

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

**Felipe Martins Ferreira**

**PROFUNDIDADE DE EROSÃO A JUSANTE  
DE DISSIPADOR SALTO DE ESQUI**

Porto Alegre  
dezembro 2011

**FELIPE MARTINS FERREIRA**

**PROFUNDIDADE DE EROSÃO A JUSANTE  
DE DISSIPADOR SALTO DE ESQUI**

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**  
**Co-orientador: Alexandre Augusto Mees Alves**

Porto Alegre  
dezembro 2011

**FELIPE MARTINS FERREIRA**

**PROFUNDIDADE DE EROSÃO A JUSANTE  
DE DISSIPADOR SALTO DE ESQUI**

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, 19 de dezembro de 2011

Prof. Marcelo Giulian Marques  
PhD. pela Université Laval  
Orientador

Alexandre Augusto Mees Alves  
Msc. pela UFRGS  
Co-orientador

Profa. Carin Maria Schmitt  
Coordenadora

**BANCA EXAMINADORA**

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

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

**Maurício Dai Prá**  
Dr. pela UFRGS

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

Dedico este trabalho a meus pais, Marcos e Sandra, que sempre me apoiaram e especialmente durante o período do meu Curso de Graduação estiveram ao meu lado.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço ao Prof. Marcelo Giulian Marques e ao doutorando Alexandre Augusto Mees, pela orientação.

Agradeço aos antigos colegas do Laboratório de Obras Hidráulicas, pela ajuda e troca de informações.

Agradeço aos meus pais Marcos e Sandra, pelo incentivo e exemplo.

Agradeço a Larissa, pelo incentivo, companheirismo, compreensão e carinho.

Há muitas maneiras de avançar, mas só uma maneira de  
ficar parado.

*Franklin D. Roosevelt*

## RESUMO

O sistema extravasor é um elemento fundamental na segurança de uma barragem. Grandes empreendimentos geralmente possuem altíssimas vazões de projeto que precisam ser descarregadas de forma segura a jusante de suas estruturas. O uso do dissipador por salto de esqui é uma das formas mais econômicas de dissipar a energia da água, pois o escoamento é lançado diretamente contra o maciço rochoso, sem a necessidade de construções de concreto além do vertedouro. Este trabalho apresenta um estudo sobre a previsão de fossas geradas pelo impacto da água na rocha. O coeficiente  $K$ , relacionado à erodibilidade do maciço e empregado nas fórmulas empíricas de previsão, é avaliado de forma qualitativa, confrontando a profundidade encontrada em barragens e a descrição da geologia no local de impacto do jato. Por fim, através de um método de estimativa de propagação de pressão de um jato livre em um colchão d'água é estimada a pressão atuante no fundo da fossa de erosão destas barragens e é sugerida uma relação entre pressão admissível e o coeficiente  $K$ .

Palavras-chave: Fossa de Erosão. Salto de Esqui. Dissipação de Energia Hidráulica.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Diagrama de etapas de pesquisa	16
Figura 2 - Principais variações de barragens de terra	18
Figura 3 - Principais variações de barragens de enrocamento	19
Figura 4 - Seção transversal de uma barragem de gravidade	20
Figura 5 – Vista em planta de uma barragem de contraforte	20
Figura 6 – Represa Nant-y-Moch	20
Figura 7 - Usina Hidrelétrica Yellowtail	21
Figura 8 - Identificação de elementos básicos de um sistema extravasor - usina hidrelétrica de Itaipu	22
Figura 9 - Barragem Sariyar, Turquia - barragem de gravidade com vertedouro no corpo da barragem	23
Figura 10 - Barragem Luiz Carlos Barreto de Carvalho (Estreito) - barragem de enrocamento com vertedouro em concreto na ombreira direita	24
Figura 11 - Representação esquemática dos tipos mais usuais de dissipadores de energia	27
Figura 12 - Representação esquemática de um vertedouro com salto de esqui	30
Figura 13 - Barragem de Tucuruí - vertedouro com salto de esqui no corpo da barragem	30
Figura 14 - Identificação dos processos físicos no desenvolvimento da fossa de erosão	32
Figura 15 - Detalhe da concha de lançamento	36
Figura 16 - Desvio percentual entre profundidade prevista e observada	45
Figura 17 - Profundidade de erosão pelo fator $q1/2H1/4$	49
Figura 18 - Esquema representativo das grandezas envolvidas para a estimativa de pressões dinâmicas	50
Figura 19 - Gráfico da relação entre Pf e K	52



## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Distribuição percentual de grandes barragens por material construtivo	17
Quadro 2 - Coeficientes para as variáveis K, x, y e z	38
Quadro 3 - Classificação de maciços por Brito	41
Quadro 4 - Informações sobre a geologia das barragens analisadas	42
Quadro 5 - Dados operacionais das barragens analisadas	43
Quadro 6 - Previsão de erosão por métodos empíricos	44
Quadro 7 - Resultados de K para cada maciço	47
Quadro 8 - Comparação entre K e geologia na bacia de impacto	47
Quadro 9 - Duração de vertimento do vertedouros	48
Quadro 10 - Estimativa de pressão dinâmica	51
Quadro 11 - Comparação entre K e $Pf/2Bu$	52
Quadro 12 - Observações de protótipo	59

## LISTA DE SÍMBOLOS

Bu – Semi-largura do jato na zona de impacto (m)

B – Largura no bloco de lançamento (m)

D – Profundidade da fossa (m)

d1 – Tirante no bordo de lançamento (m)

H – Queda bruta (m)

H0 – Queda até o bordo de lançamento (m)

H1 – Altura do bordo de lançamento (m)

K – coeficiente de erodibilidade do maciço rochoso

NAjus – NA jusante (m)

NAres – NA reservatório (m)

Pf – Pressão dinâmica (m.c.a)

Pu – Pressão hidrodinâmica na zona de impacto (m.c.a)

q – Vazão específica no bloco de lançamento (m<sup>3</sup>/s/m)

Q<sub>M</sub> – Vazão máxima vertida (m<sup>3</sup>/s)

V1 – Velocidade do jato no bordo (m/s)

Vu – Velocidade do jato na zona de impacto (m/s)

y<sub>k</sub> – Comprimento do núcleo do jato (m)

$\alpha$  – Ângulo de lançamento (°)

$\beta$  – Ângulo de impacto (°)

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b>	12
<b>2 DIRETRIZES DE PESQUISA</b>	14
2.1 QUESTÃO DE PESQUISA	14
2.2 OBJETIVOS DO TRABALHO	14
<b>2.2.1 Objetivo principal</b>	14
<b>2.2.2 Objetivo secundário</b>	14
2.3 PRESSUPOSTO	14
2.4 DELIMITAÇÕES	15
2.5 LIMITAÇÕES	15
2.6 DELINEAMENTO	15
<b>3 BARRAGENS</b>	17
3.1 BARRAGENS DE ATERRO	18
3.2 BARRAGENS DE CONCRETO	19
<b>4 SISTEMAS EXTRAVASORES</b>	22
4.1 VERTEDOUROS	23
<b>4.1.1 Vertedouros de lâmina livre</b>	24
<b>4.1.2 Vertedouros com comporta</b>	25
4.2 DISSIPADORES	26
<b>4.2.1 Mecanismos de dissipação</b>	26
<b>4.2.2 Tipos de dissipadores</b>	27
4.2.2.1 Bacias de dissipação por ressalto hidráulico	28
4.2.2.2 Conchas de rolo	28
4.2.2.3 Vertedouro em degraus	29
<b>5 SALTO DE ESQUI</b>	30
5.1 DISSIPÇÃO DE ENERGIA	31
5.2 DESENVOLVIMENTO DA FOSSA DE EROSÃO	31
5.3 CONDICIONANTES DE PROJETO	33
5.4 CRITÉRIOS DE DIMENSIONAMENTO	34
<b>5.4.1 Raio da concha de lançamento</b>	35
<b>5.4.2 Ângulo de lançamento</b>	35
<b>5.4.3 Cota da concha de lançamento</b>	36
<b>5.4.4 Geometria de trajetória</b>	36
<b>5.4.5 Profundidade da fossa</b>	37

<b>5.4.6 Pressão dinâmica</b>	41
<b>6 DESENVOLVIMENTO</b>	42
6.1 VERTEDOUROS ANALISADOS	42
6.2 PREVISÃO DE EROÇÃO POR FÓRMULAS EMPÍRICAS	44
6.3 PRESSÕES DINÂMICAS	49
<b>7 CONSIDERAÇÕES FINAIS</b>	54
REFERÊNCIAS	55
ANEXO A	58



## 1 INTRODUÇÃO

O acesso à água sempre foi de importância vital à sobrevivência dos humanos. Na antiguidade, os romanos, os persas e os mouros, dentre outras civilizações, já construíam canais artificiais para levar água aos centros urbanos, faziam uso de sua energia através de rodas d'água e construíam barragens para a sua retenção.

Nos tempos modernos, o avanço no conhecimento científico permitiu a construção de barragens de elevadas alturas e a utilização de sistemas extravasores com vazões específicas cada vez maiores. O sistema extravasor é uma das obras de segurança de uma barragem e tem como função permitir o descarregamento seguro do excesso de água advindo de cheias, sendo formado em geral por um vertedouro e por um dissipador de energia. Quando em funcionamento, o vertedouro deve permitir o escoamento da vazão sem que o nível de água a montante alcance a cota de coroamento da barragem; já o dissipador tem como função reduzir de forma segura o excesso de energia da água, permitindo que a mesma retorne ao leito do rio gerando o mínimo de danos e erosões a jusante.

O dissipador de salto de esqui, foco deste trabalho, é muito utilizado por ser geometricamente compacto e de baixo custo, contanto que haja condições hidráulicas, geotécnicas e morfológicas que permitam o seu emprego (NOVAK; ČÁLBEKA<sup>1</sup>, 1981 apud NOVAK et al., 2007, p. 246-247). Esse tipo de dissipador lança um jato livre a uma ampla distância do vertedouro, fazendo com que a dissipação de energia ocorra longe de estruturas importantes; sofrendo perdas ao longo de seu percurso no ar e no impacto com o maciço rochoso.

A enorme quantidade de energia que o jato transmite ao maciço desaloja blocos inteiros de rocha, gerando uma fossa de erosão. O desenvolvimento da fossa não deve pôr em risco as fundações do vertedouro ou a barragem e requer estudo cuidadoso.

Este trabalho inicia com uma breve descrição de barragens e sua classificação de acordo com materiais empregados e forma construtiva. O capítulo seguinte descreve os sistemas extravasores de uma barragem e o funcionamento de vertedouros e dissipadores, seus tipos mais comuns e mecanismos envolvidos no seu uso. O quarto capítulo foca no dissipador tipo

---

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

salto de esqui, detalhando os processos envolvidos na dissipação de energia hidráulica, os mecanismos que geram a fossa e os critérios a se adotar no dimensionamento hidráulico desta estrutura. O quinto capítulo introduz a questão de pesquisa e os objetivos do trabalho. O sexto capítulo apresenta o trabalho desenvolvido sobre coeficientes de erodibilidade e pressões dinâmicas relacionadas a estes. O sétimo capítulo oferece as considerações finais.

## **2 DIRETRIZES DE PESQUISA**

Para a elaboração do presente trabalho foram definidas as seguintes diretrizes.

### **2.1 QUESTÃO DE PESQUISA**

A questão que este estudo busca responder é: como se comporta o coeficiente K, relacionado à erodibilidade da rocha, em relação ao tipo de geologia da bacia de impacto?

### **2.2 OBJETIVOS DO TRABALHO**

Os objetivos deste trabalho estão classificados em principal e secundário e são apresentados nos próximos itens.

#### **2.2.1 Objetivo principal**

O objetivo principal deste trabalho é a validação das faixas do coeficiente K, relacionado à erodibilidade da rocha, recomendados por Yu-Chang nas equações empíricas de previsão de erosão para dissipadores em salto de esqui.

#### **2.2.2 Objetivo secundário**

O objetivo secundário deste trabalho é a verificação da relação entre pressão dinâmica e o coeficiente relacionado à erodibilidade da rocha.

### **2.3 PRESSUPOSTO**

A profundidade atingida pela fossa de erosão das barragens em análise pode ser atribuída à máxima vazão vertida.



## 2.4 DELIMITAÇÕES

Devido à quantidade reduzida de informação disponível sobre barragens somente métodos empíricos e semi-empíricos serão utilizados neste trabalho.

## 2.5 LIMITAÇÕES

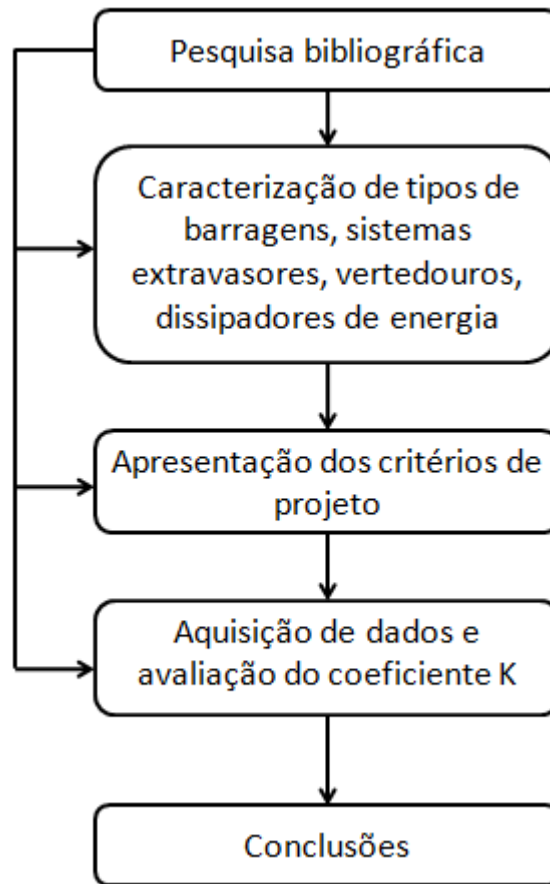
A aplicação da metodologia é baseada em dados obtidos através de pesquisa bibliográfica, não sendo os resultados validados através de estudos experimentais, como modelos físicos.

## 2.6 DELINEAMENTO

O trabalho foi realizado seguindo as etapas descritas abaixo e ilustradas na figura 1:

- a) pesquisa bibliográfica;
- b) caracterização de tipos de barragem, sistemas extravasores, vertedouros e dissipadores de energia;
- c) apresentação dos critérios de dimensionamento de dissipador salto de esqui;
- d) aquisição de dados sobre barragens e avaliação do coeficiente K de forma qualitativa e quantitativa;
- e) considerações finais.

Figura 1 – Diagrama de etapas de pesquisa



(fonte: elaborada pelo autor)

A pesquisa bibliográfica foi direcionada ao aprofundamento do conhecimento sobre as características do conjunto de obras que permite o uso do salto de esqui, como os tipos de barragens e vertedouros, assim como a influência das características morfológicas, hidráulicas e geotécnicas sobre o seu emprego. O estudo sobre o funcionamento do salto de esqui foi amplo, envolvendo os mecanismos dissipativos, processos físicos durante seu funcionamento e critérios de dimensionamento de sua estrutura. Também foram estudados brevemente outros tipos usuais de dissipadores. A segunda etapa consistiu na caracterização dos tipos de barragens, vertedouros e dissipadores, com ênfase no salto de esqui.

A terceira etapa do trabalho apresenta a avaliação do coeficiente K baseado em dados de barragens disponíveis na literatura e apresenta uma forma de estimativa de pressão admissível para esta variável. A última etapa consiste na apresentação das considerações finais obtidas ao longo do estudo.

### 3 BARRAGENS

O propósito fundamental de uma barragem é fornecer retenção e armazenamento de água. Seus reservatórios são classificados de acordo com o fim dado a água armazenada, como irrigação, fornecimento de água, geração de energia hidroelétrica, controle de cheias (NOVAK et al., 2007, p. 4).

Barragens podem ser classificadas genericamente de acordo com o seu material construtivo em de aterro e de concreto. A *International Commission on Large Dams* criou o quadro 1 baseado nos seus registros de grandes barragens (de altura superior a 15 m) demonstrando a distribuição entre os vários tipos.

Quadro 1 – Distribuição percentual de grandes barragens por material construtivo

Grupo	Tipo	%
Aterro	Terra	82,9
	Enrocamento	
Concreto	Gravidade	11,3
	Arco	4,4
	Contraforte	1,0
	Arcos múltiplos	0,4
Total de grandes barragens		41.413

(fonte: adaptado de INTERNATIONAL COMMISSION ON LARGE DAMS<sup>2</sup>, 1998  
apud NOVAK et al., 2007, p. 4)

Breves descrições dos tipos de barragens de aterro e de concreto são apresentadas na próxima seção.

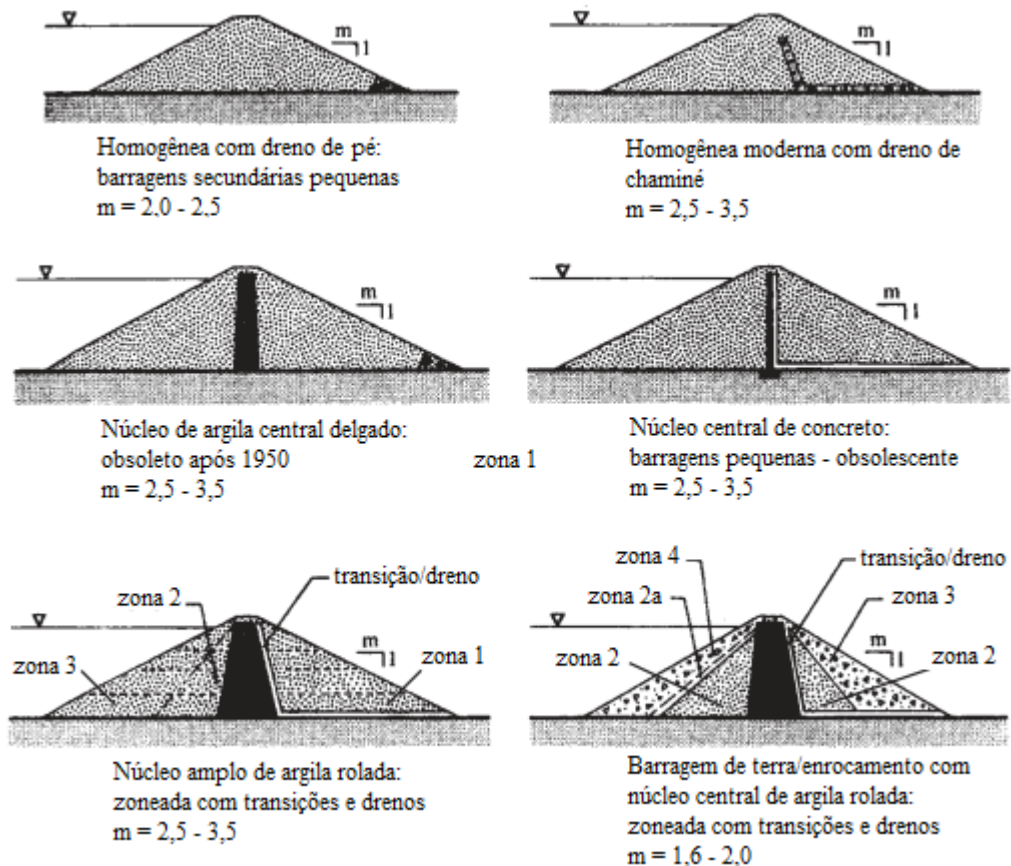
<sup>2</sup> INTERNATIONAL COMMISSION ON LARGE DAMS. **World Register of Dams**. Paris, 1998.

### 3.1 BARRAGENS DE ATERRO

Barragens de aterro são barragens construídas de material natural, como solo ou rocha. Apresentam inclinações similares nos paramentos de jusante e montante, possuindo uma vasta seção e um alto volume de material em relação a sua altura e podem se adaptar a uma ampla gama de condições de fundações (NOVAK et al., 2007, p. 4, 15). Por serem constituídas de material permeável, são sujeitas a percolação.

Barragens são classificadas como de terra se mais de 50% do seu volume for constituído de terra (NOVAK et al., 2007, p. 13). Podem ser separadas em homogêneas, constituídas de um material muito uniforme, e em zoneadas, constituídas de diferentes materiais alocados de acordo com suas qualidades (figura 2). É comum neste último caso o uso de núcleos impermeáveis de argila (SCHREIBER, 1977, p. 70-71).

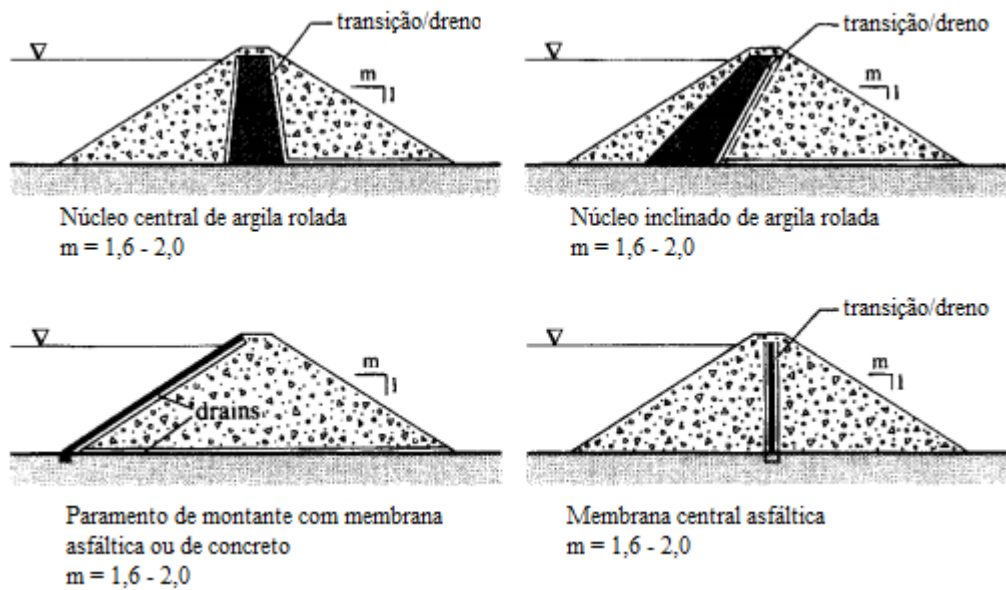
Figura 2 – Principais variações de barragens de terra



(fonte: adaptado de NOVAK et al., 2007, p. 14)

Schreiber (1977, p. 73) define, como de enrocamento, a barragem cuja seção transversal é composta em sua maior parte por enrocamento e a menor parte, geralmente apenas a zona vedante, de outros materiais. Esta zona vedante, de acordo com Novak et al. (2007, p. 4, 15), pode ser um núcleo de argila ou de asfalto ou um paramento de concreto ou asfalto, como ilustrado na figura 3.

Figura 3 – Principais variações de barragens de enrocamento



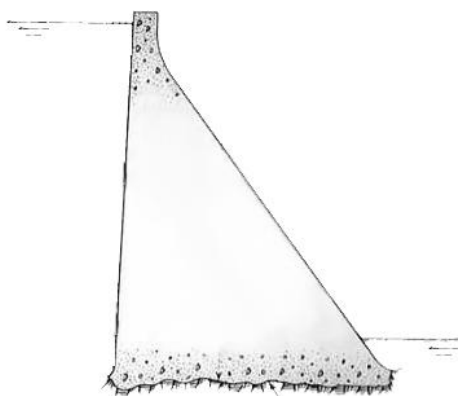
(fonte: adaptado de NOVAK et al., 2007, p. 15)

### 3.2 BARRAGENS DE CONCRETO

As barragens de concreto possuem um custo maior por volume de material, mas se tornam competitivas quanto mais alta a estrutura. O uso de concreto massa começou no início do século XX, com o uso de concreto ciclópico. O uso de concreto compactado a rolo (CCR) começou nos anos 1970, eliminando a necessidade de vibração, diminuindo o tempo de construção em até 35% e fazendo uso de concreto mais econômico (NOVAK et al., 2007, p. 174-175). As barragens de concreto podem ser divididas em de gravidade, de contraforte e em arco.

Barragens de gravidade garantem sua estabilidade sobretudo pelo seu peso. Elas apresentam geralmente perfil triangular, como ilustrado na figura 4, para evitar solicitações excessivas na barragem e na sua fundação (NOVAK et al., 2007, p. 16).

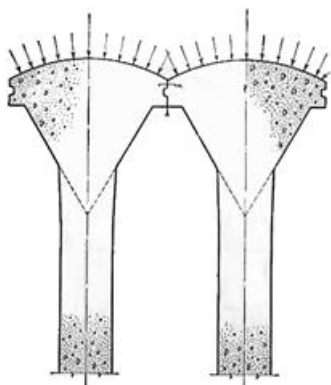
Figura 4 – Seção transversal de uma barragem de gravidade



(fonte: adaptado de DAVIS, 1969, p. 9-1)

As barragens de contraforte evoluíram das barragens de gravidade a partir da introdução de amplas juntas de dilatação, induzindo redução do volume de concreto e alívio nas subpressões. Sua face de montante é contínua, podendo apresentar diversas formas e é suportada por contrafortes intervalados a jusante, como visto nas figuras 4 e 5. O volume de concreto utilizado em uma barragem de contraforte é de aproximadamente 65 a 70% do volume utilizado por uma barragem de gravidade equivalente (DAVIS, 1969, p. 9-1, 9-3, 9-6).

Figura 5 – Vista em planta de uma barragem de contraforte



(fonte: adaptado de DAVIS, 1969, p. 9-3)

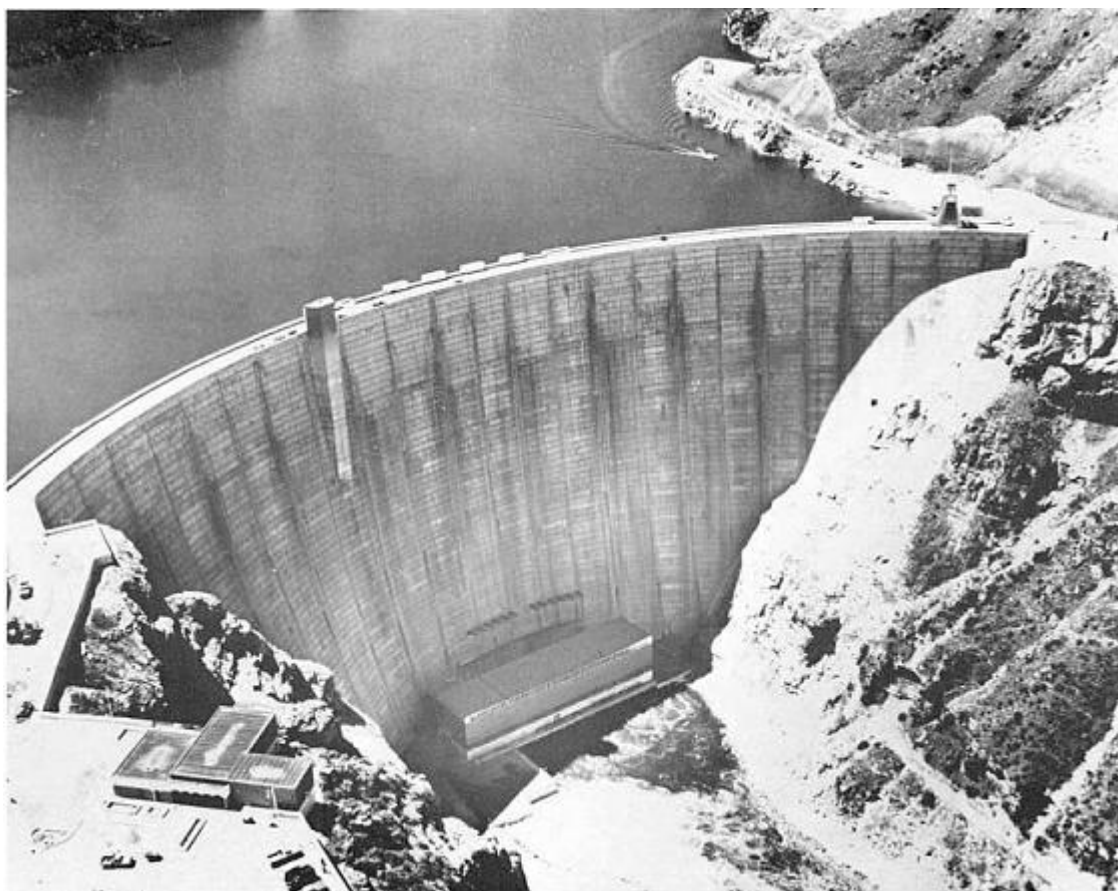
Figura 6 – Represa Nant-y-Moch



(fonte: DAVIS, 1969, p. 9-6)

A curvatura em uma barragem em arco (figura 7) tem como objetivo transmitir esforços da pressão d'água para as ombreiras das encostas, reduzindo as solicitações na vertical. Seu uso depende de topografia favorável, como vales estreitos. O volume de concreto pode chegar a até 25% do utilizado em uma barragem de gravidade equivalente (DAVIS, 1969, p. 9-7, 9-9; HOUK; WENGLER, 1969, 14-1).

Figura 7 – Usina Hidrelétrica Yellowtail



(fonte: UNITED STATES OF AMERICA, 1977, p. IV)

## 4 SISTEMAS EXTRAVASORES

Devido à natureza do armazenamento de água, há períodos em que o reservatório de uma barragem está cheio e a saída de água não supera a sua entrada. O excesso de água deve ser descarregado de forma segura, pois em muitos casos a passagem de água sobre a barragem resultaria em falha catastrófica de sua estrutura. Por esta razão, são incorporadas a barragens sistemas extravasores: estruturas projetadas especificamente para receber estas descargas (CHADWICK et al., 2004, p. 452-453).

Sistemas extravasores são geralmente compostos por canal de aproximação, estruturas de controle, de condução e de dissipação (figura 8). O canal de aproximação é uma obra cujo objetivo é direcionar o fluxo na direção da estrutura de controle (ŞENTURK, 1994, p. 33-35). O tipo de estrutura de controle determina se a descarga se iniciará livremente ou por acionamento mecânico. A estrutura de condução é por onde o escoamento é transportado de montante a jusante da represa. Estas duas estruturas formam o vertedouro, tema da seção seguinte. A estrutura de dissipação tem como objetivo retirar a energia em excesso da descarga e será explicada em mais detalhes na seção 4.2.

Figura 8 – Identificação de elementos básicos de um sistema extravasor – usina hidrelétrica de Itaipu



(fonte: adaptado de ENERGIA..., 2010)



## 4.1 VERTEDOUROS

Vertedouros são essencialmente estruturas que permitem a passagem segura de cheias do reservatório ao curso d'água a jusante da barragem. Durante seu funcionamento, o vertedouro deve escoar toda a vazão sobre sua soleira, não permitindo que o nível de água alcance a cota de coroamento da barragem. A seleção do tipo de vertedouro a ser empregado depende principalmente da cheia de projeto, tipo da barragem, morfologia do terreno, tamanho do reservatório e necessidade de operação (NOVAK et al., 2007, p. 191).

Para barragens de concreto, como as de gravidade, Şenturk (1994, p. 20) recomenda o posicionamento do extravasor junto ao corpo da barragem (figura 9). Nas barragens em arco, uma porção da crista da barragem pode ser dedicada a um vertedouro. Nos casos onde o comprimento da crista é insuficiente para a vazão de projeto, o autor aconselha o uso de um orifício com comporta como descarregador.

Figura 9 – Barragem Sariyar, Turquia – barragem de gravidade com vertedouro no corpo da barragem



(fonte: ŞENTURK, 1994, p. 24)

Sobre o arranjo do vertedouro em barragens de terra e de enrocamento, Schreiber (1977, p. 93) afirma:

As barragens de terra e de enrocamento estão sujeitas a recalques consideráveis que se estendem por muito tempo, às vezes, por anos. Por isso não se pode construir o vertedouro sobre estas barragens. Portanto deve ser projetado o evacuador de enchentes como uma obra completamente separada, intercalando um trecho de concreto entre as ombreiras de terra, [...] ou construindo um canal que contorne lateralmente uma das ombreiras da barragem e no qual serão instaladas as comportas [figura 10].

Figura 10 – Barragem Luiz Carlos Barreto de Carvalho (Estreito) – barragem de enrocamento com vertedouro em concreto na ombreira direita



(fonte: HIDRELÉTRICA..., 2010)

Uma das formas de classificar os vertedouros é baseada na sua estrutura de controle. Şenturk (1994, p. 20) classifica-os em vertedouros de lâmina livre e com comporta. Uma descrição do funcionamento destes tipos é dada a seguir.

#### **4.1.1 Vertedouros de lâmina livre**

Os vertedouros com lâmina livre entram em operação quando a altura d'água a montante excede a cota da soleira do vertedouro. Suas diferentes denominações são dadas de acordo com suas características de geometria de perfil, posicionamento da estrutura, geometria de soleira e funcionamento.

A geometria do perfil determina se a lâmina vertente será aderente ou não-aderente. Vertedouros com lâmina não-aderente apresentam soleira delgada. Recomenda-se precaução no seu uso caso a aeração da lâmina vertente inferior não seja assegurada, pois o fluxo pode se tornar pulsante. A aderência da lâmina é alcançada utilizando-se perfis que acompanhem a

trajetória da lâmina inferior. Diversos perfis possibilitam a aderência da lâmina, como o perfil Creager, de parábolas de segundo e terceiro graus, perfis compostos, etc. (ŞENTURK, 1994, p. 26-29).

Em casos nos quais não é possível adequar o vertedouro ao corpo da barragem, soluções como o vertedouro lateral ou o em poço podem ser empregadas. Vertedouros laterais são incorporados na lateral da barragem e projetados como vertedouros de lâmina aderente. Uma maior profundidade do canal lateral pode influenciar positivamente na dissipação de energia, embora tenha como consequência um maior custo construtivo (NOVAK et al., 2007, p. 210-211). O vertedouro em poço é uma galeria vertical com entrada afunilada que é posicionado no perímetro interno do reservatório. Utilizado principalmente em situações de cheias de projeto pequenas ou desfiladeiros estreitos (ŞENTURK, 1994, p. 31).

Mudanças na geometria da soleira de vertedouros convencionais, como o aumento do seu comprimento, podem gerar vazões maiores, mesmo com a diminuição da vazão específica. Exemplos de descarregadores que fazem uso disto são os vertedouros bico de pato, labirinto e margarida (NOVAK et al., 2007, p. 230).

Vertedouros em sifão são utilizados como descarregadores auxiliares para cheias de projeto pequenas. O seu funcionamento pode ser retardado ou não funcionar satisfatoriamente, por isto não é completamente seguro (ŞENTURK, 1994, p. 31).

#### **4.1.2 Vertedouros com comporta**

Vertedouros com comporta são descarregadores que controlam a passagem de água de acordo com sua necessidade de operação. A utilização de um vertedouro com comporta aumenta a carga hidráulica e a capacidade de armazenamento de uma barragem, pois as comportas quando fechadas provêm um bloqueio contra a água a montante (MAYER; BOWMAN, 1969, p. 21-1). De acordo com Şenturk (1994, p. 31), são utilizados geralmente em hidrelétricas nas quais se requer um nível constante ou em barragens para irrigação devido aos ganhos em volume.

O uso de vertedouros com comporta é, ainda, imprescindível quando se utiliza certos tipos de dissipador, como o salto de esquí. Nestes dissipadores, é desejável haver impacto contra o

leito rochoso apenas na região definida para a fossa de erosão. Para o jato alcançar esta região, uma velocidade mínima é necessária no seu lançamento – consequentemente uma altura mínima d'água a montante é requerida para a operação adequada deste dissipador – o que só é possível com o uso de descarregadores controlados.

## 4.2 DISSIPADORES

A dissipação de energia hidráulica é o processo de transformação de energia potencial e cinética da água em calor. Há uma grande diferença de energia entre as águas a montante e as águas a jusante de uma barragem, portanto, embora a passagem do escoamento por um vertedouro dissipe um pouco de sua energia, há um excesso que se não dissipado possui grande potencial destrutivo (SCHREIBER, 1977, p. 81; VISCHER, 1995, p. 1).

Devido a este potencial, a dissipação de energia é essencial para trazer a descarga do vertedouro às condições de escoamento normais do rio a jusante. Esta necessidade, no entanto, não se dá somente para proteger as margens e fundo do rio dos efeitos da erosão, mas também para proteger do colapso a própria barragem e outras estruturas adjacentes (KHATSURIA, 2005, p. 371).

### 4.2.1 Mecanismos de dissipação

De acordo com Vischer (1995, p. 2), o processo de dissipação concentrada pode ser dividido em dois casos:

- a) partículas de água dentro de uma corrente de água: o consumo de energia se dá através de turbulências, geradas principalmente em zonas de cisalhamento, como em locais com alto gradiente de velocidades e podem ser geradas por,
  - expansões súbitas;
  - deflexões acentuadas;
  - estrangulamentos;
  - obstrução por blocos;
  - contra fluxos;
  - contornos irregulares;
  - câmaras de vórtices;

- b) gotas de água numa corrente de ar, que perdem energia ao sofrer resistência do ar. Este mecanismo é induzido pela,
- criação de jatos livres;
  - separação de jatos livres.

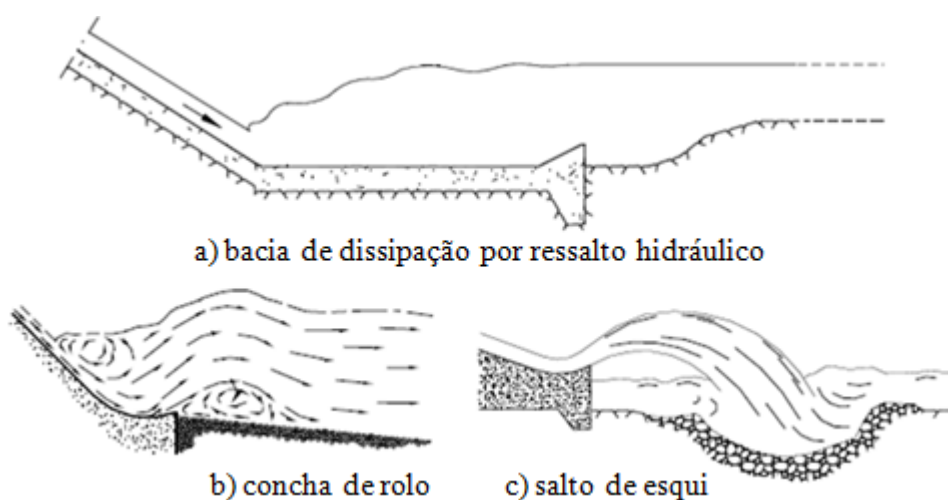
As modificações bruscas que incidem sobre o escoamento geram consequências violentas nas estruturas em contato com a água, como: pulsação, vibração, erosão, abrasão ou cavitação. Devido a estes fenômenos, restrições no dimensionamento de dissipadores são definidas de acordo com os materiais construtivos, como o concreto ou o aço (VISCHER, 1995, p. 3).

#### 4.2.2 Tipos de dissipadores

Os tipos mais usuais de dissipadores de grande escala, de acordo com Chadwick et al. (2004, p. 465) são:

- a) bacias de dissipação por ressalto hidráulico (figura 11a);
- b) conchas de rolo (figura 11b);
- c) salto de esqui (figura 11c).

Figura 11 – Representação esquemática dos tipos mais usuais de dissipadores de energia



(fonte: adaptado de trabalho não publicado<sup>3</sup>)

<sup>3</sup> Apostila da disciplina Estruturas e Aproveitamentos Hidráulicos, ministrada pelo Prof. António Nascimento Pinheiro, no curso Mestrado Integrado em Engenharia Civil da Universidade Técnica de Lisboa, nov. 2006.

A bacia de dissipação por ressalto hidráulico e a concha de rolo são discutidas a seguir neste capítulo. O salto de esqui, foco deste trabalho, tem seu funcionamento apresentado em detalhes em um capítulo a parte.

#### 4.2.2.1 Bacias de dissipação por ressalto hidráulico

As bacias de dissipação por ressalto hidráulico são o tipo mais comum de dissipador hidráulico (NOVAK et al., 2007, p. 249). Elas apresentam um fundo de concreto, para resistir à erosão, e uma soleira terminal, como vista na figura 11a. Seu funcionamento é baseado na formação de um ressalto hidráulico dentro dos limites da estrutura. O escoamento, em velocidade supercrítica, é desacelerado no fim da bacia, ganhando altura suficiente para que o desnível gere um ressalto dentro do perímetro desejado.

O custo de construção de uma bacia de dissipação por ressalto pode ser reduzido com a introdução de blocos de queda no pé do vertedouro ou com blocos de impacto, localizados entre o pé de vertedouro e a soleira terminal (NOVAK et al., 2007, p. 254). Estes dispositivos diminuem o comprimento necessário da estrutura e seu uso foi padronizado pela *United States Bureau of Reclamation*.

#### 4.2.2.2 Conchas de rolo

Neste dissipador a concha funciona submersa e promove a formação de um turbilhão de eixo horizontal (figura 11b), designado por rolo, que promove a dissipação de energia do escoamento (trabalho não publicado)<sup>4</sup>. Seu uso é apropriado quando a profundidade das águas a jusante do barramento são muito elevadas para a formação de um ressalto hidráulico. A dissipação de energia pode ter um aumento com a utilização de uma concha dentada, mas isto traz o risco de erosão excessiva no fundo do canal de jusante (CHADWICK et al., 2004, p. 467).

---

<sup>4</sup> Apostila da disciplina Estruturas e Aproveitamentos Hidráulicos, ministrada pelo Prof. António Nascimento Pinheiro, no curso Mestrado Integrado em Engenharia Civil da Universidade Técnica de Lisboa, nov. 2006.

#### 4.2.2.3 Vertedouro em degraus

Vertedouros em degraus são estruturas mistas, com função de condução e dissipação. Possuem patamares em sua face vertente e fazem uso destas macro-rugosidades para a dissipação de energia ao longo de sua calha. Estes vertedouros vêm atraindo atenção nas últimas décadas devido ao uso de novas tecnologias construtivas, como CCR e blocos pré-fabricados. Vertedouros em degraus são usados principalmente como descarregadores auxiliares, mas seu uso como descarregador principal colabora economicamente devido a sua contribuição na dissipação de energia (NOVAK et al., 2007, p. 228).

## 5 SALTO DE ESQUI

O dissipador em salto de esqui tem como objetivo realizar a dissipação de energia longe da estrutura do vertedouro ou de construções adjacentes a este. Para tanto, utiliza-se uma concha no fim da calha do vertedouro, que lança o jato para longe, impactando o tirante d'água ou, na ausência deste, diretamente o maciço rochoso (figuras 11 e 12).

Figura 12 – Representação esquemática de um vertedouro com salto de esqui



(fonte: adaptado de YUDITSKII<sup>5</sup>, 1983 apud PEREIRA, 1996, p. 54)

Figura 13 – Barragem de Tucuruí – vertedouro com salto de esqui no corpo da barragem



(fonte: BRASIL, 2010).

<sup>5</sup> YUDITSKII, G. A. **Ação Hidrodinâmica de uma Lâmina Descarregadora Sobre Fragmentos de um Leito Rochoso**. Tradução de J. A. Pintos de Campo. Lisboa: LNEC, 1983.



Onde as condições do rio não oferecem grande altura de água para a formação de ressalto hidráulico “[...] a solução mais econômica e de mais fácil execução, é o emprego de um extravasor com salto de esqui [...]” (BRIGHETTI, 2004, p. [2]). As obras necessárias para a construção de um dissipador deste tipo envolvem basicamente a construção do vertedouro, não sendo necessárias estruturas de concreto adicionais, como bacias de dissipação. No caso de pré-escavação da fossa, há ainda a possibilidade de uso do material escavado para aterro ou agregado para concreto.

A ocorrência de um maciço erodível não é um limitador para o uso do salto de esqui. Como mencionado anteriormente, uma das vantagens deste tipo de dissipador é a possibilidade de lançar o jato a uma distância suficientemente segura, permitindo então a geração de grandes fossas de erosão desde que estas não interfiram com as demais estruturas do projeto (BRITO, 1991, p. 274).

## 5.1 DISSIPACÃO DE ENERGIA

A dissipação de energia ocorre em três momentos distintos. A formação do jato livre difunde a água em *spray* e faz com que as gotas de água sofram resistência do ar. A perda de energia é considerável e é um fator a ser avaliado quando se estima a distância alcançada pelo jato, pois sua trajetória se torna mais curta do que a da parábola descrita por projéteis.

No segundo momento, há dissipação pela colisão de massas de água e pela compressão das bolhas de ar incorporado (NOVAK et al., 2007). Na terceira fase ocorre o impacto do jato contra o leito rochoso. A pressão aplicada nesta fase contribui para o processo de erosão na fossa.

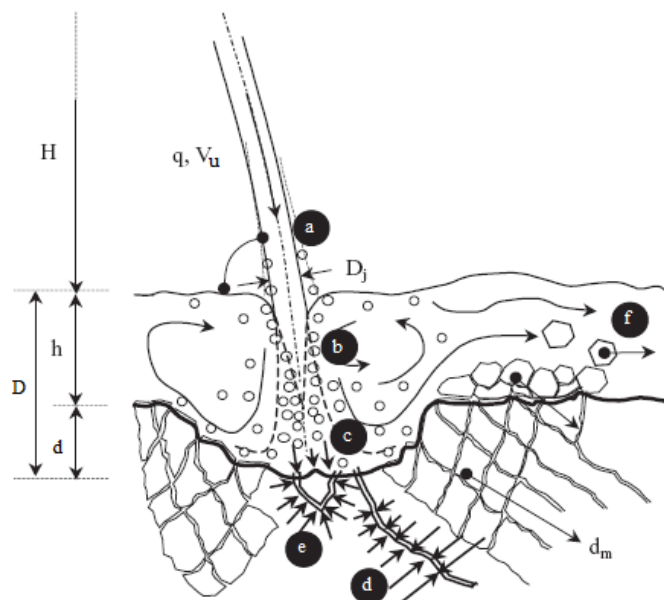
## 5.2 DESENVOLVIMENTO DA FOSSA DE EROSÃO

A operação do vertedouro com dissipador em salto de esqui transmite uma quantidade imensa de energia ao maciço rochoso, sendo inevitável a geração de uma fossa de erosão a jusante do mesmo. Bollaert e Schleiss (2003, p. 452) descrevem o processo erosivo como um fenômeno envolvendo três fases distintas (ar, água e rocha) e de descrição complexa, não havendo

atualmente modelos que simulem o processo de forma completa. O desenvolvimento da fossa de erosão, de forma geral, pode ser exposto através das seguintes etapas (figura 14):

- a) impacto do jato aerado;
- b) difusão turbulenta da camada cisalhante;
- c) pressões flutuantes na interface rocha-água;
- d) propagação de pressões flutuantes nas juntas do maciço e fraturamento da rocha;
- e) desalojamento do bloco;
- f) transporte do bloco a jusante.

Figura 14 – Identificação dos processos físicos no desenvolvimento da fossa de erosão



(fonte: adaptado de BOLLAERT; SCHLEISS, 2003, p. 452)

Brito (1991, p. 265-266) aponta os seguintes esforços atuantes no maciço rochoso a jusante de vertedouros:

- a) esforços naturais,
  - gravitacionais: estabilizantes em superfícies horizontais, porém possuem uma componente instabilizante em paredes da fossa;
  - estado de tensão natural: o processo de erosão alivia as tensões normais ao terreno, levando ao aumento da relação entre tensões horizontais e verticais no fundo da fossa;
- b) ações hidráulicas,

- correntes de alta velocidade: desagregam e removem material no local de impacto do jato. Causa o levantamento e movimentação de blocos na bacia;
- oscilação de pressões: a defasagem entre as pressões nas descontinuidades da rocha e a pressão na fossa pode desalojar blocos de rocha.

Bollaert<sup>6</sup> (2002 apud MANSO, 2006, p. 10) indica a existência de dois modos de fratura para a rocha. O primeiro, por ruptura frágil, pode ser gerado por cargas elevadas constantes ou por picos de pressão dentro de fissuras. O segundo modo é por fadiga, quando a rocha pode falhar devido a carregamentos cíclicos de curta duração.

### 5.3 CONDICIONANTES DE PROJETO

Brighetti (2004, p. [3]) faz menção aos seguintes condicionantes a serem analisados no estudo do projeto de um salto de esqui:

- a) geologia na região de impacto;
- b) barras submersas (depósitos);
- c) agitação;
- d) recirculação.

Brighetti (2004, p. [3]) dá ênfase ao conhecimento geológico da região do impacto, tanto em relação à resistência à compressão quanto ao detalhamento de suas fraturas. No caso da região analisada não atender aos esforços, mudanças na geometria da concha de lançamento podem aumentar a área da superfície de impacto, diminuindo a vazão específica. Também é possível a alteração do local de impacto a partir do direcionamento do canal do vertedouro até outro ponto. Pereira et al. (1991, p. 186) destacam o caso da Usina Hidrelétrica de Jaguará, na qual o vertedouro com salto de esqui descarrega sobre uma rocha extremamente fraturada. Embora a profundidade da fossa de erosão rapidamente atingiu 31 m, esta não representa risco de segurança à barragem.

A remoção de blocos rochosos e sua deposição a jusante da fossa pode trazer efeitos positivos para a dissipação, já que a obstrução parcial da área de escoamento eleva a profundidade do

---

<sup>6</sup> BOLLAERT, E. **Transient water pressures in joints and formation of rock scour due to high-velocity jet impact**. 2002. 297 f. Tese (Docteur ès Sciences) – Environnement Naturel, Architectural et Construit, École Polytechnique Fédérale de Lausanne, Lausanne.

colchão d'água. Contudo, esta elevação acarreta em diminuição na geração de energia no caso de usinas e, deve ser levada em conta para a fixação da cota da concha de lançamento para evitar a submersão da mesma (BRIGHETTI, 2004, p. [3],[6]; PEREIRA, 1996, p. 31).

A agitação muito intensa devido ao impacto do jato com a superfície d'água pode gerar danos nas proteções das margens. A eficiência de turbinas do tipo Bulbo, sensíveis a variações do nível d'água acima de 20 cm, também pode ser afetada. Nas turbinas tipo Kaplan e Francis a interferência é desprezível. Este efeito diminui conforme o afastamento do local de impacto (BRIGHETTI, 2004, p[3]).

A recirculação devido ao impacto do jato é outra característica que pode afetar o desenvolvimento da fossa de erosão. De acordo com Pereira (1996, p. 31):

As correntes de retorno (ou recirculação) normalmente afetam as áreas laterais, por exemplo, os taludes de barragens, como foi o caso da Usina de Água Vermelha (ver Oliveira et al.<sup>7</sup>,1985 [apud PEREIRA, 1996], e a montante da zona de impacto do jato, podendo ou não erodi-las dependendo de sua intensidade e da resistência do maciço. Cuidados especiais devem ser tomados quando a resistência do maciço rochoso nessas áreas apresenta resistência baixa. Nesse caso, a erosão lateral pode se desenvolver mais rapidamente, desconfinando a fossa, que pode evoluir, assimetricamente, na direção de muros laterais, margens e até em direção ao pé da barragem.

## 5.4 CRITÉRIOS DE DIMENSIONAMENTO

Embora a vazão de projeto seja estabelecida de acordo com a máxima precipitação possível ou com a vazão com tempo de retorno de 10.000 anos, Mason<sup>8</sup> (1993 apud BRIGUETTI, 2004, p. [4]) recomenda que o dimensionamento do salto de esqui seja otimizado para as vazões de período de recorrência de 200 a 1000 anos. O dimensionamento de um salto de esqui se dá pelos parâmetros a seguir e serão detalhados nas próximas seções:

- a) raio da concha de lançamento;
- b) ângulo de lançamento;
- c) cota da concha;

---

7 OLIVEIRA, A. R.; MELLIOS, G. A.; CARDIA, R. J. R. Erosion on the Left Wrap-Around of Água Vermelha Dam. In: Congress of the International Commission of Large Dams, 15, 1985, Lausanne. Q. 59, R. 6.

8 MASON, P. J. Practical guidelines for the design of flip buckets and plunge pools. **International Water Power & Dam Construction**, Dartford, v. 45, n. 9-10, p 40-45, Sept./Oct. 1993.

d) profundidade da fossa.

### 5.4.1 Raio da concha de lançamento

Briguetti (2004, p. [4]) recomenda que a concha deva:

[...] ter uma geometria que permita que o escoamento se amolde a ela sem transições bruscas, e que haja a manutenção da profundidade o mais constante possível ao longo dela, de tal forma que a face superior da lâmina de água, no lançamento, tenha um ângulo igual ao da face inferior da estrutura.

O autor recomenda a equação 1 como solução de raio único:

$$3y_b \leq R \leq 8y_b \quad (\text{equação 1})$$

Onde:

$y_b$  = altura d'água [m];

$R$  = raio [m].

Mason<sup>9</sup> (1993 apud BRIGUETTI, 2004, p. [5]) sugere uma solução para redução de custos que envolve o uso de dois raios. O primeiro raio não deve ser menor que  $5y_b$  correspondente a vazão de projeto. O segundo raio pode ser diminuído até o valor de  $3y_b$  correspondente a vazão de recorrência de 500 anos.

### 5.4.2 Ângulo de lançamento

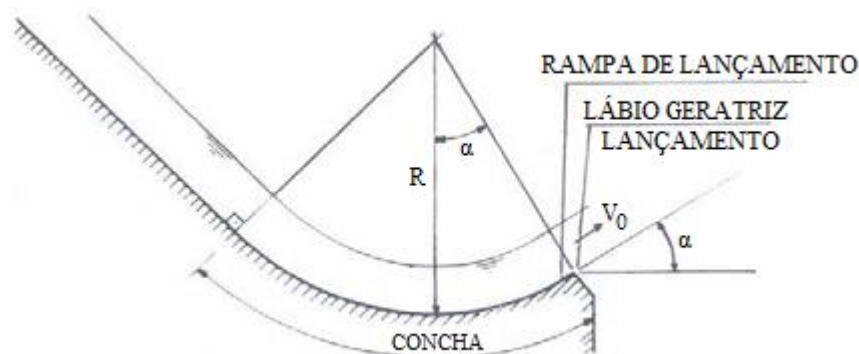
Brighetti (2004, p. [5]) aconselha o uso do ângulo de lançamento ( $\alpha$ ) de  $15^\circ$  quando o desnível entre a concha e o nível de jusante é elevado e de  $35^\circ$  quando o nível d'água está próximo à concha. Como recomendação geral, o autor indica o uso do ângulo lançamento ( $\alpha$ ) que determine ângulo de incidência ( $\beta$ ) com a superfície da água acima de  $40^\circ$ , exceto nos casos

---

<sup>9</sup> MASON, P. J. Practical guidelines for the design of flip buckets and plunge pools. **International water power & dam construction**, Dartford, v. 45, n. 9-10, p 40-45, Sept./Oct. 1993.

nos quais há benefícios de se ter uma redução da altura do nível d'água, como uma turbina abaixo do vertedouro. A figura 15 ilustra alguns dos parâmetros citados.

Figura 15 – Detalhe da concha de lançamento



(fonte: adaptado de BRIGHETTI, 2004, p. [5])

### 5.4.3 Cota da concha de lançamento

A cota da concha deve funcionar preferencialmente desafogada. Brighetti (2004, p. [6]) faz as seguintes considerações sobre o cálculo do nível d'água máximo de jusante:

No cálculo do nível de água máximo de jusante, não pode ser esquecido que com a erosão da fossa temos a formação da barra, que poderá elevar a cota calculada do nível da água para as condições de leito natural. Um critério é fixar como cota extrema o nível d'água máximo a ser observado a jusante, considerando a possível formação da barra. Como a vazão máxima de projeto tem um período de recorrência muito alto e, além disso, a ação do jato tem a tendência de provocar o rebaixamento junto à estrutura, com este critério há uma folga para as demais vazões.

### 5.4.4 Geometria de trajetória

De acordo com Hager (1995, p. 136), a forma mais simples de aproximação da trajetória é assumir que o movimento se dê no vácuo. As coordenadas do jato podem ser obtidas através da equação 2:

$$\frac{y}{H_d} = \tan(\alpha) \left( \frac{x}{H_d} \right) - \frac{1}{4} \left( \frac{x}{H_d \cos(\alpha)} \right)^2 \quad (\text{equação 2})$$

Onde:

y = ordenada da coordenada a partir do vértice da concha;

x = abscissa da coordenada a partir do vértice da concha;

$H_d$  = energia total em relação a crista do vertedouro;

$\alpha$  = ângulo de lançamento do jato.

Şenturk (1994, p. 358) recomenda o uso de 90% do valor de x para compensação da perda de alcance devido à resistência do ar.

#### 5.4.5 Profundidade da fossa

Os primeiros trabalhos que visavam determinar a profundidade da fossa de erosão decorrente de um jato datam do início do século XX. Mason e Arumugan (1985, p. 220-235) realizaram uma análise crítica de 31 fórmulas empíricas, agrupando-as conforme similaridade de parâmetros.

Os autores denominaram de grupo I as equações que se encaixavam na equação 3, com exceção das constantes de Bizas e Tschopp, que são utilizadas na equação 4. Os parâmetros K, x, y e z são característicos de cada fórmula e seus valores constam no quadro 2.

Quadro 2 – Coeficientes para as variáveis K, x, y e z

AUTOR	K	x	y	z	d
Schoklitsch	0,521	0,57	0,2000	0,3200	d90
Veronese (A)	0,202	0,54	0,2250	0,4200	d50
Veronese (B)	1,900	0,54	0,2250	0,0000	-
Patrasaev	3,900	0,50	0,2500	0,2500	d50
Eggenburger	1,440	0,60	0,5000	0,4000	d90
Hartung	1,400	0,64	0,3600	0,3200	d85
Franke	1,130	0,67	0,5000	0,5000	d90
Damle (A)	0,652	0,50	0,5000	0,0000	-
Damle (B)	0,543	0,50	0,5000	0,0000	-
Damle (C)	0,362	0,50	0,5000	0,0000	-
Chee e Padivar	2,126	0,67	0,1800	0,0630	d50
Bizas e Tschopp (*)	2,760	0,50	0,2500	1,0000	d90
Wu	1,180	0,51	0,2350	0,0000	-
Chee e Kung	1,663	0,60	0,2000	0,1000	d50
Martins (B)	1,500	0,60	0,1000	0,0000	-
Taraimovich	0,663	0,67	0,2500	0,0000	-
Machado	1,350	0,50	0,3145	0,0645	d90
SOFRELEC <sup>10</sup>	2,300	0,60	0,1000	0,0000	-
INCYTH <sup>11</sup>	1,413	0,50	0,2500	0,0000	-
Pinto	1,200	0,54	0,2250	0,0000	-

(fonte: adaptado de MASON; ARUMUGAN, 1985, p. 223)

$$D = K \frac{q^x H^y}{d^z} \quad (\text{equação 3})$$

<sup>10</sup> *Société Française d'Etudes et de Réalisation d'Équipement Électriques*<sup>11</sup> *Instituto Nacional de Ciencia y Técnica Hídricas, atual Instituto Nacional del Agua (INA)*



$$D = Kq^x H^y - Kd \quad (\text{equação 4})$$

Onde:

D = profundidade de erosão;

q = vazão específica;

H = desnível total entre montante e jusante;

d = diâmetro característico do bloco.

As equações 5, de Jaeger, e 6, de Martins, inserem um parâmetro h (em metros) para levar em conta o nível de jusante no cálculo da profundidade da fossa. Os demais parâmetros são os mesmos apresentados anteriormente para as equações 3 e 4:

$$D = 0,60q^{0,50} H^{0,25} \frac{h^{0,333}}{d} \quad (\text{equação 5})$$

$$D = 0,14 \left( 7 \frac{Q^3 H^{1,5}}{d^2} \right) - 0,73 \frac{h^2}{\left( 7 \frac{Q^3 H^{1,5}}{d^2} \right)} + 1,7h \quad (\text{equação 6})$$

Em análise própria, baseada somente em resultados de modelos reduzidos, Mason e Arumugan sugeriram a equação 7 para a determinação de profundidade da fossa. Na análise conjunta de modelos reduzidos e protótipos, foi proposta por eles a equação 8, que para valores pequenos de H produz resultados como os da equação 7. Novamente, os parâmetros utilizados são os mesmos apresentados anteriormente para as equações 3 e 4:

$$D = 3,27 \frac{q^{0,60} H^{0,05} h^{0,15}}{g^{0,30} d_m^{0,10}} \quad (\text{equação 7})$$

$$D = (6,42 - 3,10H^{0,10}) \frac{q^{(0,60-H/300)} H^{(0,05-H/200)} h^{0,15}}{g^{0,30} d_m^{0,10}} \quad (\text{equação 8})$$

Pinto (1996, p. 4-5) faz o seguinte comentário sobre as equações 7 e 8:

A proposta de novas fórmulas é justificada pelos autores com base na melhor aderência aos dados experimentais, em confronto com as até então existentes. Entretanto, a simples regressão matemática não permite recomendar esta ou aquela fórmula, já que em princípio não há homogeneidade de dados, e em particular a qualidade da rocha e o tempo de duração das vazões não são considerados.

A qualidade, em termos de erodibilidade, do maciço rochoso pode ser descrita através do fator K na equação 3. Xia Yu-Chang<sup>12</sup> (1988 apud PINTO, 1996, p. 8), utilizando os expoentes x igual a 0,5; y igual a 0,5 e z igual a 0, recomenda valores para a variável K nas seguintes condições:

- a) K = 0,9 para rochas sólidas com fraturas e falhas pouco desenvolvidas;
- b) K = 1,4 para rochas medianamente duras, com algum fraturamento;
- c) K = 1,8 para rochas fracas muito fraturadas e com falhas frequentes.

Brito (1991, p. 265-281) apresenta um método empírico para a classificação de rochas baseado nas características de suas descontinuidades, padrão estrutural e diâmetro médio do material. Esta classificação vai de 1 (muito resistentes) a 5 (muito erodíveis). Estas classes são relacionadas ao fator K, utilizando os coeficientes da fórmula de Veronese (B), de acordo com o quadro 3.

<sup>12</sup> YU-CHANG, X. A comprehension of the prototype observation results of high velocity flow in hydraulics for high dams. In: 7th IAHR-APD Congress, 7., 1990. **Proceedings...** [S.l.]:IAHR, Beijing, 1990.

Quadro 3 – Classificação de maciços por Brito

Classe do maciço	K
I	0 a 0,25
II	0,25 a 0,5
III	0,5 a 0,9
IV	0,9 a 1,5
V	1,5 a 2,5

(fonte: BRITO, 1991, p. 261)

### 5.4.6 Pressão dinâmica

Hartung e Häusler<sup>13</sup> (1973, apud PEREIRA, 1996, p. 71) determinaram a equação 9 para estimar a propagação de pressão de um jato livre incidindo num colchão d'água não confinado:

$$\frac{P}{Pu} = \frac{y_k}{y} e^{-\frac{\pi}{16} \left(10 \frac{x}{y}\right)^2} \quad (\text{equação 9})$$

Onde:

P = pressão no ponto desejado;

Pu = pressão do jato no impacto com a água;

y<sub>k</sub> = comprimento do núcleo do jato;

x,y = coordenadas do ponto desejado.

<sup>13</sup> HARTUNG, F; HÄUSLER, E. Scours, Stilling Basins and Downstream Protection under free Overfall Jets at Dams, **Proceedings of the 11th Congress on Large Dams**, Madrid, v. II, Q.41, R3, p. 39–56, 1973.

## 6 DESENVOLVIMENTO

Este capítulo é dividido em três partes: a primeira seção serve de base para as seguintes, fornecendo informações sobre a operação e a geologia local de vertedouros de sete barragens. Na segunda parte é verificada a validade dos valores de K sugeridos por Yu-Chang em relação à descrição geológica das barragens em análise. Por fim, a terceira seção apresenta uma estimativa das pressões atuantes no ponto de impacto do jato com o maciço rochoso e sugere-se uma relação entre a pressão e o valor de K.

### 6.1 VERTEDOUROS ANALISADOS

Para o desenvolvimento deste trabalho buscou-se na literatura dados sobre a geologia do maciço rochoso de algumas barragens que possuem vertedouro com salto de esqui. Estes dados são apresentados no quadro 4.

Quadro 4 – Informações sobre a geologia das barragens analisadas

Barragem	Descrição do maciço da bacia de impacto	Referência
UHE Jaguara	Quartzito praticamente puro, quase sem mica, de alta resistência, porém muito fraturado	(PEREIRA et al. 1991, p. 178)
UHE Estreito	Camadas alternadas de quartzito puro e de quartzito sericítico, finamente laminado	(ÁVILA, 1982, p. 277)
UHE Itaipu	Basalto colunar fraturado	(SZPILMAN et al., 1991, p. 239)
UHE São Simão	Camadas quase horizontais de basalto intercaladas por brecha basáltica e/ou sedimentar	(JACARANDÁ; MARCOLINI, 1982, p. 523)
UHE Foz do Areia	Predominância de basaltos densos e, em menor volume, brecha	(MATERON et al., 1982, p. 118)
UHE Itá	Camada de basalto subhorizontal muito fraturada entre EL 240,0 m e EL 250,0 m	(ALBERTONI; XAVIER, 2009, p. 207)
UHE Água Vermelha	Camadas subhorizontais de basalto denso intercaladas por brecha basáltica	(BJÖRNBERG et al., 1980, p. 273-274)

(fonte: elaborada pelo autor)

Foram obtidos também dados referentes ao histórico operacional do vertedouro, assim como informações sobre a sua geometria, níveis d'água e profundidade da fossa (quadro 5). Cabe ressaltar que a vazão máxima vertida é referente à maior cheia até a data de realização da batimetria disponível na literatura, sendo possível que na presente data já haja registro de vazões maiores.

Quadro 5 - Dados operacionais das barragens analisadas

Dado	Simb.	Unid.	Vertedouro						
			(a) Jaguara	(b) Estreito	(c) Itaipu	(d) São Simão	(e) Foz do Areia	(f) Itá	(g) Água Vermelha
Vazão máxima vertida	Q <sub>M</sub>	m <sup>3</sup> /s	3.873	4.132	39.850	12.563	8.848	12.716	11.107
NA reservatório	NAres	m	557,5 <sup>14</sup>	622,0	220,0	401,0	744,0 <sup>15</sup>	370,0 <sup>16</sup>	383,3
NA jusante	NAjus	m	517,5	560,0	126,0	332,0	616,0	278,0	329,0
Cota bordo de lançamento	Ez1	m	526,0	575,6	137,5	336,0	625,5	306,0	340,0
Cota fundo da fossa de erosão	EzD	m	485,0	532,8	67,0	320,0	591,0	224,4	313,2
Queda bruta	H	m	40,0	62,0	94,0	69,0	128,0	92,0	54,3
Largura no bloco de lançamento	B	m	74,3	84,0	335,0	156,0	70,6	130,5	148,2
Vazão específica no bloco de lançamento (máxima vertida)	q	m <sup>3</sup> /s/m	52,2	49,2	119,0	80,5	125,3	97,4	74,9
Profundidade da fossa	D = (d+h)	m	32,5	27,2	59,0	12,0	25,0	53,6	15,8

(fonte: (a) (PEREIRA et al., 1991, p. 165-195; SUCHAROV, 2010a, p. 83-91);  
 (b) (CARVALHO, 2010, p. 41-48; trabalho não publicado<sup>17</sup>);  
 (c) (SZPILMAN et al., 1991, p. 239); (d) (SUCHAROV, 2010b, p. 155-160);  
 (e) (MACHADO, 2010, p. 49-56) (f) (ANDRZEJEWSKI et al., 2010, p. 57-68);  
 (g) (RODRIGUES; PEREIRA, 1991, p. 203-207)

<sup>14</sup> Nível normal do reservatório.

<sup>15</sup> Idem.

<sup>16</sup> Idem.

<sup>17</sup> Artigo escrito para o XIX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos (ainda não publicado): BUFFON, F. T.; MARZEC, E.; MARQUES, M. G.; PALAURO, C.; CANELLAS, A. V. B. Estimativa da Profundidade da Fossa de Erosão a Jusante de Vertedouro Salto Esqui.

## 6.2 PREVISÃO DE EROÇÃO POR FÓRMULAS EMPÍRICAS

A previsão da profundidade de fossa por métodos empíricos foi objeto de estudo de diversos autores, baseado em suas experiências com vertedouros em modelo físico ou em protótipo. Apresenta-se no quadro 6 os resultados de diversos métodos para as sete barragens em estudo.

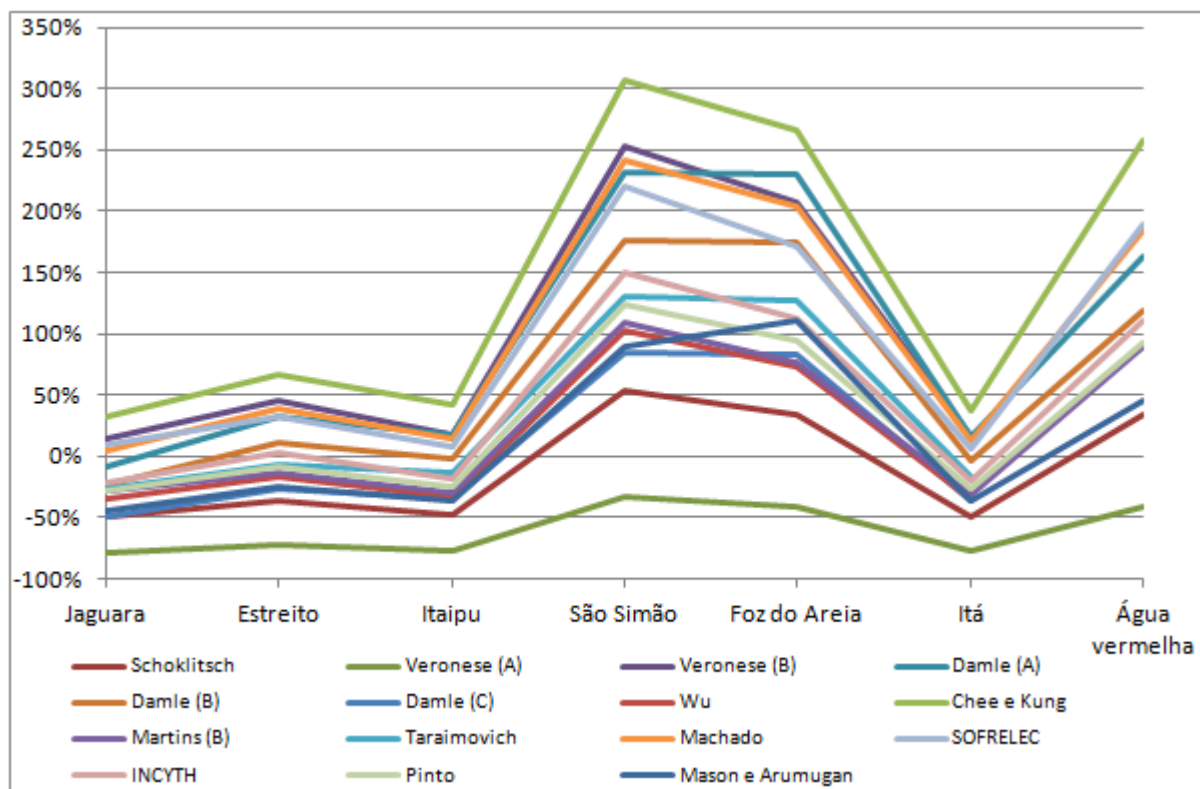
Quadro 6 - Previsão de erosão por métodos empíricos

Método	Jaguara	Estreito	Itaipu	São Simão	Foz do Areia	Itá	Água vermelha
Schoklitsch	16,2	17,1	30,7	18,4	33,6	27,3	21,1
Veronese (A)	7,0	7,5	13,3	8,1	14,6	11,9	9,1
Veronese (B)	36,9	39,4	69,7	42,4	76,9	62,3	48,0
Damle (A)	29,8	36,0	68,9	39,8	82,6	61,7	41,6
Damle (B)	24,8	30,0	57,4	33,1	68,8	51,4	34,6
Damle (C)	16,5	20,0	38,3	22,1	45,8	34,3	23,1
Chee e Padivar	63,8	66,3	129,2	71,9	141,4	112,6	85,9
Bizas e Tschopp (*)	49,4	53,6	93,0	57,7	103,2	83,7	64,2
Wu	21,1	22,7	39,3	24,4	43,4	35,3	27,3
Chee e Kung	42,8	45,2	83,4	48,7	91,5	73,6	56,6
Martins (B)	23,3	23,5	41,6	25,1	44,2	36,8	29,8
Taraimovich	23,6	25,3	50,7	27,6	56,8	44,1	32,5
Machado	34,0	37,9	67,2	41,1	76,0	60,4	44,9
SOFRELEC	35,7	36,0	63,7	38,4	67,8	56,4	45,7
INCYTH	25,7	27,8	48,0	29,9	53,2	43,2	33,2
Pinto	23,3	24,9	44,0	26,8	48,6	39,4	30,3
Mason e Arumugan	17,9	20,6	37,2	22,7	52,7	34,5	22,9
Observado	32,5	27,2	59,0	12,0	25,0	53,6	15,8

(fonte: elaborada pelo autor)

Uma comparação entre a profundidade prevista e observada é ilustrada na figura 16 em termos de desvio percentual.

Figura 16 – Desvio percentual entre profundidade prevista e observada



(fonte: elaborado pelo autor)

Percebe-se que nenhum método consegue prever de forma fiel a erosão para todos os casos, com erros acentuados, especificamente, para São Simão, Foz do Areia e Água Vermelha. Nestas três barragens o comportamento da rocha frente às descargas difere do esperado pelos autores, já que muitos destes ajustaram suas equações através de modelos físicos com fundo não coesivo na expectativa de abordar o pior caso possível de um maciço extremamente fraturado, o que não é o caso das UHE citadas.

Para adequar sua equação de acordo com as qualidades do maciço, Yu-Chang sugeriu diferentes valores ao coeficiente K de acordo com as condições de fraturamento da rocha. Este autor utiliza a equação 3 com os mesmos expoentes do antigo *Instituto Nacional de Ciencia y Técnica Hídricas* (INCYTH), atual *Instituto Nacional del Agua* (INA).

A escolha da equação de Yu-Chang/INCYTH é devido a sua homogeneidade dimensional, não presente na maioria dos métodos empíricos, quando reescrita na forma da equação 10:

$$D = (K^*) \frac{q^{\frac{1}{2}} H^{\frac{1}{4}}}{g^{\frac{1}{4}}} \quad (\text{equação 10})$$

Onde:

$D$  = profundidade de erosão (m);

$K^*$  = coeficiente relacionado a erodibilidade;

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

$H$  = desnível total entre montante e jusante (m);

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

O coeficiente  $K$  de Yu-Chang é igual a  $K^*/g^{1/4}$ . Os resultados apresentados a seguir, para facilitar a comparação com os valores da literatura, serão apresentados em termos de  $K$ , na forma da equação 11:

$$D = K q^{\frac{1}{2}} H^{\frac{1}{4}} \quad (\text{equação 11})$$

Tomando os dados de vazão específica, queda bruta e profundidade de erosão do quadro 5 podemos atribuir ao maciço de cada barragem um valor para  $K$  (quadro 7).



Quadro 7 – Resultados de K para cada maciço

Vertedouro	H (m)	q (m <sup>3</sup> /s/m)	D (m)	K
São Simão	69	53,9	12	0,57
Foz do Areia	128	125,3	25	0,66
Água vermelha	54,3	43,3	15,8	0,67
Estreito	62	49,2	27,2	1,38
Itaipu	94	119	59	1,74
Itá	92	97,4	53,58	1,75
Jaguara	40	52,2	32,5	1,79

(fonte: elaborado pelo autor)

Os resultados obtidos para K podem ser comparados com a descrição da geologia no quadro 8:

Quadro 8 – Comparação entre K e geologia na bacia de impacto

Barragem	K	Descrição do maciço
São Simão	0,57	Camadas quase horizontais de basalto intercaladas por brecha basáltica e/ou sedimentar
Foz do Areia	0,66	Predominância de basaltos densos e, em menor volume, brecha
Água vermelha	0,67	Camadas subhorizontais de basalto denso intercaladas por brecha basáltica
Estreito	1,38	Camadas alternadas de quartzito puro e de quartzito sericítico, finamente laminado
Itaipu	1,74	Basalto colunar fraturado
Itá	1,75	Camada de basalto subhorizontal muito fraturada entre EL 240,0 m e EL 250,0 m
Jaguara	1,79	Quartzito praticamente puro, quase sem mica, de alta resistência, porém muito fraturado

(fonte: elaborado pelo autor)

Os valores baixos do coeficiente K para São Simão, Foz do Areia e Água Vermelha indicam um maciço rochoso de alta integridade. Pinto<sup>18</sup> (1987 apud PEREIRA 1996, p. 51) já havia analisado o caso de São Simão e Foz do Areia e sugerido o valor de 0,6 para basaltos. Salienta-se que na análise de Pinto foi utilizada a equação de Veronese, porém os expoentes desta para vazão específica e queda são muito próximos aos de Yu-Chang e INCYTH.

O valor de K para Estreito é próximo do valor de 1,4 sugerido por Yu-Chang para rochas medianamente duras, com algum fraturamento. Nos casos onde havia menção de alto grau de fraturamento, Jaguará, Itá e Itaipu, os coeficientes ficaram próximos do valor de 1,8, conforme sugerido por Yu-Chang para rochas muito fraturadas.

O quadro 9 apresenta informações sobre o vertimento das barragens analisadas.

Quadro 9 – Duração de vertimento do vertedouros

Vertedouro	Período de operação	Dados disponíveis	Duração acumulada do vertimento		Duração contínua do vertimento
	anos	anos	anos	%	anos
São Simão	25	24	10,5	43	1,5
Foz do Areia	23	22	5,7	26	1
Água vermelha	N/D	N/D	N/D	20%	N/D
Estreito	34	33	3,3	10	0,4
Itaipu	20	20	15,6	78	7
Itá	10	N/D	N/D	5%	N/D
Jaguará	39	N/D	N/D	N/D	N/D

(fonte: adaptado de SARKARIA, 2010, p. 221)

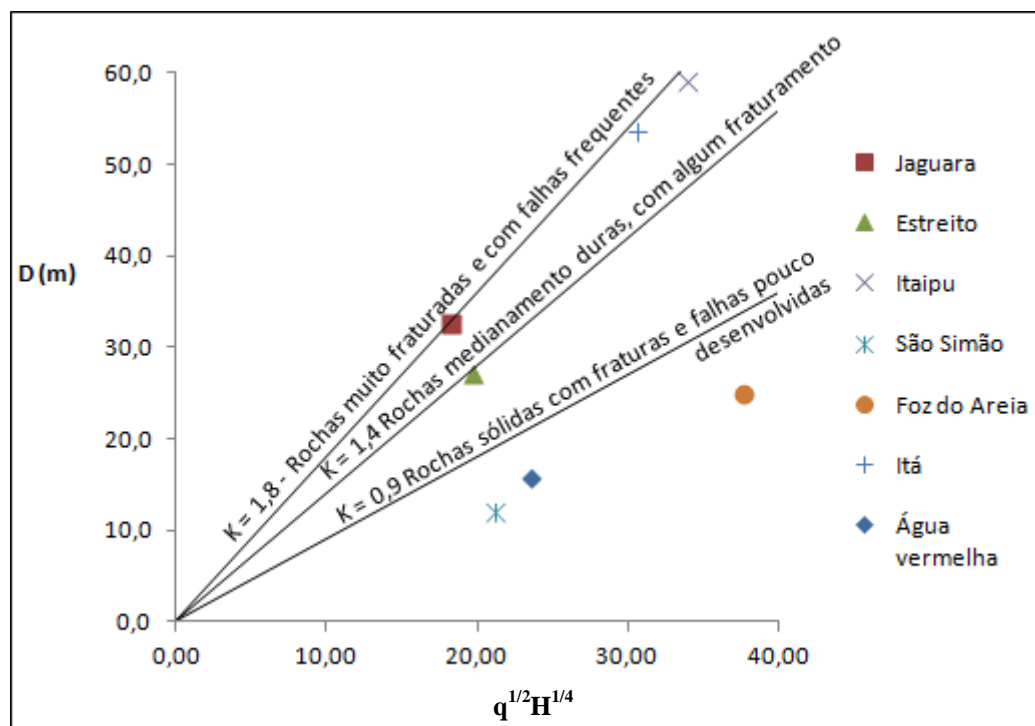
O gráfico apresentado na figura 17 demonstra a dispersão de D pelo fator  $q^{1/2}H^{1/4}$ . As retas de diferentes inclinações são as recomendações de Xiu Yu-Chang para diferentes condições do maciço.

Os coeficientes recomendados por Yu-Chang se mostram de acordo com as descrições geológicas dos maciços. Para os basaltos de Foz do Areia, São Simão e Água vermelha, nota-

<sup>18</sup> O autor não indicou a que obra se refere.

se que a reta de inclinação 0,9 seria conservadora demais para descrever o maciço adequadamente.

Figura 17 – Profundidade de erosão pelo fator  $q^{1/2}H^{1/4}$

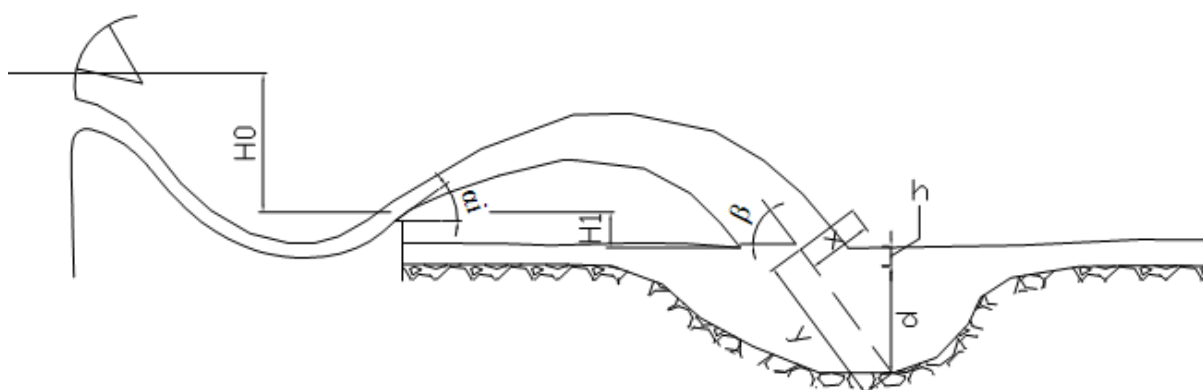


(fonte: elaborado pelo autor)

### 6.3 PRESSÕES DINÂMICAS

Pelo método de propagação de pressão de jatos livres de Hartung e Hausler (1973 apud PEREIRA, 1996, p. 43) se pode estimar a pressão dinâmica atuando no ponto de impacto com o maciço. As principais grandezas empregadas para o cálculo destas pressões estão representadas na figura 18:

Figura 18 – Esquema representativo das grandezas envolvidas para a estimativa de pressões dinâmicas



(fonte: elaborado pelo autor)

O método de Hartung e Hausler foi desenvolvido para jatos livres incidindo em colchões não confinados. As paredes da fossa de erosão são elementos confinantes e modificam a propagação de pressão no protótipo, portanto a utilização deste método é empregada de forma livre.

O procedimento para a estimativa das pressões foi baseado no roteiro apresentado por Pereira et al. (1991, p. 192). A pressão dinâmica considerada é aquela que se propaga por uma distância  $Y$  no alinhamento do ângulo de impacto do jato com a água. A distância  $Y$  é definida como aquela na qual  $(d+h)$  é igual à profundidade de erosão do vertedouro em análise.

O quadro 10 apresenta a rotina de cálculo para a pressão dinâmica utilizada neste trabalho. As informações do quadro 5, sobre geometria do vertedouro, condições de nível d'água, cotas de concha, etc. serviram de base para a elaboração deste quadro.

Quadro 10 – Estimativa de pressão dinâmica

Dado	Simb.	Unid.	UHE						
			(a) Jaguara	(b) Estreito	(c) Itaipu	(d) São Simão	(e) Foz do Areia	(f) Itá	(g) Água Vermelha
Queda até o bordo de lançamento	H0	m	31,5	46,5	82,5	65,0	118,5	64,0	43,3
Tirante no bordo de lançamento	d1	m	2,1	1,6	3,0	1,5	2,6	2,8	2,6
Ângulo de lançamento	$\alpha$	°	32,0	35,0	25,0	28,0	20,0	28,0	33,5
Velocidade do jato no bordo	V1	m/s	24,8	30,2	40,2	35,7	48,2	35,4	29,1
Altura do bordo de lançamento	H1	m	10,6	17,2	14,5	5,5	12,1	30,8	13,6
Velocidade do jato na zona de impacto	Vu	m/s	28,0	34,9	42,9	36,8	50,1	42,5	32,6
Largura do jato na zona de impacto	2Bu	m	1,9	1,4	2,8	1,5	2,5	2,3	2,3
Comprimento do núcleo do jato	yk	m	9,3	7,1	13,9	7,3	12,5	11,5	11,5
Pressão hidrodinâmica na zona de impacto	Pu	m.c.a	40,0	62,0	94,0	69,0	128,0	92,0	54,3
Ângulo de impacto	$\beta$	°	42,0	45,6	33,3	32,0	26,5	43,5	43,3
Profundidade da fossa	D = (d+h)	m	32,5	27,2	59,0	12,0	25,0	53,6	15,8
X	x	m	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Y	y	m	48,5	38,1	107,5	22,6	56,1	77,9	23,0
Pressão dinâmica	Pf	m.c.a	7,7	11,5	12,1	22,4	28,6	13,6	27,1

(fonte: elaborado pelo autor)

Uma comparação entre os adimensionais  $Pf/2Bu$  e  $K$  é apresentada no quadro 11:

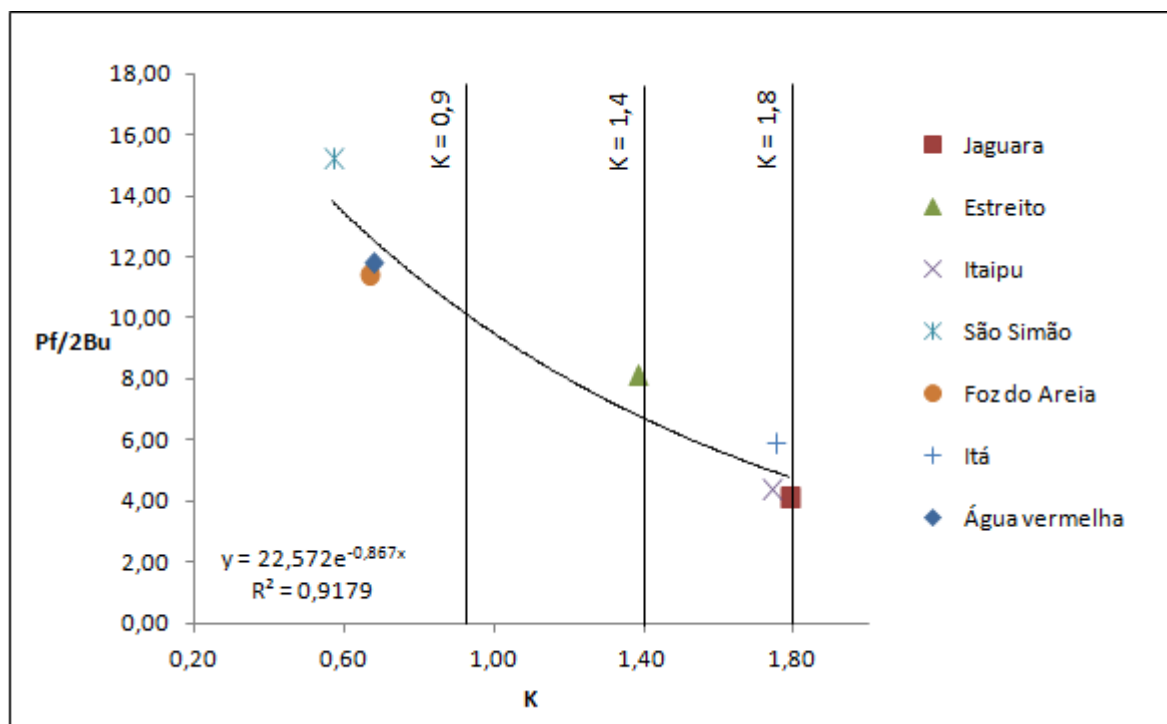
Quadro 11 – Comparação entre K e Pf/2Bu

Barragem	K	Pf/2Bu
São Simão	0,57	15,25
Foz do Areia	0,66	11,41
Água vermelha	0,67	11,79
Estreito	1,38	8,14
Itaipu	1,74	4,37
Itá	1,75	5,91
Jaguara	1,79	4,12

(fonte: elaborado pelo autor)

A figura 19 apresenta esta comparação em forma gráfica. A equação 12 sugere uma relação exponencial entre os adimensionais.

Figura 19 – Gráfico da relação entre Pf e K



(fonte: elaborado pelo autor)

$$\frac{Pf}{2Bu} = 22,572e^{-0,867K} \quad (\text{equação 12})$$

Baseado na figura 19 sugere-se as seguintes faixas de estimativa de pressão dinâmica, dada uma largura de jato e tipo de geologia:

- a)  $Pf/2Bu = 12$  para  $K = 0,6$ ;
- a)  $Pf/2Bu = 10$  para  $K = 0,9$ ;
- a)  $Pf/2Bu = 7$  para  $K = 1,4$ ;
- a)  $Pf/2Bu = 5$  para  $K = 1,8$ .

Estes valores podem servir de referência, mas muito ainda precisa ser estudado, com a obtenção de dados mais precisos para a verificação da relação entre a pressão dinâmica e  $K$ . Para estudos futuros sugere-se a utilização do banco de dados sobre erosão a jusante de vertedouros do quadro 12, no anexo 1, que por falta de mais informações não foi utilizado neste trabalho.

## 7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Obras de grande porte, como barragens, merecem atenção especial em relação aos processos que podem afetar a sua segurança. O sistema dissipador tem um papel importantíssimo ao garantir que cheias sejam descarregadas de forma segura e que seu retorno ao rio gere o mínimo de danos.

O salto de esqui é o tipo mais econômico de dissipador para grandes barragens e a ampla variedade na resistência a erosão dos maciços rochosos justifica o estudo da interação das condições hidrodinâmicas com as características geotécnicas da rocha. Rochas mais resistentes permitem o impacto do jato com um colchão de água menor, diminuindo os custos de construção, como a necessidade de pré-escavação a jusante do vertedouro.

Este trabalho procurou validar o emprego das faixas do coeficiente  $K$ , sugeridas por Yu-Chang, em relação ao tipo de geologia da bacia de impacto e verificou que elas são válidas. Os valores do coeficiente para maciços fraturados foram muito próximos do recomendado, porém os basaltos brasileiros apresentaram resistência maior que a estimada pelo autor para o melhor caso. Há de se ressaltar que a duração da operação do vertedouro, como no caso de Itaipu, pode influenciar o valor de  $K$ , aproximando-o do caso fraturado.

A tentativa de relacionar a pressão no impacto com o maciço e o coeficiente  $K$  se mostrou apropriada para as sete barragens originalmente analisadas, permitindo que fossem sugeridos valores limites de  $Pf/2Bu$  para determinação das pressões máximas admissíveis para que a erosão se estabilize.



## REFERÊNCIAS

- ALBERTONI, S. C.; XAVIER, L. V. The Itá hydropower plant on the Uruguay river. In: PIASENTIN, C. **Main Brazilian Dams III: design, construction and performance**. [S. l.: s. n.], 2009.
- ÁVILA, J. P. Technical data about Estreito Dam. In: ÁVILA, J. P.; BICUDO, R. I.; PIERRE, L. F. **Main Brazilian Dams: design, construction and performance**. São Paulo: Novo Grupo Ed. Técnica, 1982.
- BJÖNBERG, A. J. S.; SANTOS, A. F. F.; ZEFES, S. Decisões técnicas relacionadas com a barragem de Água Vermelha. In: SEMINÁRIO NACIONAL DE GRANDES BARRAGENS, 13., 1980, Rio de Janeiro. **Anais...** São Paulo: Comitê Brasileiro de Barragens, 1980. p. 269-291.
- BOLLAERT, E.; SCHLEISS, A. Scour of rock due to the impact of plunging high velocity jets Part I: A state-of-the-art review. **Journal of Hydraulic Research**, [S. l.], v. 41, n 5, p. 451-464, 2003.
- BRITO, S. N. Investigação geomecânica a jusante de vertedouros com dissipador em salto de esqui. In: SEMINÁRIO NACIONAL DE GRANDES BARRAGENS, 19., 1991, Aracaju. **Anais...** São Paulo: Comitê Brasileiro de Barragens, 1991. p. 265-281.
- BRASIL. Ministério dos Transportes. Secretaria de Política Nacional de Transportes. Banco de Informações e Mapas dos Transportes. Resumo Informativo da Barragem de UHE Tucuruí – PA. 2003. Disponível em: <<http://www.transportes.gov.br/bit/barragens/tucurui.htm>>. Acesso em: 21 nov. 2010.
- BRIGHETTI, G. Critérios para o Dimensionamento de Extravadores com Salto de Esqui. In: CONGRESSO LATINO AMERICANO DE HIDRÁULICA, 21., 2004, São Pedro. **Anais...** São Pedro: IARH/AIPH, 2004.
- CARVALHO, E. Vertedouro da UHE Luiz Carlos Barreto de Carvalho (Estreito): erosões a jusante e obras de recuperação. In: PIASENTIN, C. **Grandes Vertedouros Brasileiros: uma panorâmica da prática e da experiência brasileiras em projeto e construção de vertedouros para grandes barragens**. [S. l.: s. n.], 2010.
- CHADWICK, A.; MORFETT, J.; BORTHWICK, M. **Hydraulics in civil and environmental engineering**. 4th ed. Oxon: Spon Press, 2004.
- DAVIS, C. V. Concrete dams, basic principles of design. In: DAVIS, C. V.; SORENSEN, K. E. (Ed.). **Handbook of applied hydraulics**. 3rd ed. New York: McGraw-Hill, 1969. p. 9-1 - 9-34.
- ENERGIA de Itaipu mais cara para distribuidoras. **Jornal de Itaipu Eletrônico**. Disponível em: <[http://jie.itaipu.gov.br/print\\_node.php??secao=turbinadas1&nid=8848](http://jie.itaipu.gov.br/print_node.php??secao=turbinadas1&nid=8848)>. Acesso em: 15 nov. 2010.

HAGER, W. H. Trajectory basins. In: VISCHER, D. L.; HAGER, W. H. (Ed.). **Energy Dissipators**. Lisse: A. A. Balkema., 1995. p. 111-150. Hydraulic Structures Design Manual . v. 9.

HIDRELÉTRICA a fio d'água será: usina Luiz Carlos Barreto De Carvalho. **Revista Furnas**. [S. l.], p. 6, fev. 2001. Disponível em: <[http://www.furnas.com.br/arqtrab/ddppg/revistaonline/linhadireta/RF317\\_capa.pdf](http://www.furnas.com.br/arqtrab/ddppg/revistaonline/linhadireta/RF317_capa.pdf)>. Acesso em: 20 nov. 2010.

HOUK, I. E.; WENGLER, R. P. Arch Dams. In: DAVIS, C. V.; SORENSEN, K. E. (Ed.). **Handbook of applied hydraulics**. 3rd ed. New York: McGraw-Hill, 1969. p. 14-1 - 14-56.

JACARANDÁ, W.; MARCOLINI, E. Technical data about São Simão Dam. In: ÁVILA, J. P.; BICUDO, R. I.; PIERRE, L. F. **Main Brazilian Dams: Design, construction and performance**. São Paulo: Novo Grupo Ed. Técnica, 1982.

KHATSURIA, R. M. **Hydraulics of Spillways and Energy Dissipators**. New York: Marcel Dekker, 2005.

MANSO, P. F. A. **The influence of pool geometry and induced flow patterns in rock scour by high-velocity plunging jets**. 2006. 294 f. Tese (Docteur ès Sciences) – Environnement naturel, architectural et construit, École Polytechnique Fédérale de Lausanne, Lausanne.

MASON, P. J.; ARUMUGAM, K. Free Jet Scour Below Dams and Flip Buckets. **Journal of Hydraulic Engineering**, New York, v. 111, n. 2, p. 220-235, Feb. 1985.

MATERON, B.; MASSUCCI, C. J. J.; MAURER, E.; PINTO, N. L. S.; MARQUES FILHO, P. L. Foz do Areia hydroelectric plant. In: ÁVILA, J. P.; BICUDO, R. I.; PIERRE, L. F. **Main Brazilian Dams: Design, construction and performance**. São Paulo: Novo Grupo Ed. Técnica, 1982.

MAYER, P. R.; BOWMAN, J. R. Spillway Crest Gates. In: DAVIS, C. V.; SORENSEN, K. E. (Ed.). **Handbook of applied hydraulics**. 3rd ed. New York: McGraw-Hill, 1969. p. 21-1 - 21-16.

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

PEREIRA, G. M. Erosão a jusante de vertedouros. **Revista do Comitê Brasileiro de Grandes Barragens: Erosão em bacias de lançamento – aspectos hidráulicos e geotécnicos**. São Paulo, p. 15-71, maio 1996.

PEREIRA, G. M.; BRITO, S. N.; GONÇALVES, É. S. Considerações sobre utilização de dissipador de energia em salto de esqui em maciços rochosos são muito fraturados: o caso da UHE de Jaguará. In: SEMINÁRIO NACIONAL DE GRANDES BARRAGENS, 19., 1991, Aracaju. **Anais...** São Paulo: Comitê Brasileiro de Barragens, 1991. p. 165-195.

PINTO, N. L. S. Apresentação e conceituação geral sobre o tema. **Revista do Comitê Brasileiro de Grandes Barragens: Erosão em bacias de lançamento – aspectos hidráulicos e geotécnicos**. São Paulo, p. 1-11, maio 1996.

SARKARIA, G. S.; PIASENTIN, C.; FIORINI, A. S.; CARVALHO, E. A Eficiência Operacional de Grandes Vertedouros: a experiência de oito vertedouros brasileiros. In: PIASENTIN, C. **Grandes Vertedouros Brasileiros: uma panorâmica da prática e da experiência brasileiras em projeto e construção de vertedouros para grandes barragens.** [S. l.: s. n.], 2010.

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

ŞENTURK, F. **Hydraulics of Dams and Reservoirs.** Highlands Ranch: Water Resources Publications, 1994.

SUCHAROV, M. Erosão da Bacia de Impacto do Vertedouro de Jaguará. In: PIASENTIN, C. **Grandes Vertedouros Brasileiros: uma panorâmica da prática e da experiência brasileiras em projeto e construção de vertedouros para grandes barragens.** [S. l.: s. n.], 2010a.

SUCHAROV, M. Vertedouro de São Simão: desempenho da bacia de impacto. In: PIASENTIN, C. **Grandes Vertedouros Brasileiros: uma panorâmica da prática e da experiência brasileiras em projeto e construção de vertedouros para grandes barragens.** [S. l.: s. n.], 2010b.

SZPILMAN, A.; ROSSO, J. A.; PIASENTIN, C.; FIORINI, A. S. Vertedouro de Itaipu e região a jusante do trampolim: comportamento hidráulico e estrutural após 8 anos de operação. In: SEMINÁRIO NACIONAL DE GRANDES BARRAGENS, 19., 1991, Aracaju. **Anais...** São Paulo: Comitê Brasileiro de Barragens, 1991. p. 239-254.

UNITED STATES OF AMERICA. Department of Interior. Bureau of Reclamation. **Design of Arch Dams.** Denver: United States Government Printing Office, 1977.

VISCHER, D. L. Introduction. In: VISCHER, D. L.; HAGER, W. H. (Ed.). **Energy Dissipators.** Lisse: A. A. Balkema., 1995. p. 1-8. Hydraulic Structures Design Manual . v. 9.

## **ANEXO A – Banco de dados de erosão a jusante de vertedouros**

Quadro 12 – Observações de protótipo

Obra ou autor	Q (m <sup>3</sup> /s/m)	H (m)	D (m)	Obra ou autor	Q (m <sup>3</sup> /s/m)	H (m)	D (m)
Mirtskhulava, Rússia	60	17	7	Tienlung	40	34	20
Smolyaninov, Rússia	50	26	11	Tarbela	26,5	96	23
Damle, Índia	25	27	8,1	Colbun	25,2	108	24,1
Vyzgo, Rússia	32	26	11	Cunha, Lancastre	170	53	55
Damle, Índia	34	32	12,2	Cahora Bassa	75	96	43,5
Damle, Índia	72	36	18,3	Houlung	25	31	19
Wuchiev	68,8	49	20	Tarbela	53,1	97,8	37
Shihmen	95,2	97	30	Cabora Bassa	163	102,7	66
Kukuan	75,8	85	28	Soleva, Rússia	48	19	24
Karakaya	96,3	148	37,5	Tarbela	79,6	98,5	49
Kyliçkaya	12,1	97	12	Soleva, Rússia	70	19	32
Damle, Índia	43	50	19,5	Damle, Índia	21	19	19,5
Keban	32,6	143,2	23	Damle, Índia	3,6	25	10,4
Soleva, Rússia	10	30	9	Tucuruí	65,5	57,3	54,7
Colbun	110	105	42,9				

(fonte: adaptado de PINTO, 1996, p. 5-6)