. Então, é conveniente dividir estas obras em itens distintos dentro do trabalho. Um item trará uma abordagem inicial sobre vertedouros, dada sua relevância, e sobre os dissipadores mais usuais além das bacias de dissipação, e outro será um estudo mais detalhado sobre bacias de dissipação por ressalto hidráulico.



Figura 2: exemplo de sistema extravasor da Usina Hidrelétrica de Itaipu com dissipador de energia em salto de esqui (VALENTIN, 2009)



Figura 3: exemplo de sistema extravasor da Usina Hidrelétrica de Porto Colômbia com dissipador de energia do tipo bacia de dissipação por ressalto hidráulico tipo I (FURNAS, 2010)

### 3.1 VERTEDOURO

O vertedouro é a parte mais importante do sistema extravasor, é uma estrutura vital para a barragem. Trata-se de um dispositivo utilizado controlar a vazão que escoar do reservatório. Pode-se dizer que é uma estrutura “[...] cuja frequência de operação depende muito das dimensões relativas do reservatório – (volume útil em termos do deflúvio médio anual).” (PINTO, [1987], p. 1). De acordo com Novak et al. (2007, p. 191), o objetivo desta estrutura é passar as águas de inundação e, em particular a cheia de projeto, com segurança, para jusante da barragem quando o reservatório estiver transbordando. Da mesma forma, segundo *United States of America* (1974, p. 345) os vertedouros são previstos para liberação do fluxo excedente frente a hidrogramas afluentes em que a água não pode ser contida ou armazenada no volume de represamento. É através desta estrutura que o excesso de água é retirado da parte superior do reservatório criado pela barragem e transportado de volta ao rio ou para algum canal de drenagem.

O dimensionamento de um vertedouro depende principalmente da cheia de projeto, do tipo e localização da barragem, do tamanho do reservatório e da forma de operação (NOVAK et al., 2007, p. 191). Estas estruturas podem ser construídas junto ao corpo da barragem ou independente desta, conforme for mais apropriado. Sobre os tipos e dimensões dos vertedouros, Pinto ([1987], p. 6) afirma que mesmo para um dado tipo construtivo as dimensões podem variar, sendo, então, mais conveniente o estudo dos vertedouros superficiais para definição da extensão da crista vertente.

*United States of America* (1974, p. 345) destaca que a importância de um vertedouro não pode ser subestimada, pois muitas falhas de barragens são causadas por vertedouros mal concebidos ou por vertedouros com capacidade insuficiente. O correto dimensionamento e operação de vertedouros são de grande importância principalmente nas barragens de aterro e de enrocamento, pois estas podem romper por galgamento, que é a passagem da água sobre a crista da barragem devido à insuficiência do sistema extravasor. Já as barragens de concreto são capazes de resistir a um galgamento moderado, porém deve-se evitar, uma vez que a queda d’água pode provocar erosões no pé da barragem. As superfícies dos vertedouros devem ser resistentes para suportar as altas velocidades do escoamento oriundo do reservatório, e, geralmente, alguns dispositivos serão necessários para dissipar a energia na parte inferior da estrutura.

Novak et al. (2007, p. 191) citam que os vertedouros podem ser subdivididos de diversas formas, uma delas é quanto às condições de operação. Segundo destacam Baptista e Coelho (2003, p. 351):

Quanto às condições de operação, os vertedouros podem ser classificados em vertedouros de serviço ou de emergência. Com efeito, em diversas obras executa-se um vertedor único para escoar toda a gama de vazões que possa vir a ocorrer. Em outros casos é mais conveniente dispor-se de mais de um vertedor, sendo o vertedor de serviço, destinado a descarregar as vazões mais frequentes, e outro, o vertedor de emergência, utilizado para descarregar apenas as grandes cheias.

O tipo a ser utilizado e a localização dos vertedouros podem variar significativamente. *United States of America* (1974, p. 103) cita que os requisitos do vertedouro são dados principalmente pelo escoamento superficial e as características de vazão. Baptista e Coelho (2003, p. 351) reforçam esta afirmação destacando ainda que:

Os vertedouros podem ser classificados segundo diversos critérios diferentes, tais como localização, materiais constituintes, condições de operação etc. O tipo do vertedor é função da concepção da barragem, das vazões de projeto e das condições geológicas e topográficas da área do projeto.

Os vertedouros podem ser classificados de diversas formas, por isso, a seguir é feita uma divisão dessas estruturas. Entretanto, é apresentada apenas a classificação em função da geometria e da forma de operação.

### **3.1.1 Vertedouros de Superfície**

Vertedouro de superfície trata-se de uma estrutura de controle que comanda a descarga do reservatório. Estes vertedouros podem ser livres, isto é, não existe domínio sobre a descarga, a água do reservatório ao atingir a cota da soleira livre vai verter, ou podem ser com comportas, onde é possível ter um controle sobre o escoamento, isto é, pode-se determinar qual a cota que a água do reservatório pode atingir e só a partir desta cota abrem-se as comportas, permitindo o escoamento.

### 3.1.1.1 Vertedouro Livre

De acordo com Baptista e Coelho (2003, p. 351), “Uma importante classificação dos vertedores diz respeito às condições de funcionamento hidráulico, ligadas à presença ou não de dispositivos de controle de vazão, as comportas.”. Os vertedouros que não possuem comportas são ditos, então, de soleira livre.

Segundo Pinto ([1987], p. 6-7), “Os vertedouros sem comportas têm maior largura total, produzem menores vazões efluentes, são de construção mais simples, oferecem uma abertura mais ampla, tem sua operação totalmente automática e um custo de manutenção ínfimo.”. Em compensação, este tipo de estrutura necessita de uma área de inundação maior que a necessária caso houvesse comportas. Dentro deste grupo destaca-se o perfil Creager. Este tipo de vertedouro é também chamado de soleira normal, por ser o mais frequente de todos. Porto (1999, p. 398) destaca que “[...] são essencialmente grandes vertedores retangulares, projetados com uma geometria tal que promova o perfeito assentamento da lâmina vertente sobre toda a soleira.”. O perfil da soleira vertente desta estrutura é conhecido como a forma clássica da soleira dos vertedouros e é baseada no perfil do jato livre de vertedouros retangulares de parede delgada sem contração lateral (PINTO, [1987], p. 9), conforme ilustrado na figura 4 (a). A idéia básica desta estrutura é apresentar analogia entre um vertedouro de soleira espessa e um de parede delgada, visto que estes resguardam a estrutura do aparecimento de pressões negativas. Da mesma forma é exposto por Baptista e Coelho (2003, p. 358):

A condição hidráulica ideal de funcionamento dos vertedores corresponde ao seu funcionamento como sendo de parede delgada. Entretanto, tendo em vista a dificuldade prática de execução de vertedores nestas condições, estes usualmente são construídos com crista arredondada, sendo que a superfície de sua soleira deverá ter, preferencialmente, a forma da superfície inferior do jato que passa sobre uma soleira delgada de crista linear.

Então, pode-se definir estas estruturas como sendo uma soleira com crista arredondada situada no nível normal das águas (figura 4 (b)). O efeito causado pelo fato de sua crista acompanhar a superfície inferior do jato d'água é que na sua estrutura são geradas pressões muito próximas à atmosférica, que é uma situação desejável.

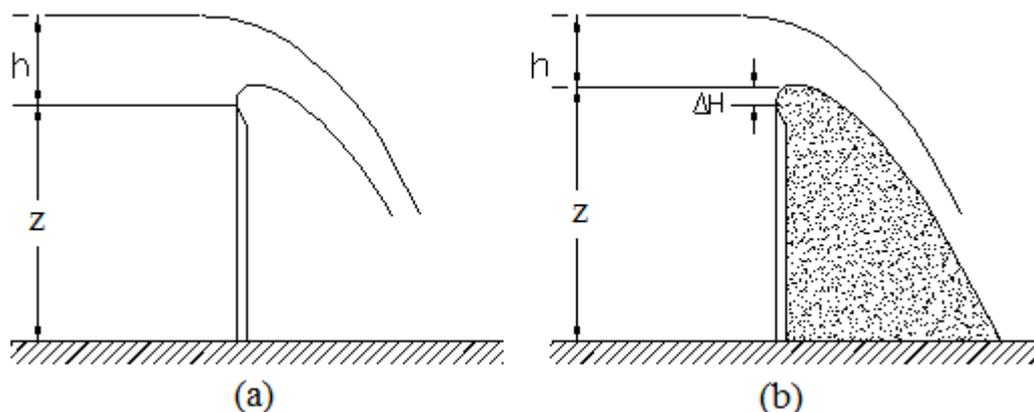


Figura 4: (a) vertedouro de soleira delgada; (b) vertedouro de soleira normal (perfil Creager) (adaptado de PORTO, 1999, p. 398)

Dentro desta classificação existem ainda outros tipos de vertedouros, por exemplo, o tipo labirinto, também chamado de bico-de-pato e o tipo canal lateral.

### 3.1.1.2 Vertedouro com Comportas

O vertedouro com comporta é chamado também de controlado, pois a partir do acionamento das comportas é possível determinar a vazão que irá escoar. De acordo com Baptista e Coelho (2003, p. 354):

[...] os vertedores com comportas consistem, essencialmente, em soleiras situadas abaixo do nível normal das águas, dispondo-se de comportas para controle da vazão. Como o NA pode atingir cotas superiores do topo das comportas, obtém-se uma maior vazão específica, através do aproveitamento da carga hidráulica correspondente. O tipo e localização das comportas bem como a forma do vertedor podem variar bastante segundo as condições de projeto.

Os principais requisitos operacionais para as comportas são controle de inundações, estanqueidade, capacidade de elevação mínima e a conveniência da instalação e manutenção. Apesar da geometria robusta da estrutura, podem ocorrer falhas e as obras devem ser capazes de tolerar essas falhas sem consequências inaceitáveis. Estas estruturas devem ter uma prevenção para que em nenhum caso ofereça risco ao pessoal operacional e ao público (NOVAK et al., 2007, p. 267).

Segundo Pinto ([1987], p. 7), “Os vertedouros com comportas resultam em menores alturas para a barragem, e menor área de inundação e oferecem maior flexibilidade de operação.”.

Entretanto, cabe ressaltar que este tipo de estrutura está mais propenso a falhas, pois depende do correto controle das comportas, além de envolver custos na operação e na manutenção, que deve ser realizada periodicamente.

Os modelos de comportas podem ser divididos em dois grupos: radiais (figura 5) e de elevação vertical. Novak et al. (2007, p. 270) destacam que as vantagens das radiais sobre os portões de elevação vertical é que o tamanho da estrutura é menor, possui uma maior rigidez, ausência de ranhuras na comporta, mais fácil automação e melhor desempenho no período de inverno.

Se as comportas do vertedouro operarem de forma assimétrica, elas poderão provocar o aparecimento de correntes de retorno a jusante, que na maioria dos casos envolvem arraste de material rochoso de jusante para o interior do dissipador de energia e gera efeito abrasivo sobre o revestimento de concreto. Pinto ([1987], p. 57) destaca que este efeito abrasivo é a principal causa de danos ocorridos nas bacias de dissipação.

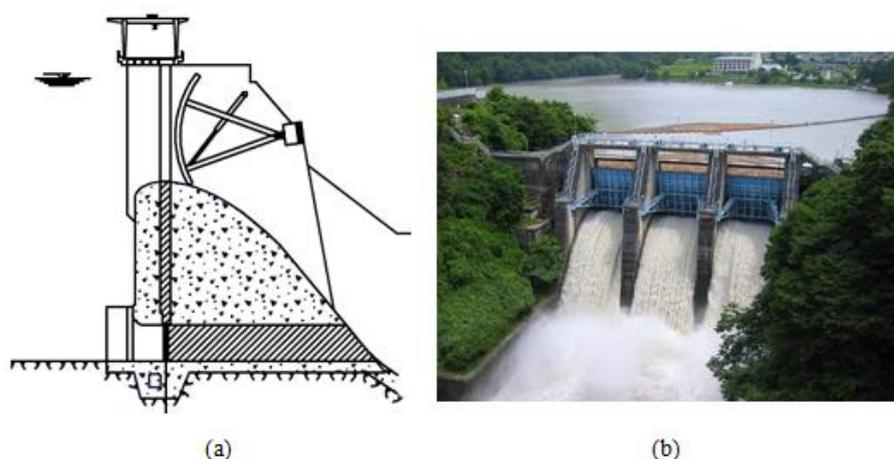


Figura 5: (a) ilustração de um vertedouro com comportas (BAPTISTA; COELHO, 2003, p. 354) e (b) Barragem Takato Dam, Japão, com operação por comportas (WIKIPEDIA, 2009)

### 3.1.2 Vertedouros Não Convencionais

Os vertedouros tubulares são geralmente utilizados quando as vazões de projeto são baixas, o espaço é reduzido e quando se quer manter o nível do reservatório praticamente constante. Se

não há espaço para construção de outros tipos de vertedores, eles podem ser uma boa solução. Em vales estreitos formados por barragens de terra ou enrocamento, ou se uma barragem de concreto não apresentar comprimento suficiente de crista e mesmo em barragens em arco, onde não é conveniente a operação de vertedores na barragem. Além disso, apresentam como outras vantagens suas pequenas dimensões e o pouco volume de concreto empregado na sua construção. Este grupo de vertedouros divide-se em dois tipos: tulipa e sifão.

### 3.1.2.1 Vertedouro Tulipa

O vertedouro tulipa tem como uma das principais características o fato de ser independente do corpo da barragem, o que é favorável principalmente em projetos de barragens de terra e de enrocamento. Trata-se de um vertedouro circular, semelhante a um funil (figura 6), que é seguido de um poço geralmente vertical, mas podendo ser também inclinado, ligado a uma curva de raio curto conectada a um túnel horizontal ou com pequena declividade, que irá desaguar quase sempre em uma estrutura de dissipação. De acordo com Baptista e Coelho (2003, p. 353), “Este tipo de vertedor é constituído de uma tubulação vertical, denominada *shaft*, seguida de uma tubulação aproximadamente horizontal até o deságue. [...]. Os vertedores tipo tulipa apresentam um funcionamento hidráulico complexo [...]”.

Pinto ([1987], p. 69) destaca que para vazões menores o controle é feito pela crista, porém, para vazões superiores o controle passa a ser de orifício (ou bocal) e, progressivamente, o escoamento passa a ser controlado pela capacidade do sistema operando como um conduto em pressão. O autor ressalta que em termos práticos há uma verdadeira saturação do vertedouro tipo tulipa e mínimas condições de segurança face a um eventual aumento de vazão de cheia com relação à capacidade máxima nominal. A escolha desta solução deve estar vinculada a algumas condições, por exemplo, quando puder ser aproveitado o canal de desvio; quando a presença de material flutuante for insignificante; quando o espaço para o vertedor convencional for limitado e quando a galeria de descarga não for muito longa (EXTRAVASOR..., [2009]).

Em planta esta estrutura é representada como um orifício circular. Quando vista em corte, a soleira é semelhante ao perfil Creager, para que na superfície as pressões ocorridas sejam as mais próximas possíveis da atmosférica.

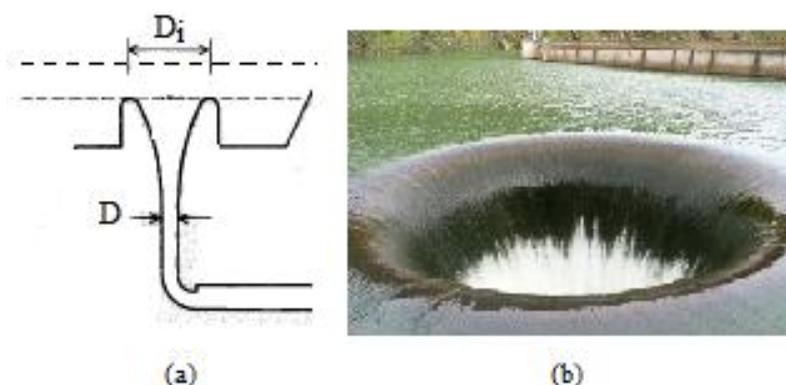


Figura 6: (a) representação em corte de um vertedouro tulipa (adaptado de NOVAK et al., 2007, p. 222); (b) vertedouro da barragem Monticello Dam, na Califórnia (ESTRUTURAS..., [2009])

### 3.1.2.2 Vertedouro Sifão

Os vertedouros sifão são canalizações fechadas sob a forma de um U invertido com uma entrada, uma garganta (seção de controle), um conduto mais baixo, e uma tomada (figura 7). Para fluxos muito baixos um vertedouro sifão opera como um açude; quando o fluxo aumenta, o nível de água no rio se eleva, a velocidade no sifão aumenta, e o fluxo no conduto mais baixo começa a criar uma exaustão na parte superior do sifão até que este começa a fluir completamente como uma tubulação (NOVAK, 2007, p. 226). Baptista e Coelho (2003, p. 353) descrevem sobre esta estrutura que “[...] permite a operação com nível d’água aproximadamente constante dentro da faixa de vazões de projeto. Este tipo de vertedor apresenta limites quanto à capacidade de vazão e quanto ao desnível, de forma a não ocasionar cavitação [...]”.

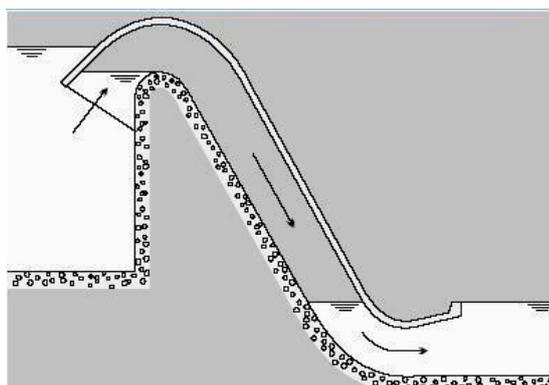


Figura 7: vertedouro em sifão (BAPTISTA; COELHO, 2003, p. 353)

### 3.2 DISSIPADORES DE ENERGIA

O aproveitamento dos recursos hídricos envolve, muitas vezes, construção de obras que alteram o equilíbrio dos rios. Desta forma, é indispensável que nestes empreendimentos exista uma estrutura com a função de adequar o escoamento às características do corpo receptor, seja este natural ou artificial de forma que “[...] as erosões provenientes do aumento da vazão específica não coloquem em risco a segurança das mesmas.” (MARQUES, 1991, p. 1).

A dissipação de energia nas barragens está intimamente associada com o projeto do vertedouro, principalmente com a vazão de projeto escolhida, a diferença entre os níveis de água a montante e a jusante, bem como as condições do leito a jusante (NOVAK et al., 2007, p. 244), pois a energia cinética associada ao escoamento vindo do vertedouro é muito elevada, de forma que pode causar danos na própria estrutura, na barragem e no corpo receptor das águas. Schreiber (1977, p. 81) menciona que “A energia produzida pela água caindo pelo vertedouro depende da descarga e da queda e que pode chegar a valores enormes.”. Para Vischer e Hager (1995, p. 1) os dissipadores são usados em locais onde o excesso de energia hidráulica poderia causar danos, como a erosão de canais de fuga e abrasão de estruturas hidráulicas. Por isso, Baptista e Coelho (2003, p. 359) afirmam que é necessário prever um dissipador para esta energia a fim de adequar a velocidade do escoamento às características do meio a jusante. Segundo Marques (1991, p. 5), “Para manter a energia do escoamento dentro dos limites compatíveis com a estabilidade do leito, deve-se transformar a energia cinética em turbulência e finalmente em calor, por ação da viscosidade, com o objetivo de dissipá-la.”.

A passagem da água de um reservatório para jusante envolve uma série de fenômenos hidráulicos, tais como a transição do fluxo supercrítico na entrada do dissipador para um fluxo subcrítico na saída da estrutura para a corrente. Vischer e Hager (1995, p. 2) definiram que uma dissipação de energia eficiente consiste em perturbar a corrente de água, proporcionando um aumento da turbulência ou difundindo a massa desta corrente em um jato. Um dissipador de energia econômico é aquele que tem um efeito impactante dentro de uma região relativamente pequena.

Ortiz (1982, p. 253) dividiu as estruturas de dissipação em três grupos, um deles compreende as bacias de dissipação e outras estruturas com finalidade de conter a zona de dissipação de energia hidráulica do escoamento supercrítico, o outro grupo compreende as estruturas que lançam o escoamento supercrítico para longe da obra através de um jato. Sobre as estruturas

de dissipação do segundo grupo, Ortiz (1982, p. 266) destaca que estas estruturas não dissipam a energia do escoamento, elas simplesmente transferem o problema para jusante da obra. Porém, ainda há outro tipo de dissipador, aquele que não dissipa a energia de forma concentrada, mas sim de forma distribuída ao longo da própria estrutura de condução.

As próximas etapas do trabalho compreenderão uma abordagem sobre as estruturas de dissipação de energia mais utilizadas em cada um desses grupos. Entretanto, as estruturas de dissipação por ressalto hidráulico serão apresentadas em um capítulo distinto, visto que estão relacionadas diretamente com o objetivo principal deste trabalho.

### **3.2.1 Dissipadores de Lançamento**

Estas estruturas podem estar dispostas de três formas: abaixo do nível da água, no nível da água a jusante e acima do nível da água. Nos dois primeiros casos são chamadas de conchas submersa e de arremesso, respectivamente. No terceiro caso é denominado salto de esqui. Atualmente, há uma “[...] tendência em considerar-se as estruturas tipo concha submersa como estruturas em rampa ascendente.” (MARQUES, 1991, p. 22). Por este motivo este tipo de estrutura não será detalhado.

#### **3.2.1.1 Concha de Arremesso**

Segundo Baptista e Coelho (2003, p. 364) “[...] consiste na execução na extremidade de jusante da estrutura de condução de água, de uma concha cilíndrica, que projeta um jato de água em direção ascendente [...]”, conforme mostrado nas figuras 8 e 9. Ortiz (1982, p. 266) destaca que esta estrutura tem duas funções importantes. A primeira é lançar o jato para jusante; a segunda é espalhar o jato o máximo possível de modo a aumentar a área de impacto e minimizar os danos ao leito do rio. Assim, uma redução na velocidade do escoamento ocorre devido à dissipação da energia e à incorporação de ar no fluxo. Se a estrutura for posicionada afastada da barragem, evita que esta tenha sua estabilidade prejudicada, auxiliando a manter sua integridade.

Entretanto, Baptista e Coelho (2003, p. 365) ressaltam:

[...] a importância da consideração das vazões inferiores à vazão de projeto nas estruturas por jatos. Com efeito para pequenas vazões não ocorre a formação do jato, sendo que a própria concha desempenha papel de uma bacia dissipadora, permitindo, em seguida, o escoamento relativamente lento da água para jusante. Pode ocorrer, porém, no caso de existência de desnível entre a concha e o leito natural, o início de um processo de erosão junto ao pé da estrutura, tornando necessária a previsão de estruturas de proteção e reforço do leito do corpo d'água receptor.

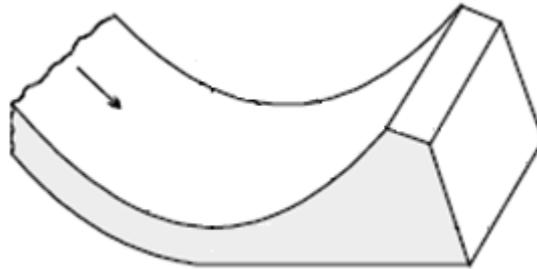


Figura 8: concha de arremesso (adaptado de BAPTISTA; COELHO, 2003, p. 364)



Figura 9: resalto hidráulico no dissipador tipo concha de arremesso (ESTRUTURAS..., 2010)

### 3.2.1.2 Salto de Esqui

Sobre defletores em salto de esqui (figura 10), Pinto ([1987], p. 48) cita que em todos os casos a crista do defletor deve ser mantida acima do nível das águas do canal de restituição a jusante a fim de evitar o afogamento do jato. Neste dissipador, segundo Pinto ([1987], p. 66), “[...] a dissipação da energia não se verifica na estrutura, mas sim sobre o leito natural a jusante. A erosão provocada pelo escoamento é de difícil avaliação, dependendo da velocidade e concentração do jato de água que atinge a bacia e também da natureza da rocha.”

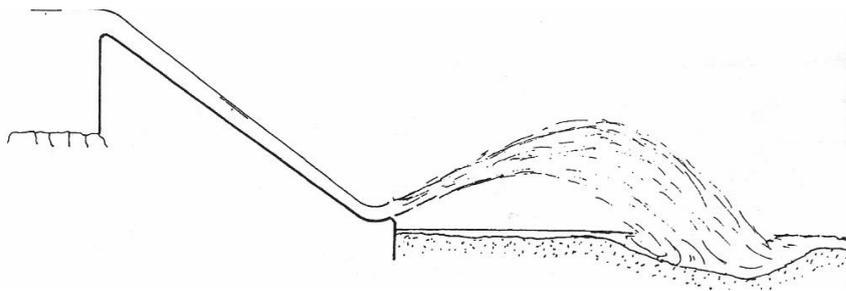


Figura 10: dissipador salto de esqui (adaptado de HAGER, 1995, p. 112)

O princípio de funcionamento deste dissipador, segundo Ortiz (1982, p. 268), consiste em “[...], o jato de alta velocidade é conduzido através de um canal confinado, e lançado na seção terminal de uma trajetória controlada. [...] muito frequentemente são condições geológicas e não hidráulicas que limitam a utilização desta estrutura.”.

De acordo com Novak e Cábélka<sup>1</sup> (1981 apud NOVAK et al., 2007, p. 246-247) o uso deste tipo de dissipador acarreta significativa economia onde as condições geológicas e morfológicas são favoráveis, e especialmente quando o vertedouro pode ser colocado sobre a estação de energia ou pelo menos sobre as obras descarga de fundo. É possível ainda, para aumentar o efeito da dissipação e a eficiência desta estrutura, a utilização de dois dissipadores salto de esqui arrançados de forma que os jatos lançados colidam.

### 3.2.2 Dissipação Distribuída ao Longo da Própria Estrutura de Condução

Este grupo de dissipadores foi definido por Ortiz (1982, p. 268) como sendo “As estruturas que envolvem alterações no próprio perfil do vertedor [...]”, conforme demonstrado na figura 11. Dentro deste grupo o exemplo mais clássico são os vertedouros em degraus. Segundo Baptista e Coelho (2003, p. 366), “[...] são estruturas que dissipam a energia através do impacto do jato de água com a estrutura e, eventualmente, através da formação do ressalto hidráulico em cada degrau, quando o espaçamento entre cada desnível possibilita sua ocorrência.”. No entanto, estas estruturas geralmente não dispensam a utilização de uma bacia de dissipação. O que ocorre é que devido à energia dissipada ao longo do vertedouro em degraus, as dimensões da bacia a ser construída a jusante serão menores.

<sup>1</sup> NOVAK, P.; CÁBELKA, J. **Models in Hydraulic Engineering**: physical principles and design applications. London: Pitman, 1981.



Figura 11: vertedouro em degraus (VERTEDOUROS..., 2010)

### 3.2.3 Estruturas com Finalidade de Conter a Zona de Dissipação de Energia Hidráulica no seu Interior

Este grupo compreende as estruturas terminais dos vertedouros com a função de dissipar a energia do escoamento na própria estrutura (figura 12), diferente das demais vistas, como a concha de arremesso e o salto de esqui que apenas conduzem o fluxo para jusante. Este tipo de estrutura pode também estar associada a outras com função distribuída ao longo da própria estrutura de condução (figura 13), possibilitando assim uma redução no tamanho da bacia.

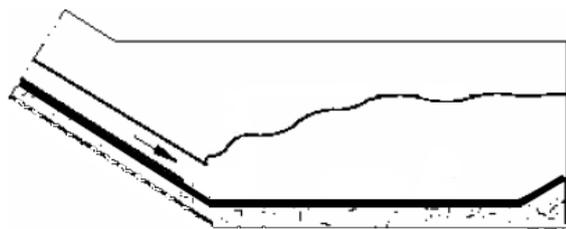


Figura 12: croqui de bacia de dissipação por ressalto hidráulico (adaptado de PETERKA, 1974, p. 58)

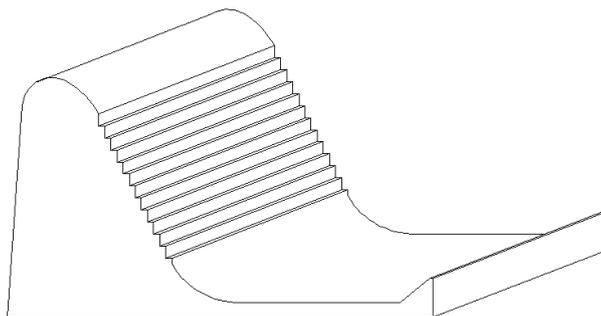


Figura 13: vertedouro em degraus com bacia de dissipação por ressalto hidráulico

As bacias horizontais com formação de ressalto são possivelmente as estruturas de dissipação mais pesquisadas pelos hidráulicos devido a sua grande aplicação, com sucesso, na prática da construção de estruturas hidráulicas (ORTIZ, 1982, p. 255). Esta estrutura consiste na construção de uma bacia a jusante do vertedouro em que parte da energia é dissipada devido à mudança de regime do escoamento. Segundo Novak et al. (2007, p. 249), a bacia de dissipação é a forma mais comum de dissipador de energia, que converte o fluxo de fluido do vertedouro em fluxo subcrítico compatível com o regime do rio a jusante. O mais simples — e muitas vezes melhor — método de alcançar esta transição é através de um ressalto hidráulico formado na bacia de dissipação.

Estas estruturas são projetadas para confinar o comprimento total do ressalto hidráulico sobre a sua estrutura. É possível, inclusive, reduzir-se o comprimento do ressalto pela instalação dos acessórios tais como defletores e peitoris na bacia de dissipação. Além do que, o encurtamento do ressalto e os acessórios exercem um efeito de estabilização e, em alguns casos, aumentam o fator de segurança (PETERKA, 1974, p. 19). Ortiz (1982, p. 253-254) frisa que estas estruturas são mais eficientes quando o ressalto fica perfeitamente definido e dentro da bacia, condição que ocorre quando a curva de descarga do curso d'água se aproxima da curva da altura conjugada.

Sobre o comprimento da bacia, Pinto ([1987], p. 55) destaca que:

Quanto ao comprimento da bacia de dissipação, os valores de comprimento do ressalto [...] dão uma primeira indicação. A obra da bacia poderá ser mais curta em função da qualidade da rocha do canal de restituição. Quanto menor a bacia revestida, maior a energia turbulenta remanescente e maior a tendência à erosão do leito.

Cabe salientar que se na região a jusante do vertedouro for identificada a presença de maciço rochoso fraturado, será suficiente verificar se o mesmo conseguirá dissipar com segurança a

energia do escoamento. Caso essa região seja composta por solo deverá ser projetada obrigatoriamente uma proteção específica.

Com base em um período de 23 anos de pesquisas nos Estados Unidos, o *Bureau of Reclamation* estabeleceu uma série de critérios de projeto aceitáveis para bacias de dissipação (UNITED STATES OF AMERICA, 1948<sup>2</sup> apud HAGER, 1992, p. 217; PETERKA, 1958<sup>3</sup> apud HAGER, 1992, p. 217). Foram classificados 10 tipos de bacias de dissipação, entretanto, as mais difundidas foram *United States Bureau of Reclamation (USBR) I*, *USBR II* e *USBR III*.

A bacia *USBR I* é a bacia que envolve o ressalto clássico, desenvolvida inicialmente para números de Froude entre 1,7 e 2,5, atualmente ela é utilizada para números de Froude até 10. Esta estrutura não possui nenhum dispositivo anexo, exceto um degrau ascendente em forma de parede vertical ou inclinado na extremidade de jusante. Nestas obras deve-se assegurar a horizontalidade da estrutura, conforme a figura 12.

A bacia *USBR II* (figura 14) é utilizada para número de Froude a montante superior a 4,0. Esta estrutura possui blocos de queda no início e uma soleira terminal dentada, que interfere no ressalto possibilitando uma redução no comprimento da bacia.

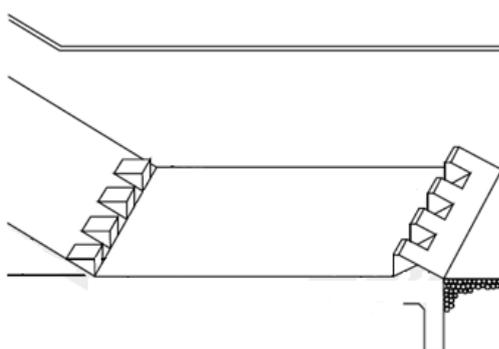


Figura 14: bacia de dissipação *USBR II*  
(adaptado de BAPTISTA; COELHO, 2003, p. 361)

<sup>2</sup> UNITED STATES OF AMERICA. Department of Interior. Bureau of Reclamation. Model Studies of Imperial Dam, Desilting Works, All-American Canal Structures, Boulder Canyon Project – Final Report, **Hydraulic Investigations**, Washington, Bulletin 4, Part VI, 1948.

<sup>3</sup> PETERKA, A. J. **Hydraulic Design of Stilling Basins and Energy Dissipators**. Denver: United States Government Printing Office, 1958. Engineering Monograph 25

A bacia USBR III (figura 15) é utilizada para condições com número de Froude superior a 4,5 e esta estrutura contém uma linha de blocos integrantes. Seu comprimento é inferior ao da bacia USBR II sendo, portanto, bastante compacta.

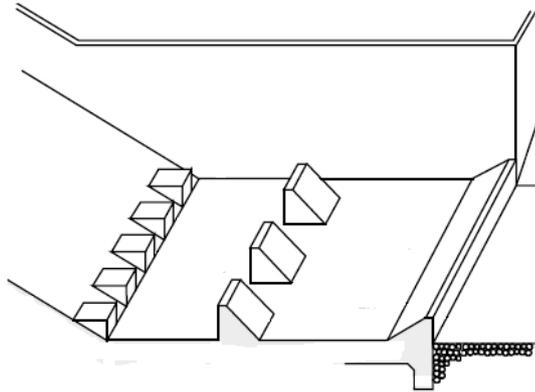


Figura 15: bacia de dissipação USBR III  
(adaptado de BAPTISTA; COELHO, 2003, p. 362)

Atualmente a solução mais utilizada é o tipo I, ficando os tipos II e III restritos a pequenas quedas, inferiores a 15,00 m. Mesmo assim, estas estruturas necessitam de cuidados especiais, principalmente devido a problemas de cavitação, que podem ocorrer junto aos blocos anexos, conforme mostrados nas figuras 16 e 17.



Figura 16: efeito da cavitação junto aos blocos anexos na laje de fundo do dissipador de energia da Barragem de Bonneville (ELEVATORSKI, 1959, p. 100)



Figura 17: danos causados pela cavitação na laje de fundo do dissipador de energia da Usina Hidrelétrica Porto Colômbia (CARVALHO, 2009)

Para melhor compreensão sobre as estruturas tipo I e seu funcionamento, esta será abordada mais detalhadamente em um capítulo a parte, juntamente com a descrição do fenômeno do ressalto hidráulico e os principais critérios de dimensionamento para estas estruturas.

## 4 BACIA DE DISSIPACÃO POR RESSALTO HIDRÁULICO TIPO I

As bacias de dissipação USBR I são, atualmente, as estruturas terminais dos vertedouros mais utilizadas para dissipar a energia hidráulica do escoamento. A dissipação de energia se dá sobre a estrutura através da formação do ressalto hidráulico. Antigamente esta solução era indicada apenas para uma faixa restrita de números de Froude (de 1,7 a 2,5), mas em função dos problemas que podem ocorrer com as bacias tipo II e III, tais como cavitação, deterioração dos blocos, entre outros, a utilização deste tipo de estrutura se expandiu para uma faixa muito mais ampla de números de Froude, compreendendo valores de 1,7 até 10.

A bacia tipo I consiste em uma laje plana que deverá formar o ressalto hidráulico no seu interior, no final desta bacia existe uma soleira terminal, conforme mostrado na figura 18. Esta soleira terminal tem a função de proteger a bacia de dissipação, evitando que ocorram erosões muito próximas desta estrutura e evitando que materiais do leito de jusante entrem na bacia devido a turbulência da água.



Figura 18: bacia de dissipação por ressalto hidráulico tipo I (adaptado de WIEST, 2008, p. 6)

### 4.1 O RESSALTO HIDRÁULICO

De acordo com Porto (1999, p. 335):

O ressalto hidráulico ou salto hidráulico é o fenômeno que ocorre na transição de um escoamento torrencial ou supercrítico para um escoamento fluvial ou subcrítico. O escoamento é caracterizado por uma elevação brusca no nível d'água, sobre uma

distância curta, acompanhada de uma instabilidade na superfície com ondulações e entrada de ar do ambiente e por uma conseqüente perda de energia em forma de grande turbulência.

Este fenômeno ocorre, geralmente, associado a singularidades e estruturas hidráulicas, em condições que as características do fluxo variam de forma repentina. Baptista e Coelho (2003, p. 274) ressaltam que “As situações práticas usuais de escoamento bruscamente variado são associadas a estruturas hidráulicas, tais como vertedouros, comportas, dissipadores de energia, degraus, obstáculos, transições bruscas etc.” (figuras 19 e 20). Acrescentando, Hager (1992, p. 2-3) cita que o ressalto compreende diversos recursos, através da qual a energia mecânica em excesso pode ser dissipada em calor. A ação de dissipação de energia pode mesmo ser amplificada pela concepção de dissipadores de energia. Numerosas estruturas têm sido desenvolvidas onde um rápido escoamento da água corrente pode ser transformado em um fluxo calmo por meio de um ressalto. Segundo Elevatorski (1959, p. 20), inúmeros testes feitos com modelos e protótipos comprovaram que o ressalto hidráulico é a maneira mais eficaz de dissipar a energia abaixo de estruturas hidráulicas.



Figura 19: ressaltos formados a jusante de um vertedouro com comportas (WIKIPEDIA, 2010)

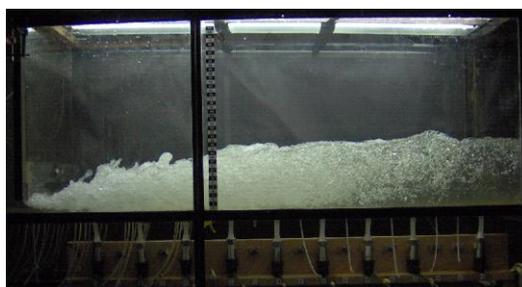


Figura 20: ressaltos hidráulicos formados a jusante de uma comporta plana (TRIERWEILER NETO, 2006, p. 50)

Uma série de estudos foi realizada pelo *United States Bureau of Reclamation* para tentar determinar as propriedades do ressalto hidráulico. A forma deste fenômeno e as características do escoamento podem ser relacionadas com o fator cinético do fluxo,  $v^2/2g$ , com a vazão de descarga na entrada da bacia e com a profundidade crítica do fluxo,  $y_r$ , ilustrados na figura 21, ou o com o Número de Froude, que é o parâmetro que determina condição do fluxo (lento ou rápido). Este número é calculado pelas seguintes equações:

$$Fr = \frac{v}{\sqrt{g \cdot y}} \quad (\text{equação 1})$$

$$v = \frac{Q}{A} \quad (\text{equação 2})$$

Onde:

Fr é numero de Froude [1];

v é a velocidade [L/T];

g é a aceleração da gravidade [L/T<sup>2</sup>];

y é a altura da lâmina d'água [L];

Q é a vazão que está passando pela seção [L<sup>3</sup>/T];

A é a área da seção transversal ( $A=B \cdot y_r$ ) [L<sup>2</sup>].

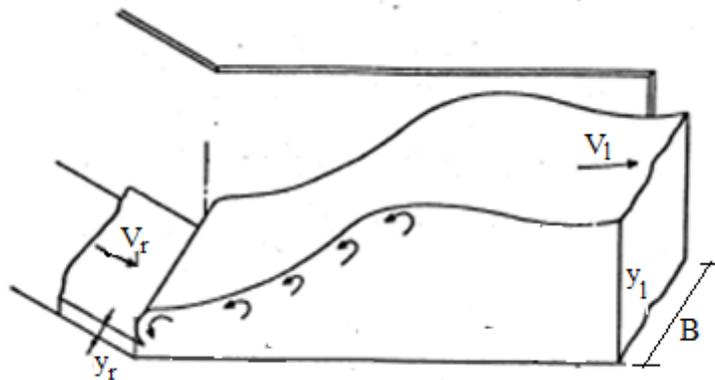


Figura 21: identificação das variáveis do ressalto hidráulico (TAMADA, [1991], p. DIS 8)

Sabe-se que fluxos com  $Fr < 1$  são fluxos em regime subcrítico, enquanto fluxos supercríticos possuem  $Fr > 1$ . Para números de Froude  $Fr = 1$ , a água está escoando com profundidade crítica, o que impede a formação do ressalto.

#### 4.1.1 Ressalto Clássico

O ressalto ocorrido a jusante de um vertedouro sofre a interferência da inclinação desta estrutura. Entretanto, uma análise sobre ressalto clássico, como é conhecido o ressalto sobre superfície horizontal, ajuda a compreender melhor o fenômeno. De acordo com Peterka (1974, p. 15), o ressalto hidráulico pode ocorrer em pelo menos quatro formas distintas em uma seção horizontal, conforme mostrado na figura 22. Todas estas formas são encontradas na prática. As características internas e a absorção de energia no ressalto variam em cada forma. Algumas destas são desejáveis e algumas indesejáveis, e estão convenientemente catalogadas com relação ao número de Froude.

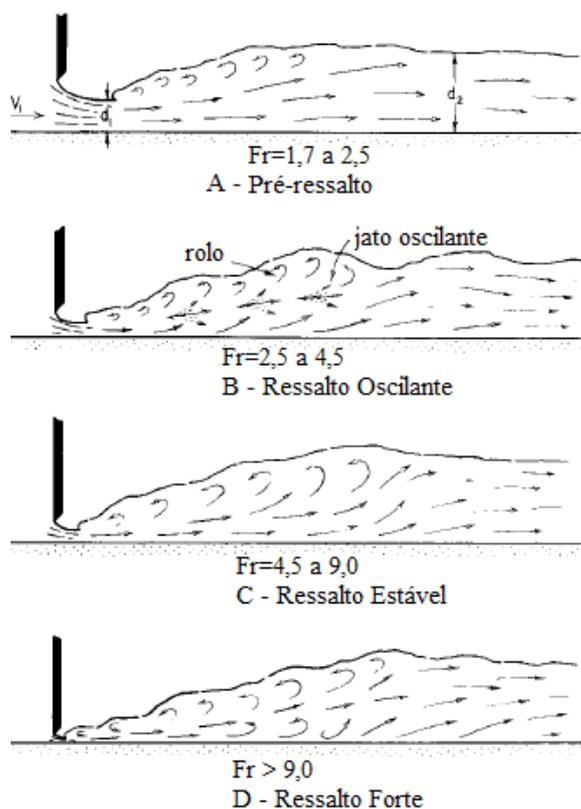


Figura 22: formas do ressaltos hidráulico  
(adaptado de PETERKA, 1974, p. 16)

Segundo Peterka (1974, p. 16), quando o número de Froude está entre 1,7 e 2,5, uma série de pequenos rolos se desenvolvem na superfície, sendo formado o pré-ressalto. Este caso não gera problemas na bacia de dissipação, a superfície da água é muito suave, a distribuição de velocidade no canal de fuga é bastante uniforme e a energia dissipada é muito pequena. Para números de Froude variando entre 2,5 e 4,5 encontra-se o ressalto dito pulsante, desta oscilação é produzida uma onda de grande período irregular que pode causar erosão nas margens. Quando o número de Froude varia entre 4,5 e 9,0, o ressalto hidráulico já está bem estabilizado, sendo conhecido como ressalto estável e dissipando entre 45% e 70% da energia de entrada. Para Froude acima de 9,0 encontra-se o ressalto forte, que apresenta uma agitação intensa da superfície que se propaga para jusante por uma longa distância. A perda de energia é alta e pode alcançar 85% da energia de entrada.

#### 4.1.2 Ressalto a Jusante de Vertedouro

O fato de a superfície dos vertedouros tipo Creager serem inclinadas faz com que a posição do início do ressalto varie em função da relação entre a altura de água sobre o fundo da bacia e a altura conjugada lenta. Deve-se então projetar as bacias de dissipação de forma a garantir que o início do ressalto ocorra no pé da estrutura (ressalto tipo A, ilustrado na figura 23).

Kindsvater<sup>4</sup> (1944 apud HAGER, 1992, p. 42) classificou os ressaltos de acordo com sua posição no pé do vertedouro (início) e no fim do ressalto, de acordo com a figura 23:

- a) tipo A: quando o início do ressalto está exatamente sobre o ponto de tangência entre a curva e o trecho horizontal;
- b) tipo B: intermediário entre o ressalto A e o C, o ressalto inicia sobre a superfície do vertedouro termina sobre o trecho horizontal;
- c) tipo C: ressalto inicia sobre a superfície do vertedouro e termina acima do ponto de tangência entre a curva e o trecho horizontal;
- d) tipo D: ressalto encontra-se totalmente sobre o vertedouro, ocorrendo somente com grandes graus de submergência;
- e) Cl: ressalto clássico.

---

<sup>4</sup> KINDSVATER, C. E. **The Hydraulic Jump in Sloping Channels**. [S. l.: s. n.], 1944. v. 109.

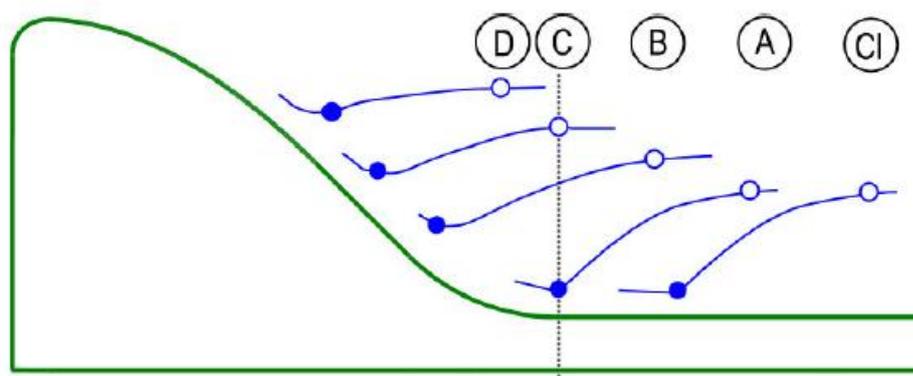


Figura 23: ressalto formado a jusante de vertedouro (MEES, 2008, p. 42)

Conforme o nível da água a jusante do vertedouro aumenta, tornando a altura no início da bacia superior à altura no final da mesma, o ressalto vai se movendo da condição A para montante, até chegar na condição D onde, conforme já explicitado, o ressalto ocorre sobre o vertedouro. O ressalto tipo A tem seu comportamento comparado a um ressalto clássico embora existam alguns componentes relacionados com a mudança do sentido do escoamento que causam algumas alterações no comportamento do campo de pressões e velocidades. Entretanto, após certa distância estes componentes desaparecem e assim o escoamento passa a ter o comportamento característico de um ressalto sobre canal horizontal.

### 4.1.3 Alturas Conjugadas

A estrutura do ressalto hidráulico depende fundamentalmente das suas alturas conjugadas e do seu comprimento. Em seu trabalho, Wiest (2008, p. 9) enfatiza que “As alturas conjugadas constituem importante fator na descrição do ressalto hidráulico, influenciando na determinação do tipo de ressalto e de características como o comprimento do rolo e do próprio ressalto.”. Estas alturas correspondem à espessura da lâmina d’água no início do ressalto ( $y_r$ , altura conjugada rápida) e a espessura da lâmina d’água no final do mesmo ( $y_l$ , altura conjugada lenta). Conforme afirma Porto (1999, p. 336), “As alturas destas seções,  $y_r$  e  $y_l$ , são as alturas ou profundidades conjugadas do ressalto. A diferença,  $y_l - y_r$ , chama-se altura do ressalto e é um parâmetro importante na caracterização do ressalto como dissipador de energia.”. Estas alturas são demonstradas na figura 24.

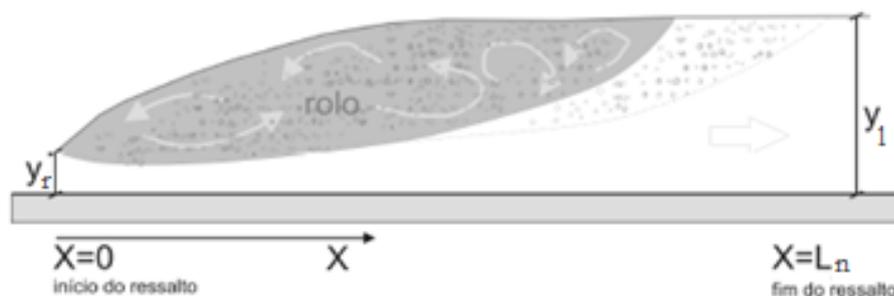


Figura 24: representação esquemática do ressalto hidráulico  
(adaptado de MEES, 2008, p. 7)

Diversos pesquisadores apresentaram trabalhos tentando estabelecer relações que originassem as alturas conjugadas, porém, não existe consenso sobre qual é a mais adequada (WIEST, 2008, p. 9). Desta forma, a mais usual é a fórmula proposta por Bélanger em 1828, definida pela seguinte equação:

$$\frac{y_l}{y_r} = \frac{1}{2} \left( \sqrt{1 + 8 \cdot Fr_r^2} - 1 \right) \quad (\text{equação 3})$$

Onde:

$y_r$  é a altura da lâmina d'água rápida;

$y_l$  é a lâmina d'água lenta;

$Fr_r$  é o número do Froude no início do ressalto.

#### 4.1.4 Comprimentos Característicos do Ressalto

Conforme afirma Wiest (2008, p. 10), “A determinação do comprimento do ressalto é de extrema importância no cálculo de estruturas de dissipação. A partir do conhecimento da extensão dos efeitos do ressalto, é possível garantir a eficiência da estrutura.”. Porém, segundo Trierweiler Neto (2006, p. 15), “Não existe consenso no que diz respeito à determinação do comprimento do ressalto nem a zona do rolo, consideradas muitas vezes coincidentes.”. Na sequência deste trabalho é feita uma abordagem sobre os comprimentos característicos do ressalto hidráulico, que estão ilustrados na figura 25.

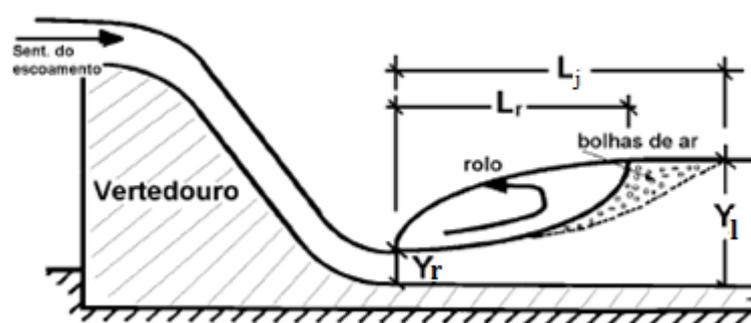


Figura 25: demonstração dos comprimentos do ressalto hidráulico e do rolo (adaptado de ESTRUTURAS..., 2010)

#### 4.1.4.1 Comprimento do Rolo ( $L_r$ )

O comprimento do rolo é mais fácil de ser visualizado do que o comprimento do ressalto. Geralmente esta dimensão é definida como sendo a distância desde a seção onde ocorre a altura conjugada rápida  $y_r$ , até a seção onde a altura da lâmina d'água atinge 90% da altura conjugada lenta  $y_l$ . Entretanto, não há consenso na bibliografia quanto a determinação deste parâmetro. O quadro 1 a seguir apresenta as equações de diversos pesquisadores que estudaram esta dimensão.

Autor	Data	Equação
Safranez	1929	$\left(\frac{L_r}{y_r} = 6 \cdot Fr_r\right)$
Pietrkowski	1932	$\left(\frac{L_r}{y_r} = 5,9 \cdot Fr_r\right)$
Einwachter	1933	$L_r = \left(15,2 - \frac{0,24 \cdot y_l}{y_r}\right) \cdot \left\{ \left(\frac{y_l}{y_r} - 1 - v_r \cdot \left(\frac{y_l}{y_r}\right) - 1\right) \right\}$
Douma	1942	$L_r = 3 \cdot y_l$
Peterka	1957	$L_r = 4,5 \cdot y_l$ $4,5 \leq Fr_r \leq 9$
Newnham	1973	$L_r = 6,73 \cdot (Fr_r - 1)$
Sarma e Newnham	1973	$\frac{L_j}{L_r} = 1,3$
Hager et al	1989	$L_r = -12 + 100 \cdot \tanh\left(\frac{Fr_r}{12,5}\right)$
Marques et al.	1997	$L_r = 6 \cdot (y_l - y_r)$

Quadro 1: equações sugeridas por diversos pesquisadores para determinação do comprimento do rolo  $L_r$ <sup>5</sup>(TRIERWEILER NETO, 2006, p. 22)

#### 4.1.4.2 Comprimento do Ressalto ( $L_j$ )

O comprimento do ressalto é uma das mais difíceis características a ser determinada neste fenômeno, e também não há consenso na bibliografia sobre a determinação desta dimensão. O comprimento  $L_j$  é maior que o comprimento  $L_r$ . Esta extensão vai desde o início do ressalto até a seção onde a altura da lâmina d'água é de aproximadamente 95% da altura conjugada lenta  $y_l$ . As equações sugeridas para determinar esta dimensão estão apresentadas no quadro 2.

<sup>5</sup> Os itens das equações estão especificados na lista de símbolos.

Autor	Data	Equação
Riegel, Beebe	1917	$L_j = 5 \cdot (y_l - y_r)$
Knapp	1932	$L_j = \left[ \left( \frac{62,5 \cdot y_r}{H_r} \right) + 1,13 \right] \cdot \left[ \frac{(v_r - v_l)^2}{2g} - \left( \frac{H_r}{H_l} \right) \right]$ $H = y + \frac{v^2}{2g}$
Woycicki	1934	$L_j = (y_l - y_r) \cdot \left( 8 - \frac{0,05 \cdot y_l}{y_r} \right)$
Smetana	1934	$L_j \cong 6 \cdot (y_l - y_r)$
Chertoussov	1935	$L_j = 10,3 \cdot y_r \cdot (Fr_r - 1)^{0,81}$
Aravin	1935	$L_j = 5,4 \cdot (y_l - y_r)$
Bakhtmeteff-Matzke	1936	$L_j = 5 \cdot (y_l - y_r)$
Ludin	1936	$L_j = \frac{y_l}{0,22 - 0,17 \cdot \frac{v_c}{v_r}}$
Kinney	1941	$L_j = 6,02 \cdot (y_l - y_r)$
Posey	1941	$L_j = 4,5 - 7 \cdot (y_l - y_r)$
Wu	1949	$L_j = 10 \cdot (y_l - y_r) \cdot Fr_r^{-0,16}$
Peterka	1958	$L_j = 6,1 \cdot y_l$ $4,5 \leq Fr_r \leq 9$
Elevatorski	1959	$L_j = 6,9 \cdot (y_l - y_r)$
Silverster	1964	$L_j = 9,75 \cdot y_r \cdot (Fr_r - 1)^{1,01}$
Marques et al.	1997	$L_n = 8,5 \cdot (y_l - y_r)$
Teixeira	2003	$L_n = 8 \cdot (y_l - y_r)$

Quadro 2: equações sugeridas para determinação do comprimento do ressalto hidráulico  $L_j$  <sup>6</sup>(adaptado de ELEVATORSKI, 1959, p. 31)

<sup>6</sup> Os itens das equações estão especificados na lista de símbolos.

#### 4.1.4.3 Comprimento da Influência do Ressalto ( $L_n$ )

O comprimento da influência do ressalto hidráulico sobre o escoamento é uma definição que começou a ser utilizada recentemente para tentar eliminar as dúvidas sobre a determinação dos comprimentos característicos. O final da influência do fenômeno é definido como sendo na seção onde a altura da lâmina d'água atinge a profundidade da altura conjugada lenta  $y_1$  e todas as características do escoamento passam a ser idênticas às características de um escoamento em regime uniforme, isto é, suas características não são mais perturbadas pelo fenômeno ocorrido a montante. As equações para determinação desta dimensão são apresentadas no quadro 3.

Marques et al.	1997	$L_n = 8,5 \cdot (y_l - y_r)$
Teixeira	2003	$L_n = 8 \cdot (y_l - y_r)$

Quadro 3: equações para a determinação do comprimento da influência do ressalto hidráulico  $L_n$ <sup>7</sup>(TRIERWEILER NETO, 2006, p. 22)

#### 4.1.5 Distribuição de Pressões

Embora a distribuição de pressões não faça parte das limitações deste trabalho, é importante salientar que para o dimensionamento de uma estrutura de dissipação não se deve analisar apenas a parte estrutural, mas também a parte hidráulica. Desta forma, torna-se indispensável um estudo sobre a distribuição de pressões<sup>8</sup>.

## 4.2 RESSALTO HIDRÁULICO COMO DISSIPADOR DE ENERGIA

Conforme já mencionado, o ressalto ocorre devido à mudança brusca no regime de escoamento, que passa de supercrítico (no vertedouro) a subcrítico (no leito a jusante da

<sup>7</sup> Os itens das equações estão especificados na lista de símbolos.

<sup>8</sup> Podem ser consultados os trabalhos de Lopardo (1986), Pinheiro (1995), Teixeira (2003), Trierweiler Neto (2006), Wiest (2008), Mees (2008) entre outros.

bacia). Segundo *United States of America* (1987, p. 387), o ressalto que ocorrerá em uma bacia tem características distintas e forma definida, dependendo da relação entre a energia do fluxo que deve ser dissipado e a profundidade do fluxo a jusante. Nesse caso, a função desta bacia tipo I é forçar a ocorrência do ressalto hidráulico ao pé do vertedouro, condição do ressalto tipo A. Cabe ressaltar que o ressalto tipo A forma-se quando a lâmina de água sobre a bacia de dissipação equivale à altura lenta ( $y_1$ ) situada a jusante, sendo que o ressalto se forma inteiramente sobre o canal horizontal, tendo início exatamente no ponto de tangência da curva entre o vertedouro e a bacia de dissipação. Todavia, na prática o mais usual é considerar o ressalto tipo B, isto é, levemente afogado, conforme afirma Wiest (2008, p. 27):

De forma geral, os escoamentos a jusante de vertedouros apresentam a configuração do ressalto de tipo B, isto é, parte do ressalto forma-se sobre o vertedouro e parte sobre a bacia de dissipação. Os ressaltos do tipo A, C e D raramente ocorrem em condições reais de operação deste tipo de estrutura [...].

Segundo Rajaratnam (1995, P. 31) uma bacia de dissipação usando o ressalto clássico como o agente de dissipação é raramente encontrada, porque a altura do leito a jusante, na maioria dos casos práticos varia em uma ampla faixa. O ressalto iria ficar na bacia somente para uma profundidade e para o fluxo igual ao de projeto. Também, a bacia seria muito longa. Portanto, uma alternativa seria a utilização de bacias de dissipação com ressalto forçado, uma vez que diversos projetos compõem este grupo, e os dois projetos geralmente aceitos são as bacias USBR II e USBR III (com blocos anexos que forçam a ocorrência do ressalto).

Todavia, este conceito está sendo revisado, pois se percebeu ao longo do tempo que estes blocos anexos à bacia são muito deteriorados, em função das altas vazões que suportam, o que ocasiona o surgimento de cavitação e erosão nessas estruturas. Então, a partir do momento que estes blocos não mais exercem sua função conforme o projeto, não irão mais interferir no comprimento do ressalto, possibilitando que este se desenvolva fora da bacia e cause erosão no leito a jusante, situação que se necessita evitar. Desta forma, pode-se afirmar que as bacias tipo I são mais adequadas do ponto de vista da segurança e funcionalidade, pois eliminam um possível problema de manutenção.

### 4.3 CRITÉRIOS DE PROJETO

Para dimensionar uma bacia de dissipação por ressalto hidráulico é preciso definir, basicamente, as características do escoamento à entrada da bacia e do escoamento de água na seção de restituição. O dimensionamento destas estruturas implica a determinação dos seguintes parâmetros, de acordo com a figura 26:

- a) velocidade no pé do vertedor ( $v_r$ );
- b) altura da lâmina d'água e número de Froude no início do ressalto ( $y_r$  e  $Fr_r$ );
- c) altura da lâmina d'água no final do ressalto ( $y_l$ );
- d) comprimento da bacia ( $L_b$ );
- e) espessura da bacia e ancoragem ( $e$ );
- f) altura dos muros laterais ( $C_L$ );
- g) raio de transição ( $R$ );
- h) dimensões e forma da soleira.

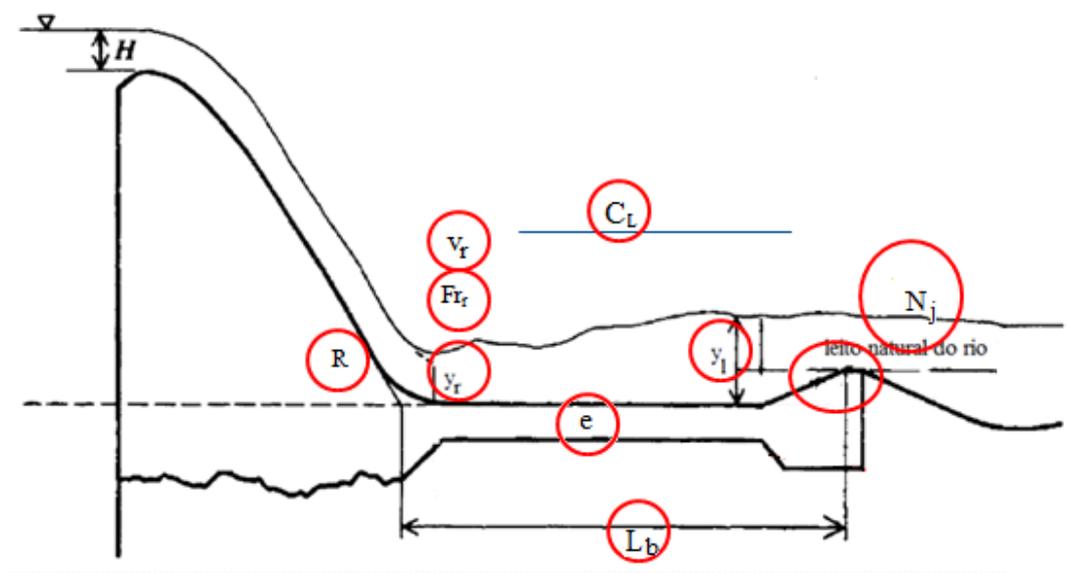


Figura 26: parâmetros a serem definidos para o dimensionamento de uma bacia de dissipação por ressalto hidráulico tipo I (adaptado de NOVAK et al. 2007, p.250)

O projeto dessas estruturas é função necessariamente:

- a) do desnível criado pela construção da obra;
- b) da vazão específica de projeto;
- c) das condições de operação do aproveitamento;

- d) da geologia do local (grau de fraturamento, tipo de rocha, etc.);
- e) do tipo de trecho de implantação da obra (leito encaixado ou espraiado);
- f) dos níveis a jusante da estrutura de dissipação.

Marques (1991, p. 10) afirma que:

A escolha do tipo do dissipador de energia adequado a cada caso depende de inúmeros fatores, tais como:

- topografia e geologia do local;
- tipo de barragem;
- arranjo geral da obra;
- características hidráulicas, como altura de queda e descargas específicas;
- comparação econômica com outros tipos de dissipadores;
- frequência de operação do descarregador de cheias;
- facilidades de manutenção; e
- riscos associados a danos e rupturas.

Ortiz (1982, p. 335) enfatiza que embora todas estas características sejam importantes para o dimensionamento de bacias de dissipação, o conhecimento das velocidades tem particular importância para possibilitar um projeto mais adequado e mais econômico de revestimento do canal a jusante. Outro parâmetro de importância indiscutível é a vazão que vai escoar sobre estas estruturas. A vazão utilizada nos projetos de bacias de dissipação é na maioria dos casos, a cheia máxima de projeto do vertedouro. Salienta-se, contudo, que às vezes pode ser mais econômico assumir um risco e projetar a bacia para uma vazão menor e mais frequente (por exemplo  $Q_{1.000}$  ou menor, em vez da cheia máxima de projeto) e realizar reparos quando a vazão escolhida  $Q$  for ultrapassada.

Muitos cuidados são necessários quando optado por essa alternativa, o projetista responsável deve possuir experiência (NOVAK et al., 2007, p. 254). Pinto ([1987], p. 55) afirma que “O desempenho das bacias de dissipação é em geral otimizado para uma vazão de cheia inferior à cheia máxima de projeto.”. Complementando, Schreiber (1977, p. 18) afirma que o nível d’água correspondente à descarga da enchente máxima deve ser conhecido para o cálculo de uma bacia de dissipação do vertedouro. Os projetos são feitos para obras que funcionarão por muitos anos, porém dispõe-se, geralmente, de dados hidrográficos e meteorológicos somente

em tempos passados para dimensioná-las. Usando esses dados, pressupõe-se que, no futuro, as condições serão as mesmas, ou pelo menos muito semelhantes.

Segundo Mees (2008, p. 13):

No dimensionamento de vertedouros deverão ser consideradas as diferentes situações de escoamento possíveis de ocorrência para reduzir o tamanho da bacia de dissipação. A cota de fundo da mesma é dimensionada em função dos níveis de jusante, para que o ressalto comece junto ao pé da estrutura do vertedouro (ressalto tipo A). Para as demais vazões o ressalto deve ficar mais para montante, ou seja, submerso. O ressalto não deve se deslocar para jusante em momento algum, pois é possível que a turbulência provocada pelo ressalto aja sobre uma região não protegida, provocando danos à estrutura. Esses serão fatores limitantes que devem ser observados no projeto de bacias de dissipação.

Esta afirmação implica então que se o ressalto se posicionar a jusante da condição A (altura conjugada maior que a altura da água no leito do rio), pode se rebaixar à bacia de um valor compatível com  $T_w$  (*Tail Water* — altura da água no leito do rio) aumentando o nível d'água disponível, para que o ressalto se forme em A. Se, por outro lado, o ressalto se formar a montante da condição A (com a altura conjugada menor), é considerado razoável, há um deslocamento do ressalto para montante e este pode ser afogado pelo escoamento. É um projeto seguro, porém não eficiente quanto à dissipação de energia.

Por último, “[...] a escolha de uma determinada estrutura de dissipação e seu correspondente comprimento de transição depende não só de critérios técnicos, mas também de uma análise econômica.” (ORTIZ, 1982, p. 397). Entretanto, este aspecto não será abordado neste trabalho.

## 5 MÉTODO

A metodologia para o dimensionamento de uma bacia de dissipação por ressalto hidráulico implica na análise de uma série de parâmetros, que são detalhados nos próximos itens deste trabalho.

### 5.1 CHEIA DE PROJETO ( $Q_p$ )

A cheia de projeto é um parâmetro de extrema importância para o dimensionamento de uma obra hidráulica pois está diretamente relacionada com a importância da mesma e o potencial do risco, caso ocorra uma ruptura. Para definir esta vazão de projeto devem ser utilizados os quadros 4 a 6, ilustrados abaixo. Porém, independente da vazão escolhida, o dissipador deverá ser capaz de suportar uma vazão efluente máxima maximorum ( $Q_{máxmax}$ ).

A partir desta análise e das características da barragem, é possível determinar o tempo de recorrência ( $Tr$ ) a ser considerado para o dimensionamento da obra. Cabe ressaltar que, se nesta análise os quadros fornecerem categoria, risco ou  $Tr$  diferentes, deve ser adotado sempre o caso mais desfavorável, isto é, o maior potencial de risco, a maior categoria de barragem e o maior  $Tr$ , a fim de garantir a segurança da estrutura.

Os quadros 4 e 5 abaixo são propostas pelo Comitê Brasileiro de Grandes Barragens (CBGB) para definir a cheia de projeto. Já o quadro 6 é o critério sugerido pela Eletrobrás.

Categoria	Capacidade do reservatório (hm <sup>3</sup> )	Altura da barragem (m)
Pequena	1	5 a 10
Média	1 a 50	10 a 30
Grande	≥ 50	≥ 30

Quadro 4: classificação de barragens de acordo com a capacidade do reservatório e a altura (PINTO, [1987], p. 3)

Risco	Dimensão	Tempo de recorrência (Tr) da Cheia de Projeto (Q <sub>p</sub> )
	Pequena	50 a 100 anos
Baixo	Média	100 a ½ CMP
	Grande	½ CMP a 1 CMP
	Pequena	100 a ½ CMP
Médio	Média	½ CMP a 1 CMP
	Grande	1 CMP
	Pequena	½ CMP a 1 CMP
Alto	Média	1 CMP
	Grande	1 CMP

Quadro 5: cheia máxima provável (CMP) para projeto de vertedouros (PINTO, [1987], p. 4)

Tempo de recorrência Tr (anos)	Vida Útil da Usina n (anos)	Risco	Caso
500	20	3,9	geral
500	50	9,5	geral
1.000	20	2,0	perigo de sérios danos materiais a jusante
1.000	50	4,9	perigo de danos humanos a jusante
10.000	20	0,2	idem
10.000	50	0,5	idem
10.000	100	1,0	idem

Quadro 6: tempo de recorrência para vertedouros de Pequenas Centrais Hidrelétricas (MARQUES, 2010)

No Brasil utiliza-se, normalmente, a cheia decamilenar  $Q_{10.000}$  como sendo a cheia máxima provável (CMP) em projetos de grandes barragens. Para estruturas que são projetadas para suportar galgamento é recomendado um Tr superior a 500 anos. Com base nos quadros

fornecidos anteriormente, a escolha definitiva da cheia de projeto deve obedecer aos seguintes critérios mínimos:

- a) a vida econômica de uma barragem deve ser maior ou igual a 100 anos;
- b) a vazão de projeto do vertedouro  $Q_p \geq 100$  anos de  $T_r$ ;
- c)  $Q_{CMP} \geq Q_p \geq Q_{100}$ , isto é, a vazão de projeto do vertedouro deve estar entre a cheia máxima provável e a cheia de 100 anos de  $T_r$ ;
- d)  $Q_{10.000} \leq Q_{\max\max} \leq Q_{CMP}$ , isto é, a cheia máxima maximorum deve estar compreendida entre as cheias de 10.000 de tempo de retorno e a cheia máxima provável (FONTENELLE, 2007<sup>9</sup> apud MARQUES, 2010);
- e) se  $Q_{\max} > 3 Q_{100}$ , esta obra necessita de um vertedouro de emergência.

## 5.2 LARGURA DA BACIA (B)

A largura da bacia (B) deve ser definida a partir das características do vertedouro, da topografia e geologia do local e o custo da construção. Geralmente esta dimensão é determinada a partir do comprimento do vertedouro, sendo necessário verificar se existe algum fator que vai influenciar no aumento desta dimensão, isto é, existência de pilares, mudança de seção ao longo do traçado do canal de descarga, etc. De um modo geral, a largura da bacia de dissipação será a soma dos vãos de vertedouro mais a espessura dos pilares.

## 5.3 CARACTERÍSTICAS DO RESSALTO HIDRÁULICO

As características do ressalto hidráulico, conforme apresentado na revisão bibliográfica, são definidas pela velocidade do escoamento no início do ressalto ( $v_r$ ), as alturas conjugadas rápida ( $y_r$ ) e lenta ( $y_l$ ) e o número de Froude ( $Fr_r$ ) no trecho rápido. A figura 27 ilustra estes parâmetros.

---

<sup>9</sup> FONTENELLE, A. de S. **Proposta Metodológica de Avaliação de Riscos em Barragens do Nordeste Brasileiro**. 2007. 213f. Tese (Doutorado) — Universidade Federal do Ceará, Fortaleza.

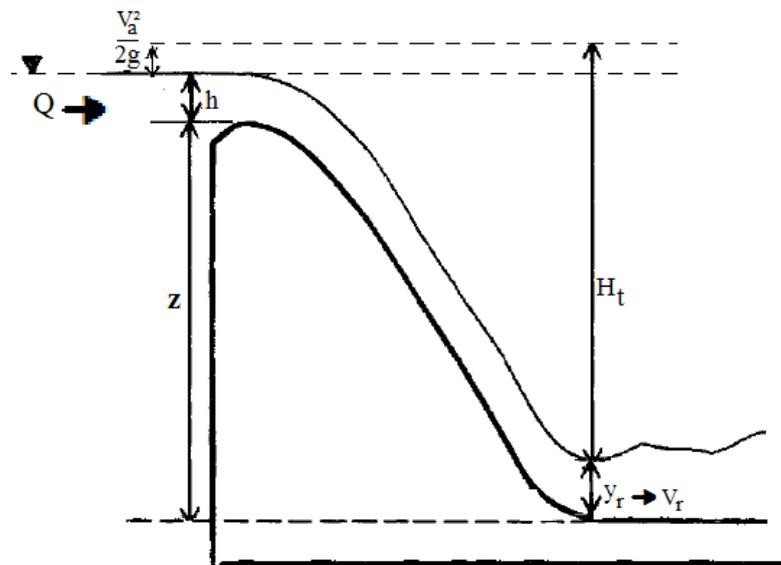


Figura 27: parâmetros para definição das características do ressalto hidráulico  
(adaptado de NOVAK et al. 2007, p.250)

A velocidade  $v_r$  é definida de forma iterativa a partir de dois pontos conhecidos. Neste caso os pontos são o início do ressalto, onde ocorre  $v_r$  e o topo do vertedouro, que é onde se conhece a altura da lâmina d'água  $h$  e a velocidade de aproximação  $v_a$ . Procede-se o cálculo aplicando a equação de Bernoulli, que é calculada por:

$$y_r + \frac{v_r^2}{2 \cdot g} = H_T \quad (\text{equação 4})$$

$$H_T = z + h + \frac{v_a^2}{2 \cdot g} \quad (\text{equação 5})$$

Onde:

$y_r$  é a altura da lâmina d'água no início do ressalto (trecho rápido);

$v_r$  é a velocidade no trecho rápido;

$g$  é a aceleração da gravidade;

$H_T$  é a carga a montante;

$z$  é a cota na crista do vertedouro;

$h$  é a altura da lâmina d'água no vertedouro;  
 $v_a$  é a velocidade de aproximação.

Inicia-se o cálculo adotando-se que  $z_r$  está na altura zero, então  $z$  será a altura do vertedouro, estima-se que  $y_{r(0)}$  é zero e pela equação de Bernoulli encontra-se uma velocidade  $v_{r(1)}$ :

$$0 + \frac{v_{r(1)}^2}{2 \cdot g} = z + h + \frac{v_a^2}{2 \cdot g} \quad (\text{equação 6})$$

$$v_{r(1)} = \sqrt{2 \cdot g \cdot H_T} \quad (\text{equação 7})$$

Com a velocidade  $v_{r(1)}$ ; na equação da continuidade encontra-se  $y_{r(1)}$ :

$$y_{r(1)} = \frac{Q}{v_{r(1)} \cdot B} \quad (\text{equação 8})$$

Inicia-se uma nova iteração utilizando  $y_{r(1)}$  na equação de Bernoulli e segue-se com o cálculo até a convergência.

$$y_{r(n)} + \frac{v_{r(n+1)}^2}{2 \cdot g} = z + h + \frac{v_a^2}{2 \cdot g} \quad (\text{equação 9})$$

Encontrado os parâmetros  $v_r$  e  $y_r$ , o próximo passo é calcular o número de Froude no início do ressalto,  $Fr_r$ :

$$Fr_r = \frac{v_r}{\sqrt{g \cdot y_r}} \quad (\text{equação 10})$$

Onde:

$Fr_r$  é o número de Froude no trecho rápido;

$v_r$  é a velocidade no trecho rápido;

$y_r$  é a altura conjugada rápida.

Após, calcula-se a altura conjugada lenta  $y_l$  pela equação proposta por Bélanger anteriormente mencionada:

$$\frac{y_l}{y_r} = \frac{1}{2} \left( \sqrt{1 + 8 \cdot Fr_r^2} - 1 \right) \quad (\text{equação 3})$$

Onde:

$y_l$  é a altura conjugada lenta;

$y_r$  é a altura conjugada rápida;

$Fr_r$  é o número de Froude no trecho rápido.

#### 5.4 COTA DE FUNDO ( $C_f$ )

A cota de fundo  $C_f$  deve ser definida de forma que o ressalto seja formado sempre na posição A (transição do vertedouro para a bacia de dissipação) ou à montante desta, independente da vazão que estiver ocorrendo (figura 28). Esta condição é de fundamental importância pois garante que para as diferentes vazões que possam ocorrer, o ressalto sempre ficará contido dentro da bacia de dissipação, isto é, para determinadas vazões o fenômeno terá início sobre o vertedouro e para outras, esta posição inicial poderá se mover, mas nunca para um ponto mais a jusante do que a posição A.

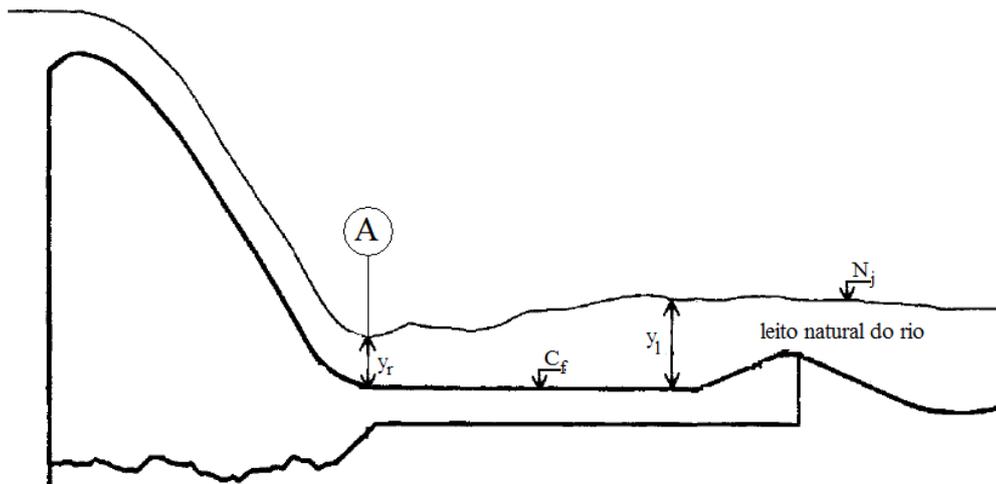


Figura 28: cota de fundo da bacia de dissipação de energia e demonstração da posição A, limite para o início do ressalto hidráulico (adaptado de NOVAK et al. 2007, p.250)

A determinação da cota de fundo  $C_f$  de uma bacia de dissipação consiste em analisar a curva chave do escoamento, que é a curva que correlaciona vazão e profundidade de fluxo, isto é, associa para uma determinada vazão qual será o nível d'água naquela seção. Na sequência, deve-se verificar qual será a cota do nível de jusante ( $N_j$ ) para uma série de vazões e qual será  $y_1$  requerida para cada uma delas. Esta comparação vai resultar em quatro casos diferentes e a partir da interpretação destes será possível determinar se há a necessidade rebaixar a  $C_f$  da bacia de dissipação e para que faixas de vazões ( $Q$ ) esta solução deverá ser projetada.

No primeiro resultado, denominado **caso I**, a profundidade do  $N_j$  é sempre menor que a  $y_1$  requerida para a formação do ressalto hidráulico (figura 29). Sendo assim, o fenômeno não ocorre na posição A (ilustrado anteriormente), e sim num local mais a jusante onde, somente após a formação de uma curva de remanso as profundidades  $N_j$  e  $y_1$  ficam adequadas para a formação do ressalto. Quando for esta a relação existente, é preciso rebaixar a  $C_f$  da bacia de dissipação até uma cota que seja compatível com a altura  $y_1$  requerida para que ocorra o ressalto na posição desejada.

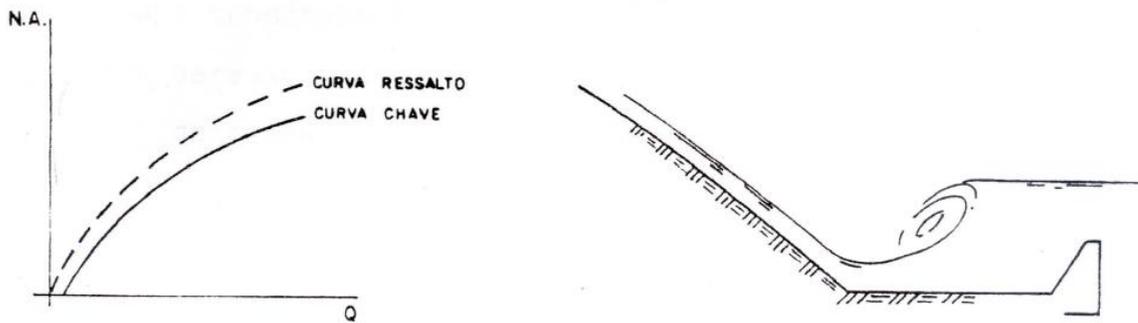


Figura 29: relação da curva chave com a curva do ressalto quando o nível de jusante  $N_j$  é insuficiente para a altura  $y_1$  requerida (TAMADA, [1991], p. DIS-2)

O **caso II** caracteriza-se pela condição de que a profundidade do  $N_j$  é sempre superior a altura  $y_1$  necessária para formar o ressalto hidráulico, conforme ilustrado na figura 30. Neste caso sempre irá formar um ressalto hidráulico na posição A e a tendência é que ele ocorra afogado, ou seja, seu início será sobre a parede inclinada do vertedouro.

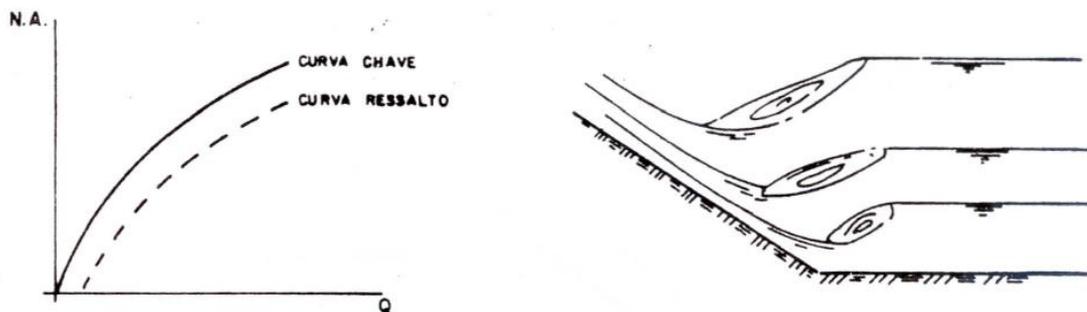


Figura 30: relação da curva chave com a curva do ressalto quando  $N_j$  é suficiente para o  $y_1$  requerido e demonstração dos ressaltos possíveis de se formarem (TAMADA, [1991], p. DIS-2)

No **caso III** ocorrem duas situações: para as vazões mais baixas, a curva da altura requerida  $y_1$  do ressalto está acima da curva chave  $N_j$  e para as vazões mais altas, a curva da altura requerida  $y_1$  do ressalto está abaixo da curva chave  $N_j$  (figura 31). Neste caso, a  $C_f$  será determinada utilizando-se como referência as vazões mais baixas, o que implica na necessidade de rebaixamento da bacia de dissipação até uma cota que altura  $y_1$  requerida para que ocorra o ressalto na posição desejada seja compatível com o  $N_j$ .



Figura 31: relação da curva chave com a curva do ressalto quando esta tem comportamento diferente em função da vazão e demonstração dos ressaltos possíveis de serem formados (TAMADA, [1991], p. DIS-3)

No **caso IV** ocorre o oposto do anterior, isto é, para vazões baixas a curva da altura  $y_1$  requerida pelo ressalto fica abaixo da curva chave  $N_j$  e para vazões altas a curva da altura  $y_1$  requerida do ressalto fica acima da curva chave (figura 32). Com estas condições, a  $C_f$  será determinada utilizando-se como referência as vazões mais altas, o que implica na necessidade de rebaixamento da bacia de dissipação até uma cota que a altura  $y_1$  requerida seja compatível com o  $N_j$ , no intuito de induzir a formação do ressalto na posição desejada.

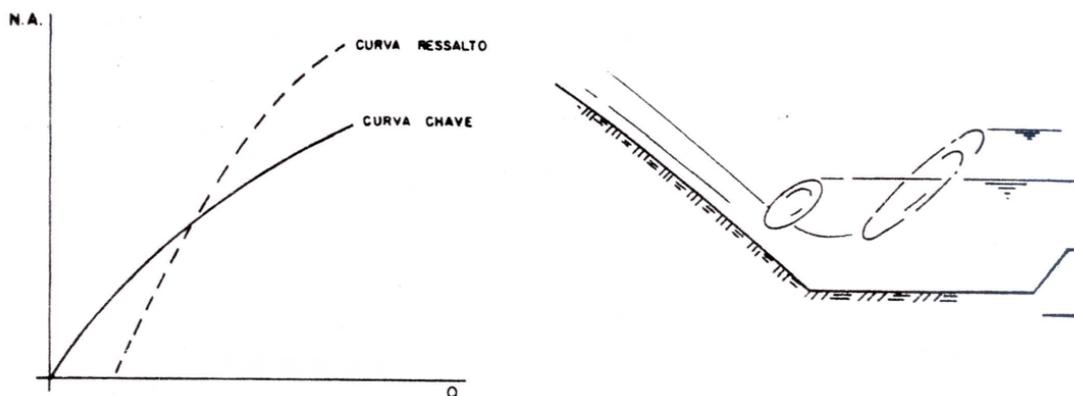


Figura 32: relação da curva chave com a curva do ressalto quando esta tem comportamento diferente em função da vazão e demonstração dos ressaltos possíveis de se formarem (TAMADA, [1991], p. DIS-3)

A partir da análise da relação entre as curvas do ressalto hidráulico e a curva chave, é possível saber quais vazões vão definir o dimensionamento da estrutura e pode-se determinar a cota de fundo do dissipador através da seguinte equação:

$$C_f = N_j - \alpha \cdot y_l \quad (\text{equação 11})$$

$$\alpha = \frac{Tw}{y_l} \quad (\text{equação 12})$$

Onde:

$C_f$  é a cota de fundo;

$N_j$  é o nível de jusante;

$\alpha$  é um fator de correção geralmente  $1,05 \leq \alpha \leq 1,10$  (pode variar desta faixa, depende da confiabilidade da curva chave adotada no dimensionamento);

$y_l$  é a altura conjugada lenta;

$Tw$  é a altura da lâmina d'água no leito do rio.

## 5.5 COMPRIMENTO DA BACIA ( $L_b$ )

O comprimento  $L_b$  da bacia depende, fundamentalmente, do comprimento característico do ressalto, pois este deve ocorrer dentro (ou parcialmente dentro) da estrutura de forma a não danificar o leito a jusante. De acordo com a revisão bibliográfica, viu-se que não há um consenso sobre o cálculo desta dimensão do fenômeno, devendo-se então analisar as diversas equações apresentadas pelos vários pesquisadores. Alguns destes sugerem utilizar para o dimensionamento da estrutura de dissipação o comprimento do rolo  $L_r$  outros indicam o comprimento do ressalto hidráulico  $L_j$ , ou ainda o comprimento da influência do ressalto sobre o escoamento  $L_n$ .

Desta forma, baseando-se no comprimento do rolo  $L_r$ , a equação mais utilizada é a proposta por Peterka:

$$L_r = 4,5 \cdot y_l, \text{ para } 4,5 \leq Fr \leq 9,0 \quad (\text{equação 13})$$

Onde:

$L_r$  é o comprimento do rolo;  
 $y_l$  é a altura conjugada lenta;  
 $Fr$  é o número de Froude.

Considerado o comprimento do ressalto  $L_j$  ou o comprimento da influência  $L_n$  para dimensionar a estrutura de dissipação, as equações mais utilizadas são as propostas por Smetana, Peterka, Elevatorski, Marques et al. e Teixeira:

$$L_j \cong 6 \cdot (y_l - y_r) \quad (\text{equação 14})$$

$$L_j = 6,1 \cdot y_l \quad (\text{equação 15})$$

$$L_j = 6,9 \cdot (y_l - y_r) \quad (\text{equação 16})$$

$$L_n = 8,5 \cdot (y_l - y_r) \quad (\text{equação 17})$$

Onde:

$L_j$  é o comprimento do ressalto;  
 $L_n$  é o comprimento da influencia do ressalto;  
 $y_l$  é a altura conjugada lenta;  
 $y_r$  é a altura conjugada rápida.

Existe ainda um método de dimensionamento, proposto por Elevatorski, que deve ser analisado independente dos resultados das equações apresentadas, pois ele é determinado em função das características geológicas do local, isto é, se forem encontrados **solos facilmente erodíveis** a bacia de dissipação deve ter um comprimento  $L_b$  no mínimo igual a  $L_r$ , para a CMP ou  $Q_{10.000}$ . Para as vazões  $Q_p$  e  $Q_{100}$  este comprimento  $L_b$  deve ser igual ou maior que os comprimentos sugeridos, conforme é definido nas equações abaixo:

$$L_b = 8 \cdot (y_l - y_r), \text{ para } Q_{100} \quad (\text{equação 18})$$

$$L_b = 6,9 \cdot (y_l - y_r), \text{ para } Q_p \quad (\text{equação 19})$$

$$L_b = 6 \cdot (y_l - y_r), \text{ para } Q_{10.000} \quad (\text{equação 20})$$

Onde:

$L_b$  é o comprimento da bacia de dissipação;

$y_l$  é a altura conjugada lenta;

$y_r$  é a altura conjugada rápida.

Porém, se a geologia for composta por **solos não facilmente erodíveis**, o comprimento da bacia de dissipação  $L_b$  deve ser definido a partir das equações abaixo para a cheia de projeto escolhida, para  $Q_{10.000}$  e para  $Q_{100}$ :

$$L_b = 6 \cdot (y_l - y_r), \text{ para } Q_{100} \quad (\text{equação 21})$$

$$L_b \cong 4,2 \cdot (y_l - y_r), \text{ para } Q_p \quad (\text{equação 22})$$

$$L_b = 2,4 \cdot (y_l - y_r), \text{ para } Q_{10.000} \quad (\text{equação 23})$$

Onde:

$L_b$  é o comprimento da bacia de dissipação;

$y_l$  é a altura conjugada lenta;

$y_r$  é a altura conjugada rápida.

Após determinar os comprimentos  $L_r$ ,  $L_j$ ,  $L_n$  e analisar os critérios sugeridos por Elevatorski em 1959, o comprimento  $L_b$  a ser adotado deverá sempre ser escolhido de acordo com as condições geológicas de jusante, isto é, nem sempre precisa ser o maior comprimento fornecido pelas equações, desde que a geologia não ofereça risco a segurança da estrutura.

## 5.6 SOLEIRA TERMINAL

A soleira terminal, ou *end sill*, é uma estrutura que auxilia na diminuição do impacto do fluxo d'água com o leito de jusante com o objetivo de proteger a obra das possíveis erosões. No tipo de dissipador estudado esta soleira tem a geometria conforme a figura 33 e é contínua por toda largura do dissipador.

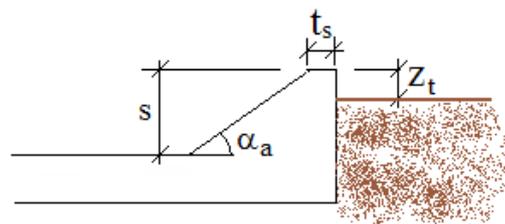


Figura 33: soleira terminal de uma bacia de dissipação por ressalto hidráulico tipo I

O dimensionamento deste limite da bacia deverá obedecer às recomendações sugeridas no trabalho de Peterka, proposto em 1959, ou deverá considerar resultados obtidos em análises de modelos reduzidos. De uma forma geral, a geometria pode ser definida por uma soleira com inclinação  $\alpha_a \approx 20^\circ$  (1V:2H) e com as seguintes dimensões:

$$\frac{(y_r + z_t)}{y_r} \geq 1,05 \rightarrow 1,10 \quad (\text{equação 24})$$

$$\frac{(s - z_t)}{H_t} \leq 0,14 \quad (\text{equação 25})$$

$$t_s \geq 0,20m \quad (\text{equação 26})$$

Onde:

$s$  é a altura da soleira;

$z_t$  é uma diferença de cota entre a soleira e o leito de jusante para garantir que materiais não entrem na bacia;

$H_t$  é a energia de montante;

$y_1$  é a altura conjugada lenta do ressalto;

$t_s$  é a largura do topo da soleira terminal.

## 5.7 ALTURA DOS MUROS LATERAIS ( $C_L$ )

Os muros laterais da bacia de dissipação deverão ter a dimensão superior à altura conjugada lenta  $y_1$  para qualquer vazão que ocorra, protegendo o terreno ou estruturas anexas contra o escoamento turbulento. Estes muros tem sua cota inferior igual a cota de fundo  $C_f$  da bacia, seu comprimento será o mesmo que o da bacia ( $L_b$ ) e podem apresentar muros alas na sua extremidade, para proteger a barragem das corrente de retorno. A cota superior  $C_L$  é calculada a partir da cota do nível de jusante  $N_j$ , de acordo com as equações:

$$C_L = N_j + f \quad (\text{equação 27})$$

$$f = 0,1 \cdot (y_r + y_l) \quad (\text{equação 28})$$

Onde:

$C_L$  é a cota superior dos muros laterais;

$N_j$  é o nível d'água de jusante;

$f$  é a folga que deve ser deixada em relação ao nível de jusante;

$y_r$  é a altura conjugada rápida;

$y_l$  é a altura conjugada lenta.

Existem ainda alguns critérios que são sugeridos para o dimensionamento destes muros, independente dos valores encontrados com as equações acima. São eles:

- a)  $C_L \geq 1,1 \cdot N_j$ , para  $Q_{100}$ ;
- b)  $C_L \geq N_j + 1,0$ , para  $Q_P$ ;
- c)  $C_L \geq N_j$ , para  $Q_{10.000}$ .

A altura  $C_L$  deverá ser o maior dos valores encontrados pelas equações e pelas especificações acima.

## 5.8 DETERMINAÇÃO DO RAIOS DE TRANSIÇÃO (R)

O raio de transição ideal entre a laje de fundo e o perfil do vertedouro (figura 34) é definido por:

$$\frac{R}{y_r} \geq 10 \quad \text{(equação 29)}$$

Onde:

$R$  é o raio de transição entre a laje de fundo e o vertedouro;

$y_r$  é a altura conjugada rápida.

Quando for considerada a  $Q_{10.000}$ , este raio pode ser definido por:

$$\frac{R}{y_r} \geq 5 \quad \text{(equação 30)}$$

Onde:

$R$  é o raio de transição entre a laje de fundo e o vertedouro;

$y_r$  é a altura conjugada rápida.

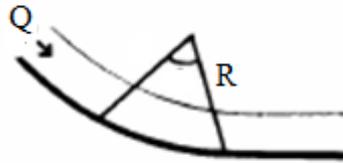


Figura 34: raio de transição entre a laje de fundo e o vertedouro

### 5.9 ESPESSURA DA BACIA E ANCORAGEM (e)

A espessura da laje de fundo deverá ser dimensionada considerando a subpressão máxima e o carregamento mínimo sobre a mesma. Este assunto não será desenvolvido aqui por não estar na limitação do trabalho<sup>10</sup>.

---

<sup>10</sup> Para melhor compreensão, recomenda-se ver Pinheiro (1995) e Mees (2008).

## 6 APLICAÇÃO DOS CRITÉRIOS A UM CASO HIPOTÉTICO

A seguir é apresentada uma aplicação dos critérios de dimensionamento a dois casos hipotéticos. Para o dimensionamento é necessário que se tenha em mãos os estudos hidrológicos, geológicos e geotécnicos além do arranjo básico da obra.

### 6.1 BARRAGEM DE GRANDE ALTURA

Dados já determinados para o dimensionamento do vertedouro:

a) características do vertedouro (obtidos do arranjo básico da obra):

- altura: 38,00 m;
- comprimento da crista do vertedouro: 415,60 m;
- cota da crista do vertedouro: 313,00 m.

b) vazões de projeto (obtidos do estudo hidrológico):

- $Q_{100}$ : 13.500 m<sup>3</sup>/s;
- $Q_{1.000}$ : 27.000 m<sup>3</sup>/s;
- $Q_{10.000}$ : 40.000 m<sup>3</sup>/s.

c) níveis de jusante (obtidos do estudo hidrológico e figura 36):

- $Q_{100}$ :  $N_j = 286,00$  m;
- $Q_{1.000}$ :  $N_j = 285,00$  m;
- $Q_{10.000}$ :  $N_j = 284,00$  m.

d) geologia não facilmente erodível (obtido a partir dos estudos geológicos e geotécnicos);

e) fixação da cota de fundo inicial da bacia em 258,00 m.

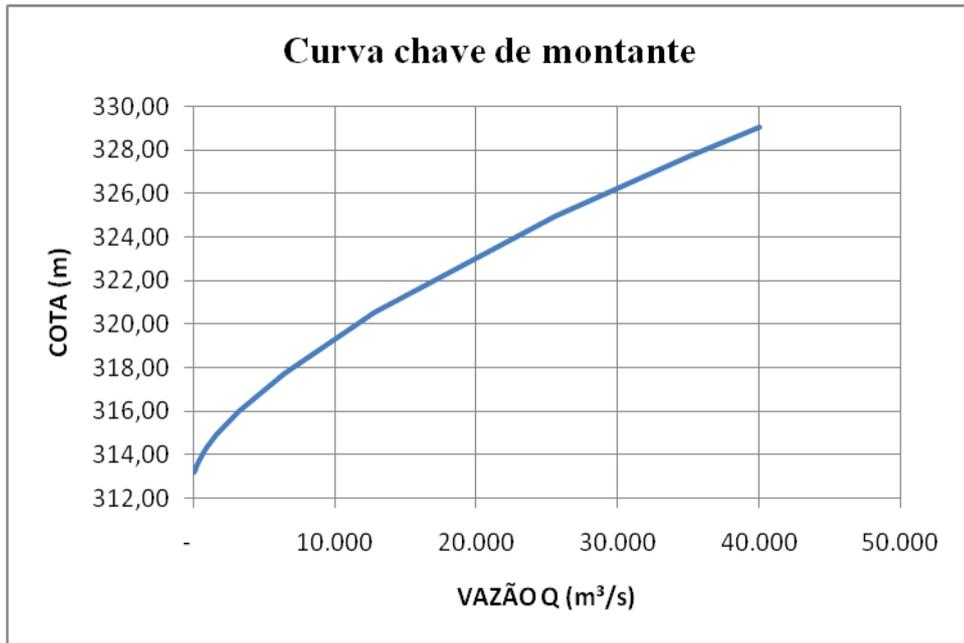


Figura 35: curva chave de montante de uma barragem de grande altura do caso hipotético (obtido do estudo hidrológico)

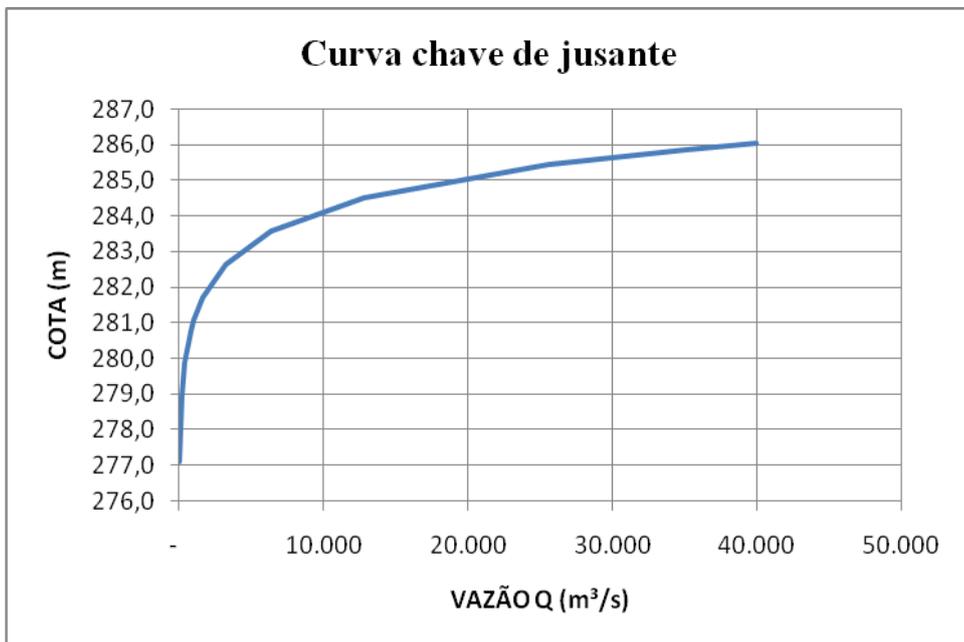


Figura 36: curva chave de jusante de uma barragem de grande altura do caso hipotético (obtido do estudo hidrológico)

A partir da figura 35 retira-se os valores das cargas a montante para as vazões de projeto, resultando nos valores do quadro 7.

Q (m <sup>3</sup> /s)	40.000	27.000	13.500
Tr (anos)	10.000	1.000	100
Cota a montante (m)	329,00	326,00	321,00
Carga sobre a crista do vertedouiro h (m)	16,00	13,00	8,00
H <sub>T</sub>	51,12	48,99	44,92

Quadro 7: valores das cargas a montante para as vazões de projeto

Partindo-se de uma cota fixada inicialmente e através de iterações (utilizando a metodologia exposta anteriormente), chegou-se aos resultados do quadro 8.

Q (m <sup>3</sup> /s)	40.000	27.000	13.500
Tr (anos)	10.000	1.000	100
C <sub>f</sub>	258,00	262,35	268,55
T <sub>w</sub>	21,00	20,00	19,00

Quadro 8: cota de fundo calculada e T<sub>w</sub> após o rebaixamento do dissipador

Como a bacia de dissipação deve atender a todas as vazões, deve-se adotar para a cota de fundo um valor inferior ou igual ao da menor cota calculada, que no caso é 258,00m.

Utilizando-se as equações apresentadas no ítem 5.3, é possível calcular as características do ressalto para o caso em que a bacia é colocada na cota fixa 258,00m para diferentes vazões (quadro 9).

Q (m <sup>3</sup> /s)	40.000	27.000	13.500	Equação
Tr (anos)	10.000	1.000	100	
y <sub>r</sub>	2,43	1,65	0,85	8
v <sub>r</sub>	39,54	39,27	38,09	7
Fr <sub>r</sub>	8,09	9,75	13,17	10
y <sub>l</sub>	26,67	22,00	15,47	3

Quadro 9: características do ressalto para estrutura fixada na cota 258,00m

Para a verificar se a cota de fundo do terreno natural permite a formação do ressalto a montante do ponto de concordância A, é necessário calcular o nível de jusante requerido ( $N_{j\text{-requerido}}$ ) através da equação 11 e fixar o coeficiente de segurança  $\alpha$ , adotado o valor de  $\alpha = 1,05$ . A partir comparação da curva chave de jusante com a curva do  $N_{j\text{-requerido}}$  é verificado se a cota fixada foi adequada (figura 37):

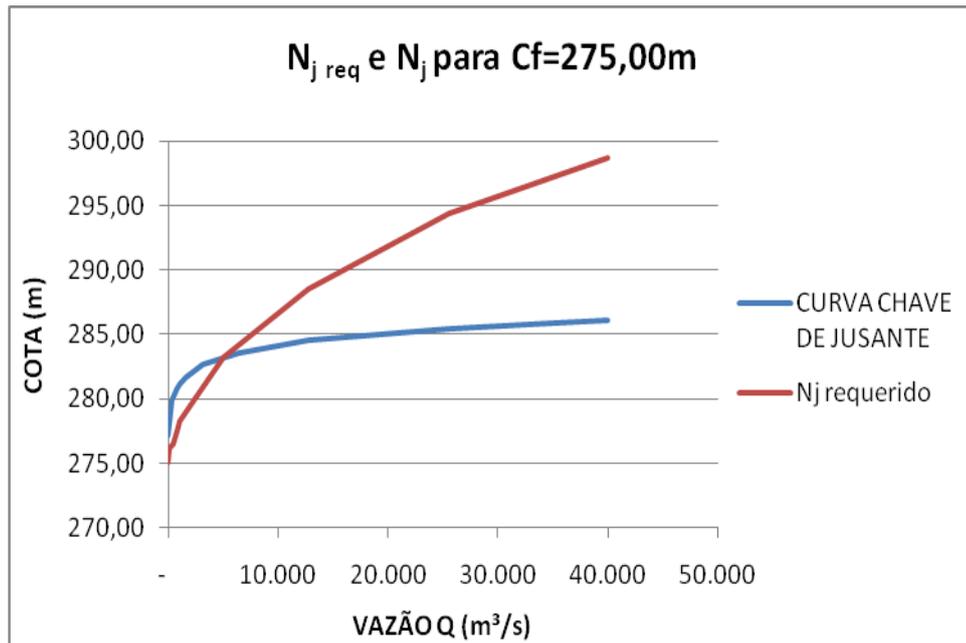


Figura 37: curva chave de jusante e nível de jusante requerido para a cota fixada inicialmente em 275,00 m

Observa-se que a cota não é adequada, pois esta ilustração se assemelha a figura 32, então há necessidade de rebaixar a cota de fundo  $C_f$ . Para se fixar a próxima cota, pode-se utilizar um valor de  $C_f$  igual ou menor que o menor dos valores obtido para a cota de fundo através da equação 11 (conforme quadros 8 e 9), desde que satisfaça a condição da formação do ressalto no ponto de concordância. A partir desta ilustração é possível identificar que serão as altas vazões que vão determinar a cota de fundo do dissipador.

Neste caso hipotético, em função dos valores de  $C_f$  encontrados (quadro 8) foi adotado 258,00m como nova cota de fundo, chegando-se a configuração ilustrada na figura 38, onde se pode observar que o  $N_{j\text{-requerido}}$  está sempre a abaixo da curva chave natural, evidenciando que esta nova cota de fundo pode ser adotada.

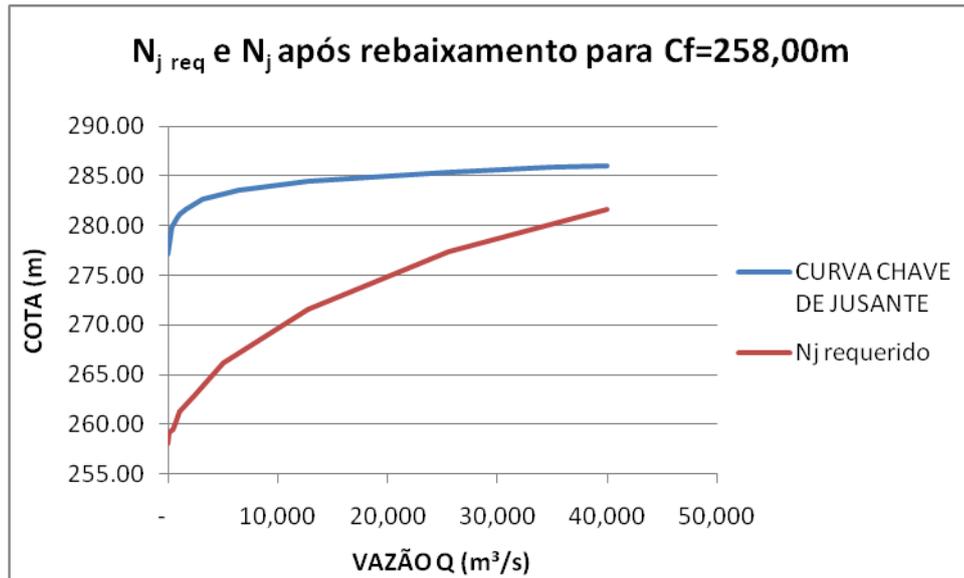


Figura 38: curva chave de jusante e nível de jusante requerido após rebaixamento do dissipador para a cota de 258,00 m

Para o cálculo do comprimento da bacia foram utilizadas as equações 21, 22 e 23, por se tratar de um caso de geologia não facilmente erodível. Os valores encontrados estão apresentados no quadro 10 para cada vazão.

Q (m <sup>3</sup> /s)	40.000	27.000	13.500
Tr (anos)	10.000	1.000	100
L <sub>b</sub> (não facilmente erodível)	58,17	121,42	87,68

Quadro 10: comprimentos da bacia (L<sub>b</sub>) calculados

O comprimento da bacia adotado deverá ser um que atenda a todas as vazões. Verificando os dados acima observa-se que a vazão que está comandando o comprimento da bacia é a vazão de 1.000 anos de recorrência, ou seja, a bacia de dissipação deverá ter um comprimento mínimo L<sub>b</sub> = 121,50 m.

Para o dimensionamento da soleira terminal devem se utilizadas as equações do item 5.6. Os resultados no quadro 11 indicam que a vazão que está comandando o dimensionamento da soleira terminal é a vazão de 10.000 anos.

Q (m <sup>3</sup> /s)	40.000	27.000	13.500
Tr (anos)	10.000	1.000	100
z <sub>t</sub>	0,24	0,17	0,09
s <sub>≤</sub>	11,41	11,00	10,44

Quadro 11: dimensionamento da soleira terminal

A determinação da cota do muro lateral da bacia é feita utilizando-se as equações do item 5.7. Pela análise dos dados (quadro 12), observa-se que a vazão que está comandando o dimensionamento dos muros laterais da bacia é a vazão de 10.000 anos de Tr, sendo adotado no mínimo uma cota lateral de  $C_L = 289,00$  m.

Q (m <sup>3</sup> /s)	40.000	16.000	13.500
Tr (anos)	10.000	1.000	100
N <sub>j</sub> (m)	286,00	285,00	284,00
f	2,91	2,36	1,63
C <sub>L</sub>	288,91	287,36	285,63

Quadro 12: determinação da cota dos muros laterais

O raio de transição entre o perfil do vertedouro e a laje de fundo é dado a partir das equações 29 e 30. Pela análise dos resultados no quadro 13, observa-se que a vazão que está comandando a escolha do raio de transição é a vazão de 1.000 anos, sendo então adotado um raio de no mínimo 17,00 m.

Q (m <sup>3</sup> /s)→	40.000	16.000	13.500
Tr (anos)	10.000	1.000	100
R	12,17	16,67	8,53

Quadro 13: raios de transição calculados

A seguir é apresentado um croqui (figura 39) das características da bacia de dissipação por ressalto hidráulico que deveria ser adotada neste caso hipotético.

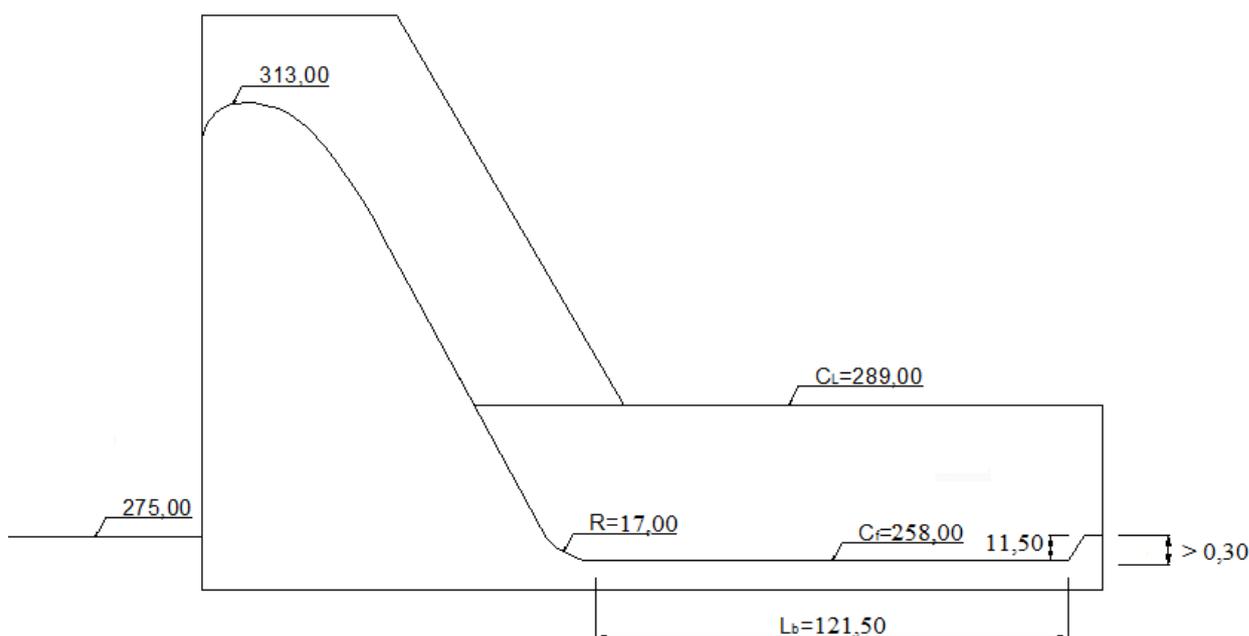


Figura 39: croqui de solução a ser adotada no caso hipotético de uma barragem de grande altura

## 6.2 BARRAGEM DE PEQUENA ALTURA

Dados já determinados para o dimensionamento do vertedouro:

a) características do vertedouro (obtidos do arranjo básico da obra):

- altura: 10,00 m;
- comprimento da crista do vertedouro: 92,00 m;
- cota da crista do vertedouro: 152,00 m.

b) vazões de projeto (obtidos do estudo hidrológico):

- $Q_{100}$ : 338,69 m<sup>3</sup>/s;
- $Q_{1.000}$ : 483,18 m<sup>3</sup>/s;
- $Q_{10.000}$ : 627,42 m<sup>3</sup>/s.

c) níveis de jusante (obtidos do estudo hidrológico e figura 41):

- $Q_{100}$ :  $N_j = 145,00$  m;
- $Q_{1.000}$ :  $N_j = 145,80$  m;
- $Q_{10.000}$ :  $N_j = 146,50$  m.

- d) geologia não facilmente erodível (obtido a partir dos estudos geológicos e geotécnicos);
- e) fixação da cota de fundo da bacia para uma cota de 142,00 m (nível do terreno natural).

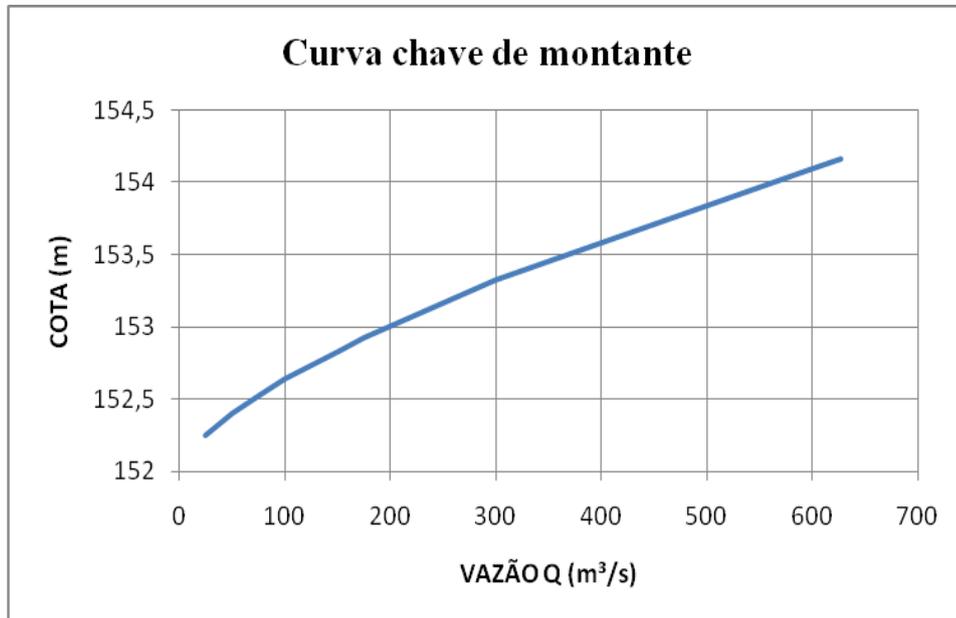


Figura 40: curva chave de montante de uma barragem de pequena altura do caso hipotético (obtido do estudo hidrológico)

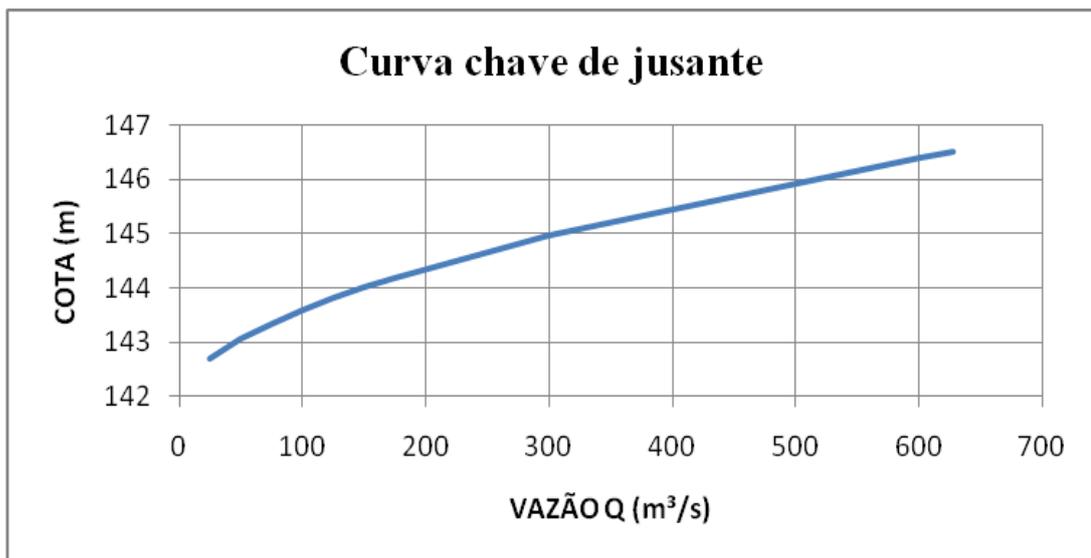


Figura 41: curva chave de jusante de uma barragem de pequena altura do caso hipotético (obtido do estudo hidrológico)

A partir da figura 40 retira-se os valores das cargas a montante para as vazões de projeto, resultando nos valores do quadro 14.

Q (m <sup>3</sup> /s)	627,42	483,18	338,69
Tr (anos)	10.000	1.000	100
Cota a montante (m)	154,16	153,80	153,30
Carga sobre a crista do vertedouro h (m)	2,16	1,80	1,30
H <sub>T</sub>	12,23	11,89	11,46

Quadro 14: valores das cargas a montante para as vazões de projeto

Partindo-se de uma cota fixada inicialmente e através de iterações (utilizando a metodologia exposta anteriormente), chegou-se aos resultados do quadro 15.

Q (m <sup>3</sup> /s)	627,42	483,18	338,69
Tr (anos)	10.000	1.000	100
C <sub>f</sub>	141,36	141,35	141,33
T <sub>w</sub>	4,65	4,07	3,40

Quadro 15: cota de fundo calculada e T<sub>w</sub> após o rebaixamento do dissipador

Como a bacia de dissipação deve atender a todas as vazões, deve-se adotar para a cota de fundo um valor inferior ou igual ao da menor cota calculada, que no caso é 139,80m.

Utilizando-se as equações apresentadas no ítem 5.3, é possível calcular as características do ressalto para o caso em que a bacia é colocada na cota fixa 139,80m para diferentes vazões (quadro 16).

Q (m <sup>3</sup> /s)	627,42	483,18	338,69	Equação
Tr (anos)	10.000	1.000	100	
y <sub>r</sub>	0,37	0,29	0,20	8
v <sub>r</sub>	18,53	18,34	18,10	7
Fr <sub>r</sub>	9,75	10,94	12,82	10
y <sub>l</sub>	4,90	4,29	3,59	3

Quadro 16: características do ressalto para estrutura fixada na cota 139,80m

Para a verificar se a cota de fundo que foi fixada inicialmente para estrutura de dissipação permite a formação do ressalto a montante do ponto de concordância A, é necessário calcular o nível de jusante requerido ( $N_{j\text{-requerido}}$ ) através da equação 11 e fixar o coeficiente de segurança  $\alpha$ , adotado o valor de  $\alpha = 1,05$ . A partir comparação da curva chave de jusante com a curva chave do  $N_{j\text{-requerido}}$  é verificado se a cota fixada foi adequada (figura 42):

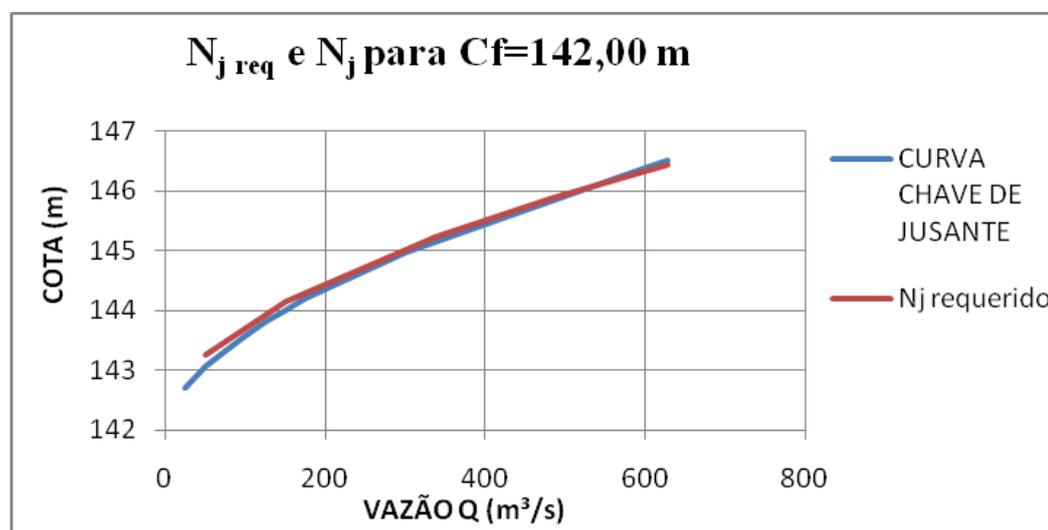


Figura 42: curva chave de jusante e nível de jusante requerido para a cota fixada inicialmente em 142,00 m

Observa-se que a cota fixada não foi adequada, pois esta ilustração se assemelha a figura 31, então há necessidade de rebaixar a cota de fundo  $C_f$ . Para se fixar a próxima cota, pode-se utilizar um valor de  $C_f$  igual ou menor que o menor dos valores obtido para a cota de fundo através da equação 11, desde que satisfaça a condição da formação do ressalto no ponto de

concordância. A partir desta ilustração identifica-se que as vazões mais baixas é que vão determinar a  $C_f$  a ser adotada.

Neste caso hipotético, em função dos valores de  $C_f$  encontrados (quadro 16) foi adotado 139,80m como nova cota de fundo, chegando-se a configuração ilustrada na figura 43, onde se pode observar que o  $N_{j\text{-requerido}}$  está sempre a abaixo da curva chave natural, evidenciando que esta nova cota de fundo pode ser adotada.

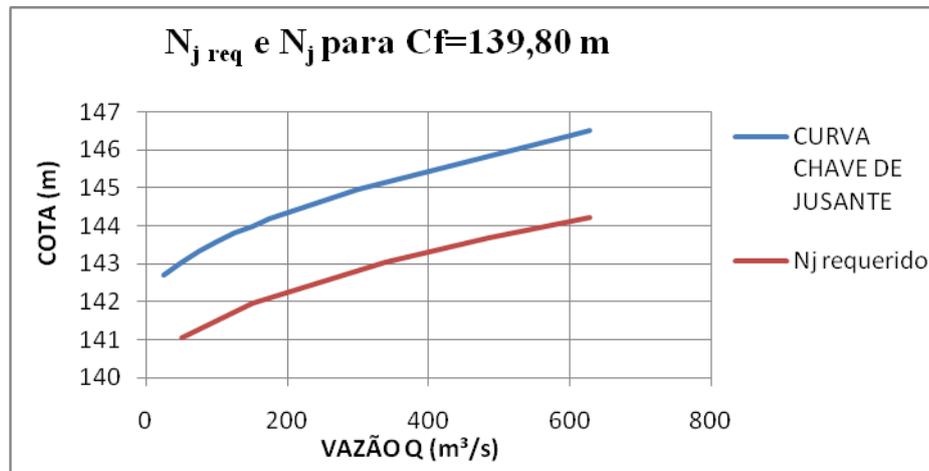


Figura 43: curva chave de jusante e nível de jusante requerido requeridas após rebaixamento do dissipador para a cota de 139,80 m

Para o cálculo do comprimento da bacia foram utilizadas as equações 21, 22 e 23, por se tratar de um caso de geologia não facilmente erodível. Os valores encontrados estão apresentados no quadro 17 para cada vazão.

Q (m³/s)	627,42	483,18	338,69
Tr (anos)	10.000	1.000	100
$L_b$ (não facilmente erodível)	10,87	24,03	20,30

Quadro 17: comprimentos da bacia ( $L_b$ ) calculados

O comprimento da bacia adotado deverá ser um que atenda a todas as vazões. Verificando os dados acima observa-se que a vazão que está comandando o comprimento da bacia é a vazão de 1.000 anos de recorrência, ou seja, a bacia de dissipação deverá ter um comprimento mínimo  $L_b = 24,10$  m.

Para o dimensionamento da soleira terminal devem se utilizadas as equações item 5.6. Os resultados no quadro 18 indicam que a vazão que está comandando o dimensionamento da soleira terminal é a vazão de 10.000 anos.

Q (m <sup>3</sup> /s)	627,42	483,18	338,69
Tr (anos)	10.000	1.000	100
z <sub>t</sub>	0,04	0,03	0,02
s <sub>≤</sub>	2,41	2,27	2,11

Quadro 18: dimensionamento da soleira terminal

A determinação da cota do muro lateral da bacia é feita utilizando-se as equações do item 5.7. Pela análise dos dados (quadro 19), observa-se que a vazão que está comandando o dimensionamento dos muros laterais da bacia é a vazão de 10.000 anos de Tr, sendo adotado no mínimo uma cota lateral de  $C_L = 147,10$  m.

Q (m <sup>3</sup> /s)	627,42	483,18	338,69
Tr (anos)	10.000	1.000	100
N <sub>j</sub> (m)	146,50	145,80	145,00
f	0,53	0,46	0,39
C <sub>L</sub>	147,03	146,26	145,38

Quadro 19: determinação da cota dos muros laterais

O raio de transição entre o perfil do vertedouro e a laje de fundo é dado a partir das equações 29 e 30. Pela análise dos resultados no quadro 20, observa-se que a vazão que está comandando o a escolha do raio de transição é a vazão de 1.000 anos, sendo então adotado um raio de no mínimo 2,90 m.

Q (m <sup>3</sup> /s)	627,42	483,18	338,69
Tr (anos)	10.000	1.000	100
R	1,84	2,86	2,03

Quadro 20: raios de transição calculados

A seguir é apresentado um croqui (figura 44) das características da bacia de dissipação por ressalto hidráulico que deveria ser adotada neste caso hipotético.

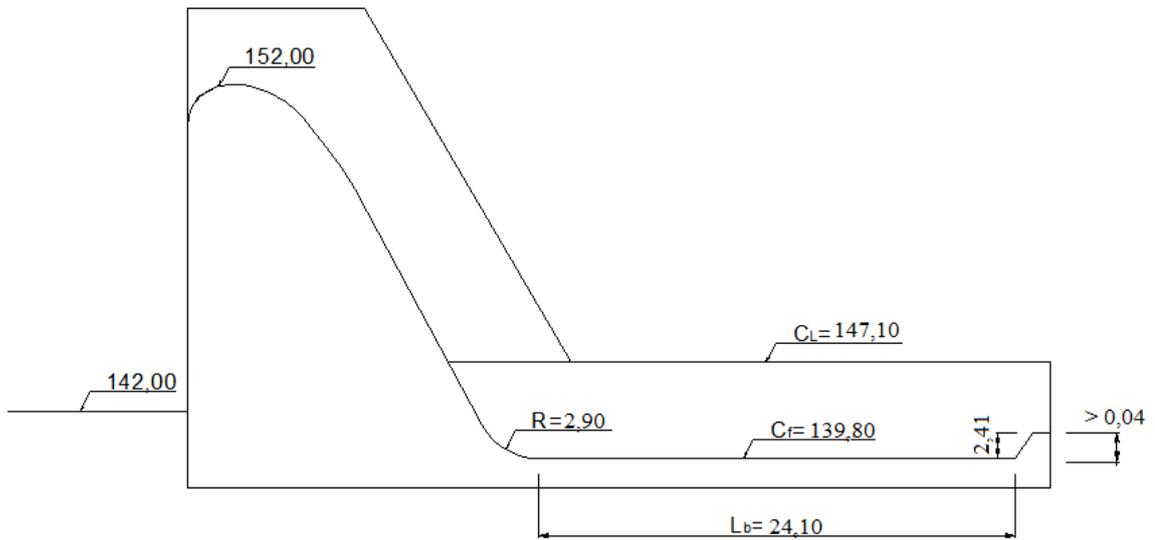


Figura 44: croqui de solução a ser adotada no caso hipotético de uma barragem de pequena altura

## 7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

As obras hidráulicas são sujeitas à ação de diversos mecanismos que podem colocá-las em situação de risco. A sua segurança está associada ao conhecimento de como estas estruturas se comportam com os diferentes escoamentos que podem ocorrer. A estrutura dissipadora de energia de uma barragem faz parte da obras de segurança da mesma e deve ser capaz de suportar todas as vazões, sem colocar em risco a segurança da obra.

O dimensionamento de um dissipador de energia não é uma ciência exata, pois depende muito da experiência do projetista, das características geológicas e topografias da região e do grau de confiabilidade nos dados hidrológicos disponíveis, fazendo com que seja adotado um coeficiente de segurança proporcional à credibilidade destas informações, isto é, mais ou menos conservador. A bacia de dissipação por ressalto hidráulico tipo I é uma das formas de dissipador mais utilizada atualmente, dada a sua eficiência. Para o correto dimensionamento destas estruturas é necessário que se conheça as características do ressalto hidráulico, fenômeno estudado desde os séculos XIX e XX.

Este trabalho procurou apresentar as principais preocupações e metodologias para determinar os critérios de detalhamento do projeto hidráulico de uma bacia de dissipação por ressalto hidráulico, que consiste em determinar a cheia de projeto, a largura da bacia de dissipação, as características do ressalto hidráulico, a cota de fundo e o comprimento do dissipador, as dimensões da soleira terminal, a altura dos muros de proteção lateral e o raio de transição do vertedouro para a estrutura de dissipação. Além da determinação destes parâmetros, foi feita a aplicação em um caso hipotético de barragem de grande altura e outro em barragem de pequena altura, onde foi possível verificar notáveis diferenças nos resultados obtidos para o dimensionamento.

Todavia, é sabido que há uma série de outros aspectos e critérios que devem ser considerados no dimensionamento dessas estruturas, mas que não foram abordados neste trabalho por estarem fora do escopo inicial. Entretanto, para um profissional que estiver tomando contato pela primeira vez com o assunto, pode ser útil o caminho a seguir:

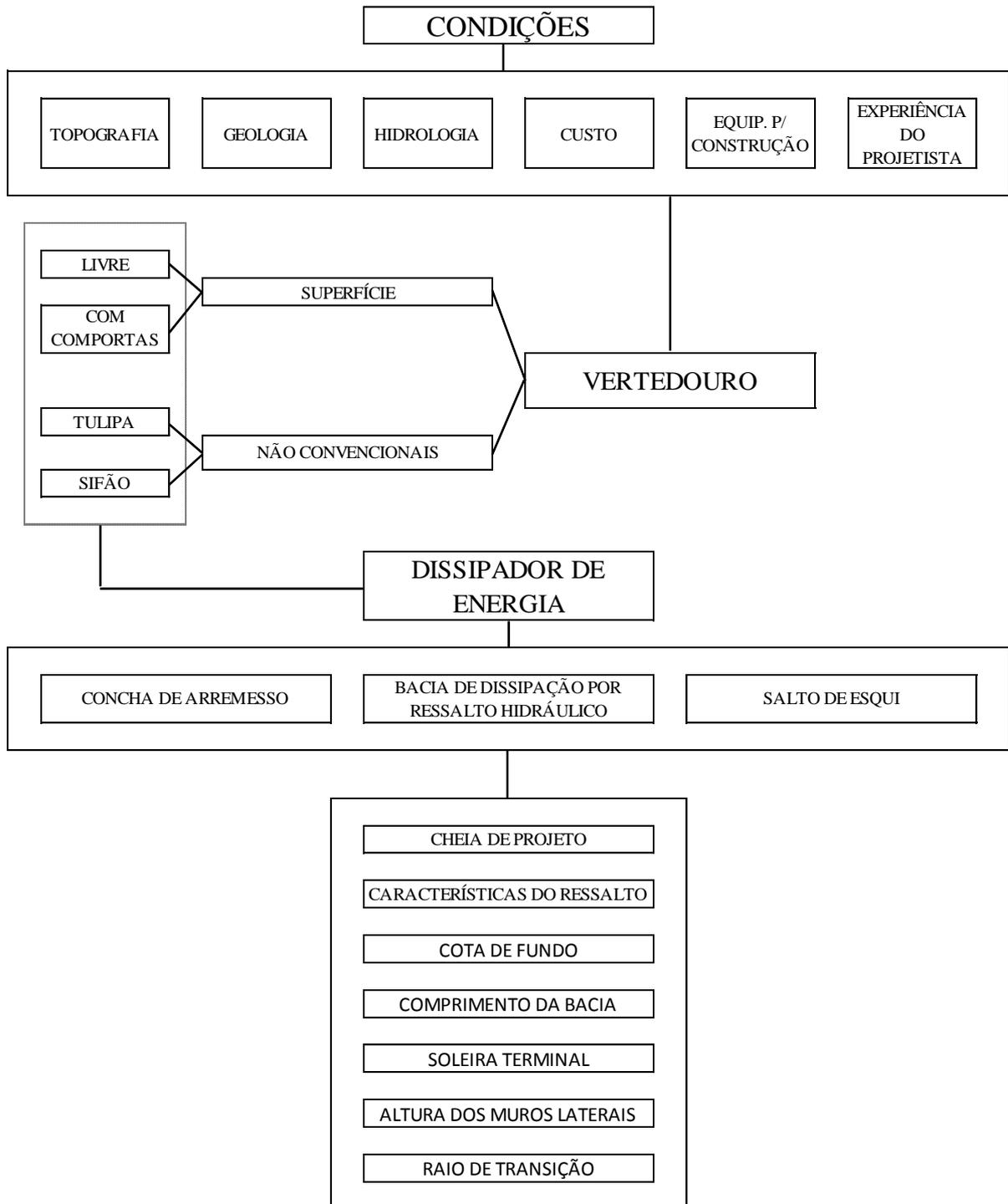


Figura 45: sugestão de caminho para dimensionamento de bacia de dissipação por ressalto hidráulico tipo I

## REFERÊNCIAS

BAPTISTA, M. B.; COELHO, M. M. L. P. **Fundamentos de Engenharia Hidráulica**. 2. ed. rev. Belo Horizonte: Editora da UFMG, 2003.

CARVALHO, E. **Segurança de Barragens: Aspectos Hidrológicos e Hidráulicos**. Disponível: <<http://www.cbdb.org.br/documentos/ErtonCarvalho-Hidr%C3%A1ulica.pdf>>. Acesso em: 27 set. 2009.

ELEVATORSKI, E. A. **Hydraulic Energy Dissipators**. New York: McGraw-Hill Book Company, 1959.

ESTRUTURAS de dissipação. Material do Departamento de Engenharia Hidráulica e Recursos Hídricos da Escola de Engenharia da UFMG. Disponível em: <<http://www.ehr.ufmg.br/docsehr/posgrad189.pdf>>. Acesso em: 15 jan. 2010.

ESTRUTURAS hidráulicas. Material do Departamento de Engenharia Hidráulica e Recursos Hídricos da Escola de Engenharia da UFMG. Disponível em: <<http://www.ehr.ufmg.br/docsehr/posgrad174.pdf>>. Acesso em: 19 set. 2009.

EXTRAVASOR tipo tulipa. Material do Departamento de Engenharia Hidráulica e Recursos Hídricos da Escola de Engenharia da UFMG. Disponível em: <[www.ehr.ufmg.br/docsehr/posgrad181.pdf](http://www.ehr.ufmg.br/docsehr/posgrad181.pdf)>. Acesso em: 20 set. 2009.

FURNAS. Parque Gerador. Disponível em <[http://www.furnas.com.br/hotsites/sistemaFurnas/usina\\_hidr\\_portocolombia.asp](http://www.furnas.com.br/hotsites/sistemaFurnas/usina_hidr_portocolombia.asp)>. Acesso em: 03 maio 2010.

HAGER, W. H. **Energy Dissipators and Hydraulic Jump**. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1992. v. 8.

\_\_\_\_\_. Trajectory Basins. In: VISCHER, D.L.; HAGER, W. H. **Energy Dissipators**. Zurich: A. A. Balkema, 1995. v. 9.

MARQUES, M. G. **Contribuição do estudo da influência do ângulo de saída nos dissipadores tipo concha**. 1991. 128 f. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento) – Curso de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

\_\_\_\_\_. Notas de Aula da Disciplina de Obras Hidráulicas. Porto Alegre. 2010.

MEEES, A. A. A. **Caracterização das solicitações hidrodinâmicas em bacias de dissipação por ressalto hidráulico com baixo número de Froude**. 2008. 157 f. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) — Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

NOVAK, P.; MOFFAT, A. I. B.; NALLURI, C.; NARAYANAN, R. **Hydraulic Structures**. 4th. ed. Oxon: Taylor & Francis, 2007.

ORTIZ, J. P. Macroturbulência de Escoamento a Jusante de Estruturas de Dissipação por Ressalto – Estudo Teórico Experimental. **Boletim Técnico Departamento de Águas e Energia Elétrica**, São Paulo, v. 5, n. 3, p. 237-472, set. 1982.

PETERKA, A. J. **Hydraulic Design of Stilling Basins and Energy Dissipators**. 1st ed., 3rd printing. Washington: United States Government Printing Office, 1974. Engineering Monograph 25.

PINTO, N. L. S. **Hidráulica Aplicada**. [Curitiba: Editora da UFPR, 1987].

PORTO, R. M. **Hidráulica Básica**. 2. ed. São Carlos: EESC-USP, 1999.

RAJARATNAM, N. Almanac of Energy Dissipation Mechanisms. In: VISCHER, D.L.; HAGER, W. H. **Energy Dissipators**. Zurich: A. A. Balkema, 1995. v. 9.

SCHREIBER, G. P. **Usinas Hidrelétricas**. São Paulo: Edgar Blüncher, 1977.

TAMADA, K. **Dissipação de Energia na Engenharia Hidráulica**: Resumo de Aula. São Paulo: [1991].

TRIERWEILER NETO, E. F. **Avaliação do Campo de Pressões em Ressalto Hidráulico Formado a Jusante de uma Comporta com Diferentes Graus de Submersão**. 2006. 194 f. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) — Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

UNITED STATES OF AMERICA. Department of Interior. Bureau of Reclamation. **Design of Small Dams**. 2nd. ed. rev. Washington: United States Government Printing Office, 1974.

\_\_\_\_\_. Department of Interior. Bureau of Reclamation. **Design of Small Dams**. 3rd. ed. Washington: United States Government Printing Office, 1987

VALENTIN, R. **Brasil e Paraguai perto de fechar acordo sobre energia de Itaipu**. Disponível em: <<http://jornalon.com/?p=3224>>. Acesso em: 30 nov. 2009.

VERTEDOUROS em degraus. Material do Departamento de Engenharia Hidráulica e Recursos Hídricos da Escola de Engenharia da UFMG. Disponível em: <<http://www.ehr.ufmg.br/docsehr/posgrad16.pdf>>. Acesso em: 24 jan. 2010.

VISCHER, D. L. HAGER, W. H. Introduction. In: \_\_\_\_\_. **Energy Dissipators**. Zurich: A. A. Balkema, 1995. v. 9.

WIEST, R. A. **Avaliação do Campo de Pressões em Ressalto Hidráulico Formado a Jusante de Um Vertedouro com Diferentes Graus de Submersão**. 2008. 158 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) — Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

WIKIPEDIA. Enciclopédia gratuita online. Pesquisa sobre o termo *Dam*. Disponível em: <<http://en.wikipedia.org/wiki/Dam>>. Acesso em: 18 nov. 2009.

\_\_\_\_\_. Pesquisa sobre o termo *Dam*. Disponível em:  
<<http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/b/ba/Ressalto32.JPG/250px-Ressalto32.JPG>>. Acesso em: 19 maio. 2010.