

# **Curso sobre Utilização do Guia de Revisão Periódica de Segurança de Barragem e de Diretrizes para Elaboração de Projetos de Barragens**

Manual do Empreendedor sobre de Segurança de Barragens - Volumes III e V  
04 a 06 de abril de 2017 – Rio de Janeiro (RJ)

## ÓRGÃOS EXTRAVASORES E DE OPERAÇÃO

### CRITÉRIOS DE SEGURANÇA

Cheia de projeto - Capacidade

de vazão

Borda livre da estruturas

### VERTEDORES

Superfície livre

Canal de aproximação

Com comporta

Calha vertedora

Salto em Esqui

Fossa de erosão

Em degraus

Tulipa

Operação dos vertedores

Descarregador de fundo

### BACIAS DE DISSIPAÇÃO DE ENERGIA

Tipos

Operação de comportas

### TOMADA D'ÁGUA

Canal de adução

REMANSO DE RESERVATÓRIO

VIDA ÚTIL DE RESERVATÓRIO

## CRITÉRIOS DE SEGURANÇA

### Vazão de Projeto dos Órgãos Extravasores ou Cheia de Projeto da Barragem

Para barragens maiores que 30 m ou cujo colapso envolva risco de perdas de vidas humanas (existência de habitações permanentes a jusante), a vazão de projeto dos órgãos extravasores, ou cheia de projeto, será a cheia máxima provável.

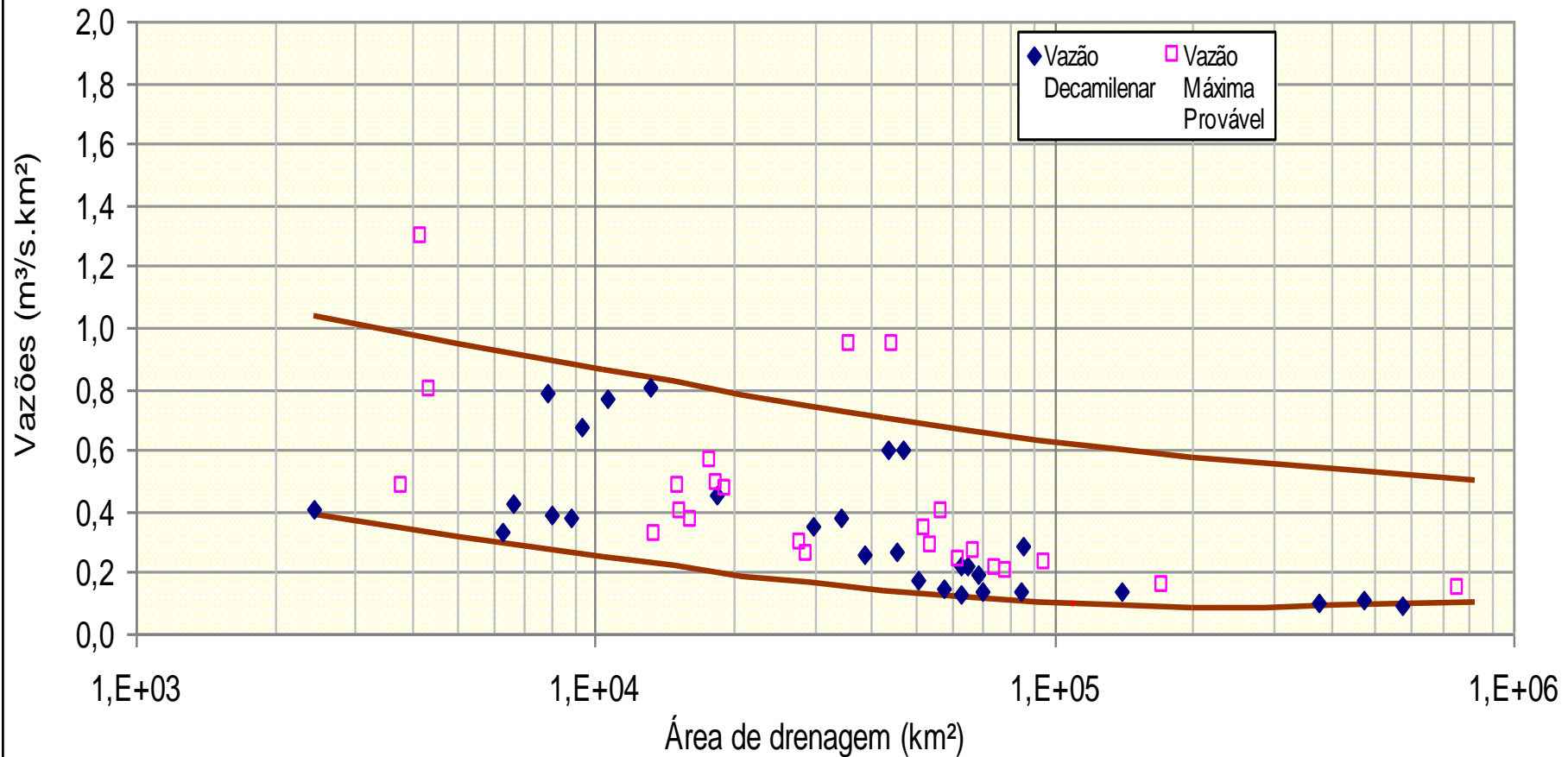
Para barragens de altura inferior a 30 m ou com reservatório com volume menor que 50.000.000 m<sup>3</sup> e, não havendo risco de perdas de vidas humanas (inexistência de habitações permanentes a jusante), a cheia de projeto será definida através de uma análise de risco, respeitada a recorrência mínima de 1000 anos.

A ANA recomenda a seguinte tabela:

Altura, h (m)	Volume, V (hm <sup>3</sup> )	Tempo de recorrência (anos)
$h \geq 30$	$V \geq 50$	CMP
$15 \leq h < 30$	$03 \leq V < 50$	1000
$h < 15$	$V < 03$	500

\*CMP: Cheia máxima provável

**FIGURA 2 - Vazão de Projeto Específica Decamilenar e Vazão Máxima Provável (VMP) em função da área de drenagem**



## CHEIA DE PROJETO

Cheia máxima provável utilizar metodologia constante do “Manual for Estimation of Probable Maximum Precipitation”

Métodos probabilísticos Recomendações:

“Guia para Cálculo de Cheia de Projeto de Vertedouro - MME - ELETROBRÁS - 1987”, que indica a utilização da distribuição de Gumbel para séries com assimetria inferior a 1,5 e Exponencial com 2 Parâmetros para assimetrias superiores.

## O Exemplo de Salto Caxias

Exemplo significativo desta questão é o ocorrido com as barragens do Rio Iguaçu.

- O estudo de inventário realizado pela CANAMBRA no final dos anos 60 baseou o cálculo das vazões decamilenares das obras previstas na série histórica 1930-1965 e definiu a cheia do Projeto Salto Caxias em 25.100 m<sup>3</sup>/s.
- No final da década de 70 a COPEL revisou estes estudos e definiu a vazão natural (sem os reservatórios de montante) de 10.000 anos em 28.100 m<sup>3</sup>/s.
- Este valor foi revisto novamente em 1984 com nova série incluindo dados da cheia de 1983, e o valor encontrado foi 41.200 m<sup>3</sup>/s.
- A cheia de projeto final do vertedouro, definida em 1992, com a influência da propagação nos reservatórios de montante foi de 49.600 m<sup>3</sup>/s.

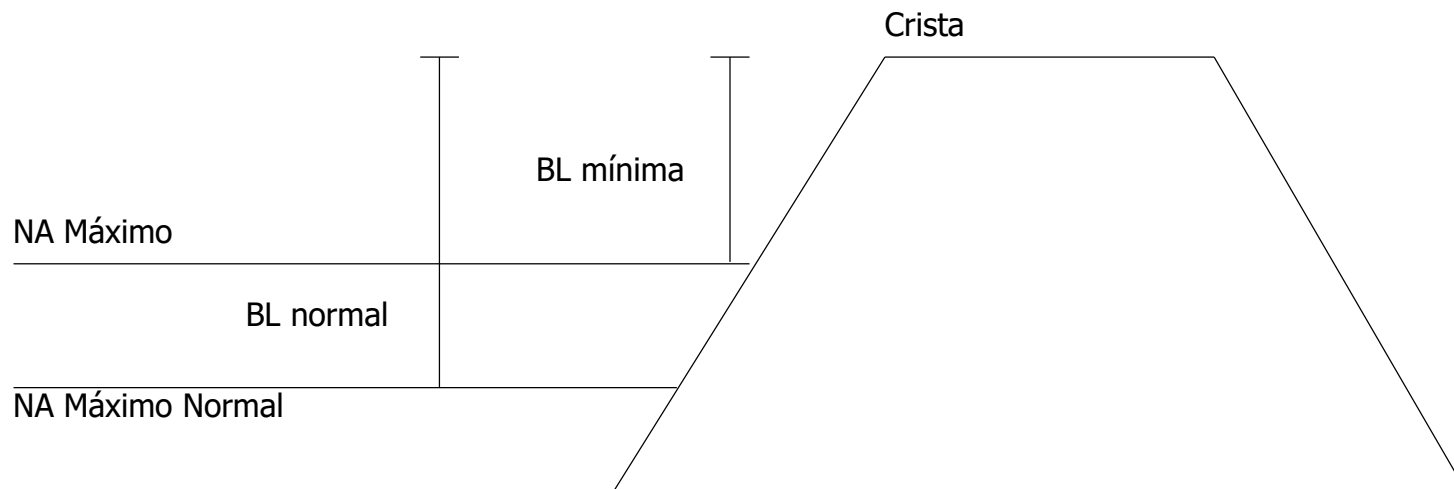
O vertedouro efetivamente construído tem portanto uma capacidade 97,6% maior do que a que teria o vertedouro se este fosse construído no começo dos anos 70 com a vazão de projeto definida naquela ocasião.

## Borda Livre – Critérios:

BL mínima  $\geq$  0,5m Barragem de Concreto

BL mínima  $\geq$  1,0m Barragem de Terra / Enrocamento

BL normal  $\geq$  3,0m (velocidade do vento 100Km/h, onda com 2% de prob.)



## UHE TELES PIRES BARRAGEM BORDA LIVRE

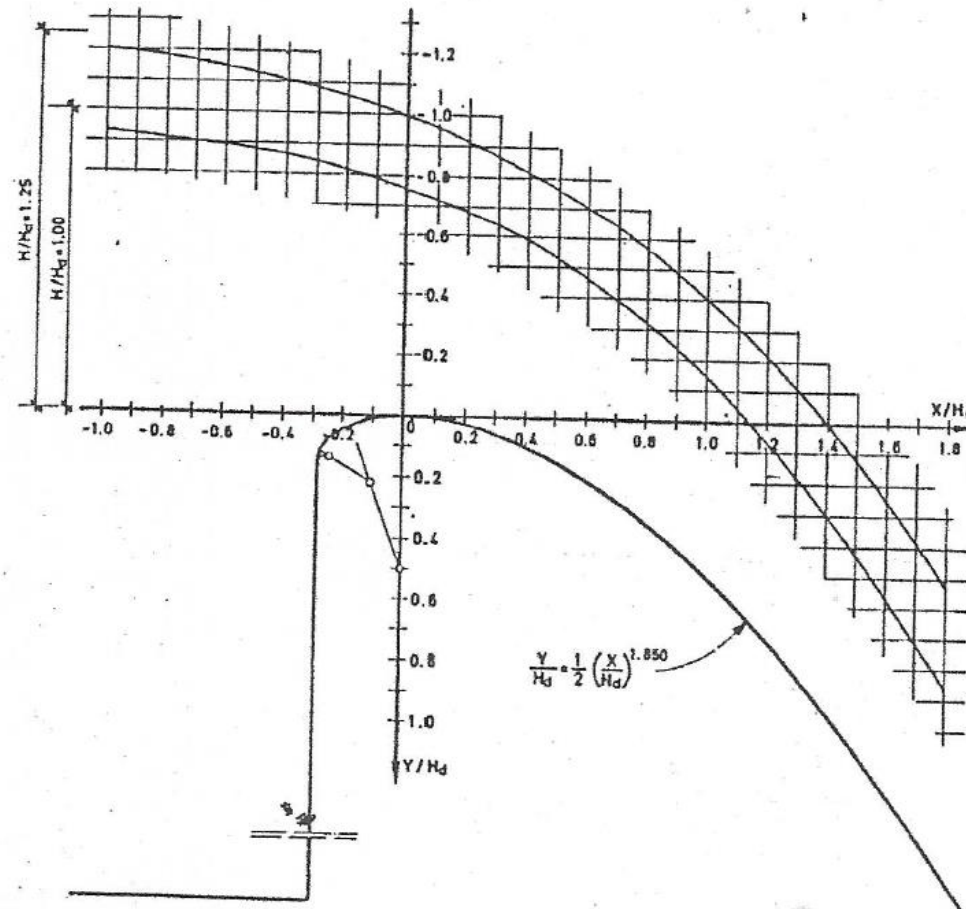


RESERVATÓRIO  
N<sub>Amax</sub> = 220,27



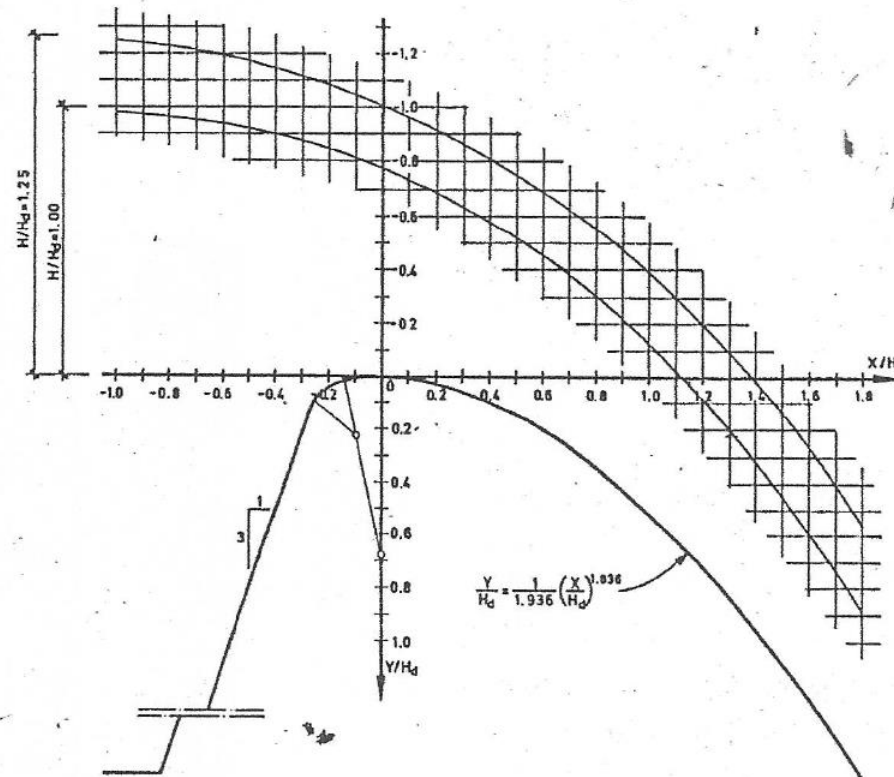
## SOLEIRA DE SUPERFÍCIE LIVRE

### 6.4.2 — Perfis da superfície livre



## SOLEIRA DE SUPERFÍCIE LIVRE

### 7.4.2 — Perfis da superfície livre



Para reservatórios com área de inundação relativamente pequena em que o parâmetro

$$R = \frac{3600Q}{A}$$

onde:

- R = velocidade de subida do nível do reservatório, em m/h;  
Q = pico da cheia de projeto, em m<sup>3</sup>/s;  
A = Área do reservatório, em m<sup>2</sup>;

resultar maior do que 2 m/h, será adotado vertedouro de crista livre sem comportas ou justificado um sistema de comportas automáticas face às condições de segurança específicas, ou ampliada a borda livre normal da barragem, considerando o tempo disponível limitado para as decisões de operação e/ou correção de pane eventuais.

A velocidade do escoamento no canal de aproximação não deverá exceder 6,5 m/s.

## VERTEDOURO EM DEGRAU - PCH LINHA EMÍLIA



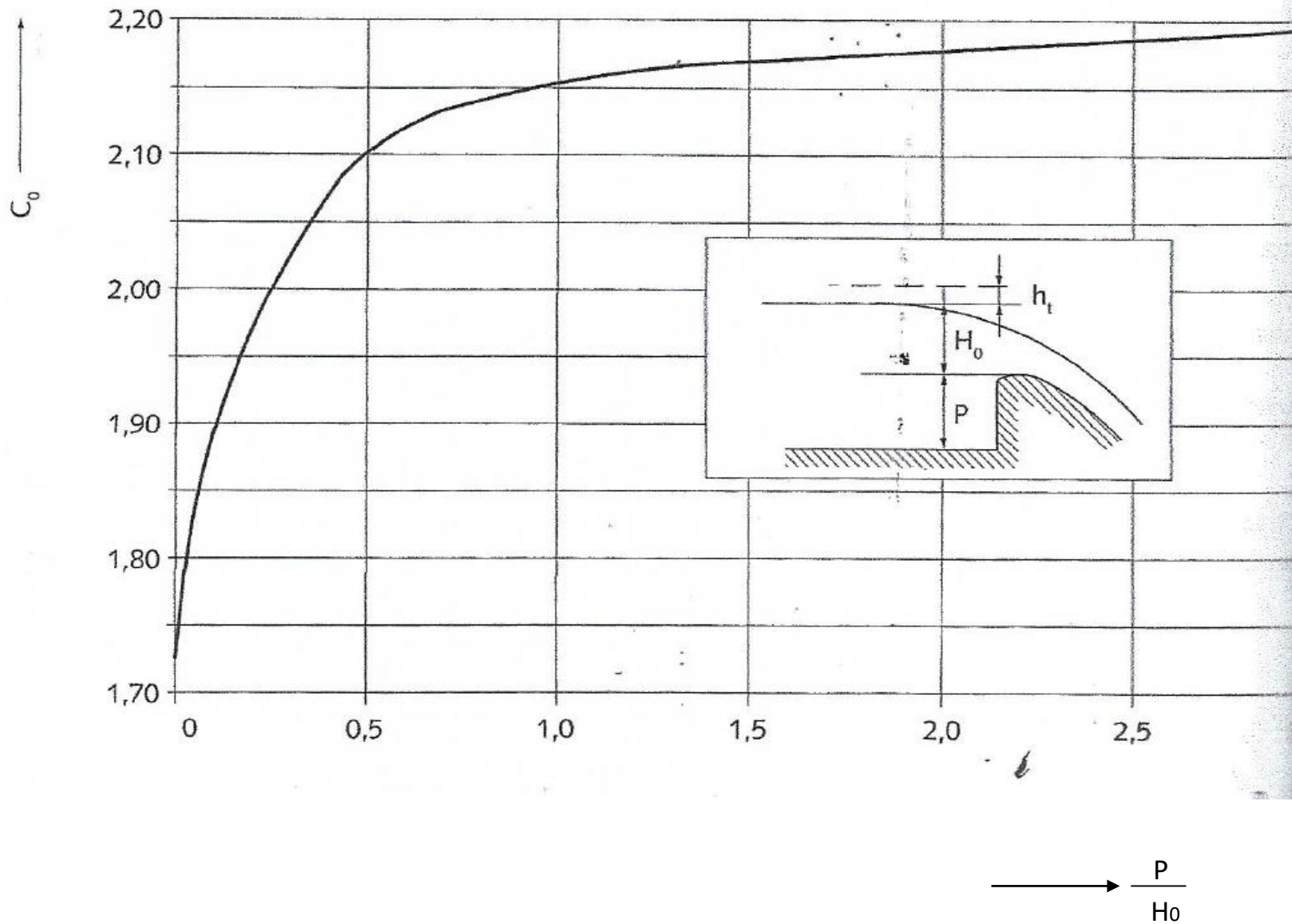
PCH EMILIA - VERTEDOR DE DESCIDA EM DERGRAU

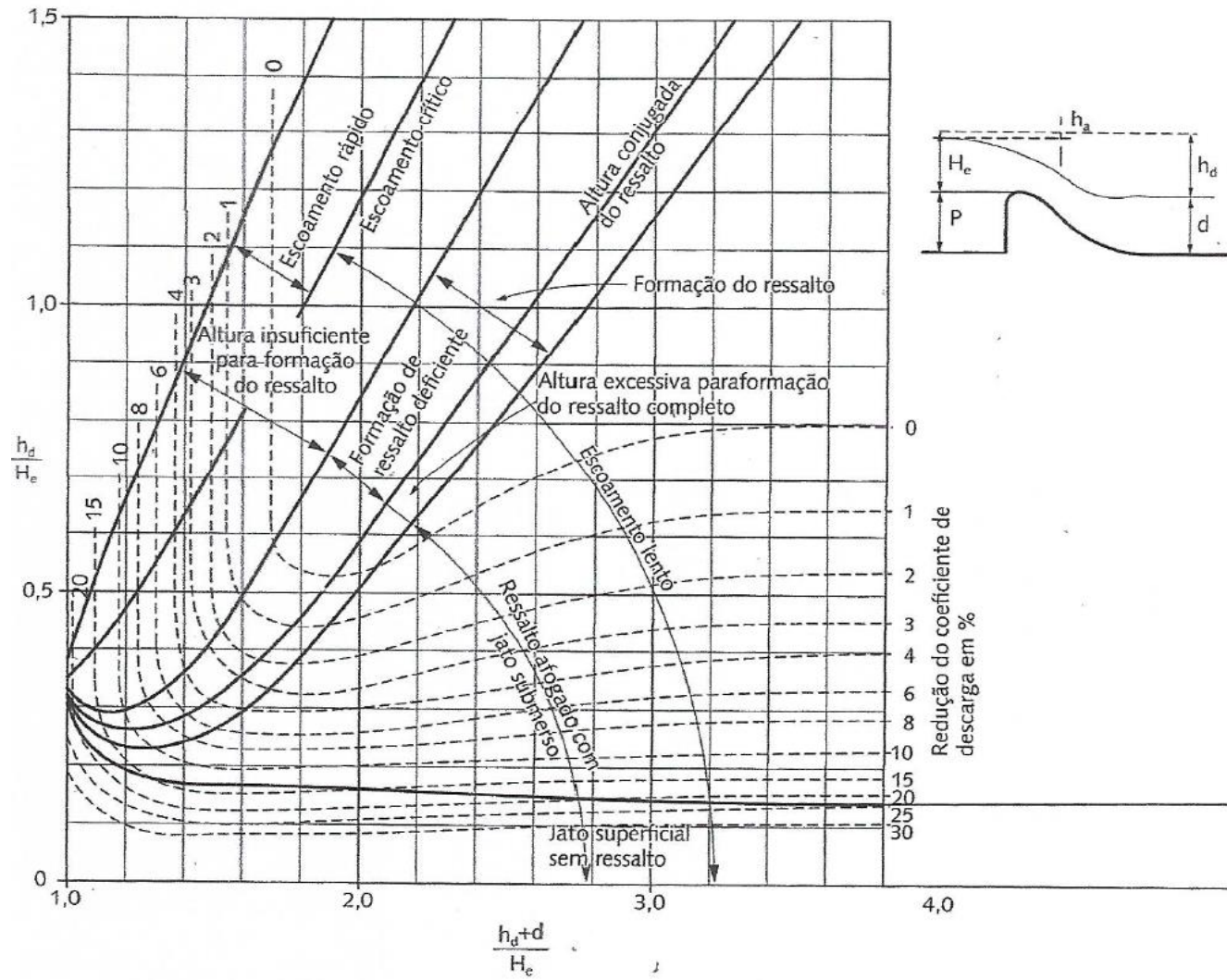


## VERTEDORES EM DEGRAU

Deve-se verificar:

- 1 – Energia residual no pé do vertedouro
- 2 – Posição de início da aeração do escoamento
- 3 – Pressões junto aos degraus







✓ Carga de projeto

O perfil da soleira vertente será definido pela forma do jato livre em vertedouro de parede delgada conforme critérios do BUREAU OF RECLAMATION ref. (2) e do HDC ref. (3).

✓ Capacidade de Descarga

A capacidade de descarga da soleira operando como vertedouro livre será calculada pela fórmula:

$$Q = C.L.H^{3/2}$$

onde:

- C = coeficiente de descarga, em  $m^{1/2}/s$ ;
- L = largura efetiva do vertedouro, em m;
- H = carga sobre a crista, em m.

A largura efetiva do vertedouro será definida pela fórmula

$$L = L' - 2 ( K_a + n.K_p ) H$$

onde:

L = largura efetiva, em m;

L' = largura geométrica útil, em m;

K<sub>a</sub> = coeficiente de contração das ombreiras;

K<sub>p</sub> = coeficiente de contração dos pilares;

n = número de pilares;

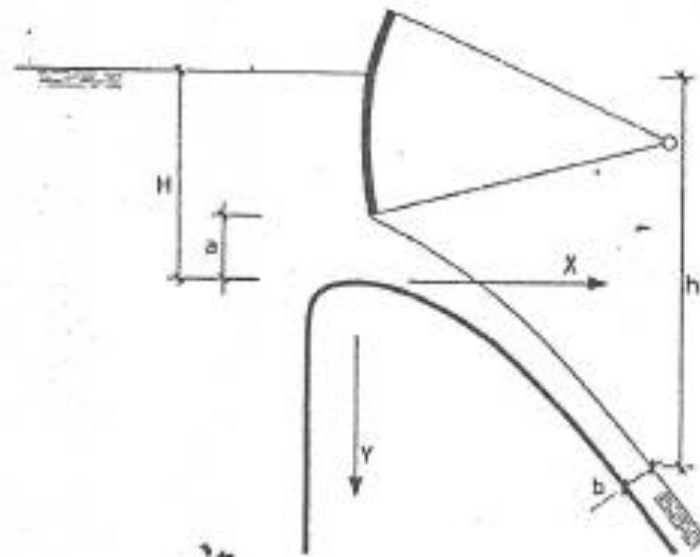
H = carga sobre a crista da ogiva, em m.

### 6.5.2 — Perfis da superfície livre

A partir dos elementos apresentados em 6.5.1 e para cada abertura  $a$  obtém-se  $q$ .  
Por iteração obtém-se

$$V = k \sqrt{2gh} \quad (k \approx 0,85 \text{ a } 0,95) \quad e$$

$$b = q/V$$



## VERTEDOR TIPO TULIPA



**Entrada em operação:** 1960

**Localização:** Rio Pardo - Rod. Mococa/São José do Rio Pardo, km 5 - São José do Rio Pardo (SP)

**Reservatório:** área de 1 km<sup>2</sup> e volume de 18,45 x 106 m<sup>3</sup>

**Barragem:** tipo Terra, comprimento: 312 m

**Turbina:** tipo Francis de eixo vertical, queda bruta de 92 m

**Gerador:** tipo Umbrella de eixo vertical e potência total de 4 x 27,2 = 108,8 MW

**Vertedouro:** tipo Comporta de superfície e descarga total de 2 x 1.027 = 2.054 m<sup>3</sup>/s, tipo Tulipa e descarga total de 990 m<sup>3</sup>/s

**Número de Turbinas:** 4

**Número de Circuitos:** 8

**Tensão Nominal:** 138 kV

**Cota Máxima Útil:** 665,00 m

**Cota Mínima Útil:** 659,50 m

**Volume Útil de Água Acumulado:** 4.680 x m<sup>3</sup>

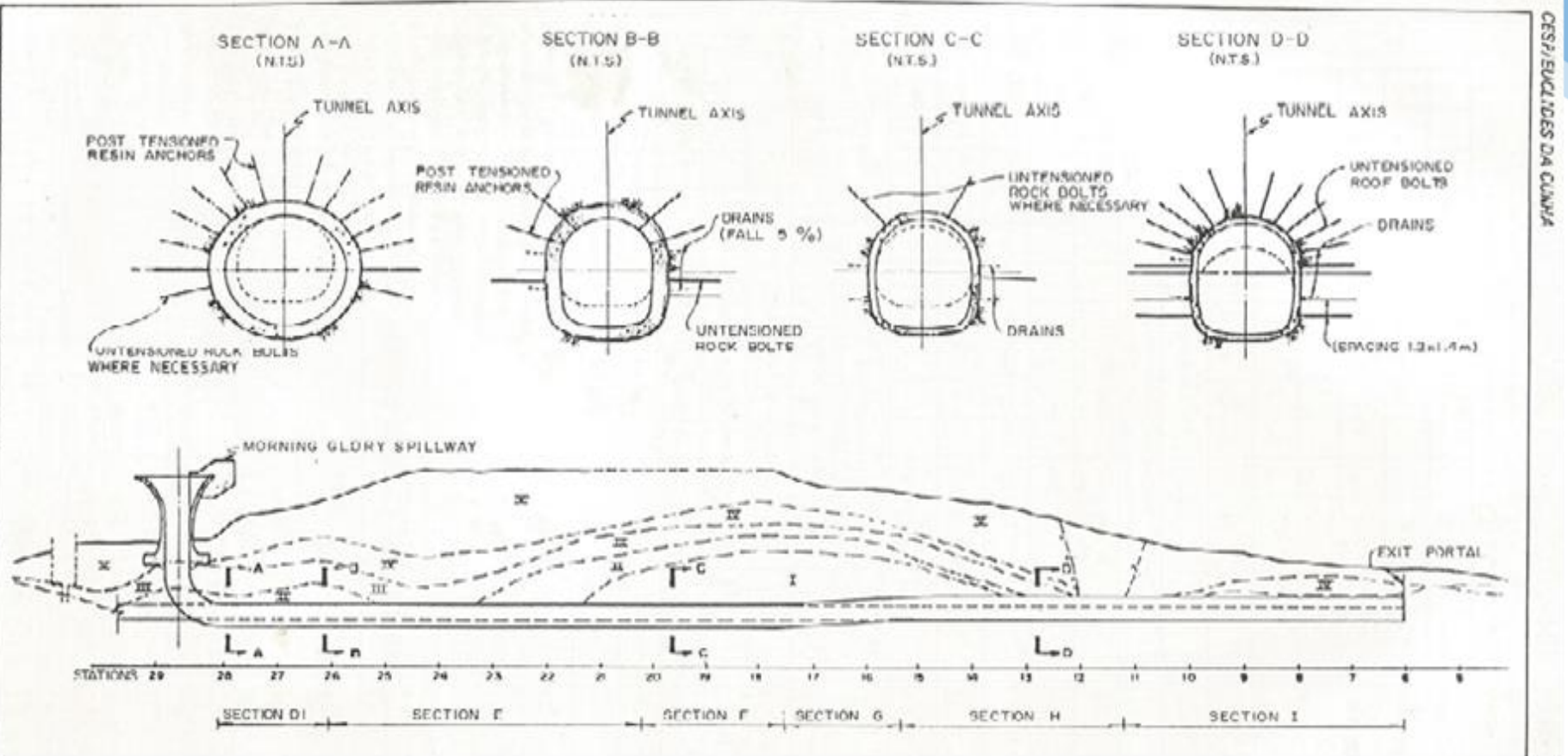
**Não tem eclusa**

## VERTEDOR TIPO TULIPA UHE EUCLIDES DA CUNHA



## VERTEDOR TIPO TULIPA

Figure 11 - Morning glory spillway and Discharge tunnel



CER/ENCLIC/DES DA CUNHA

## CANAL DE APROXIMAÇÃO Comentários.



## VERTEDORES COM COMPORTAS





## COMPORTAS DO VERTEDOR UHE TRÊS MARIA



Batente a jusante  
da crista soleira

## BATENTE E SOLEIRA VERTENTE



A pressão mínima no batente não deverá ser inferior a -2,5m.

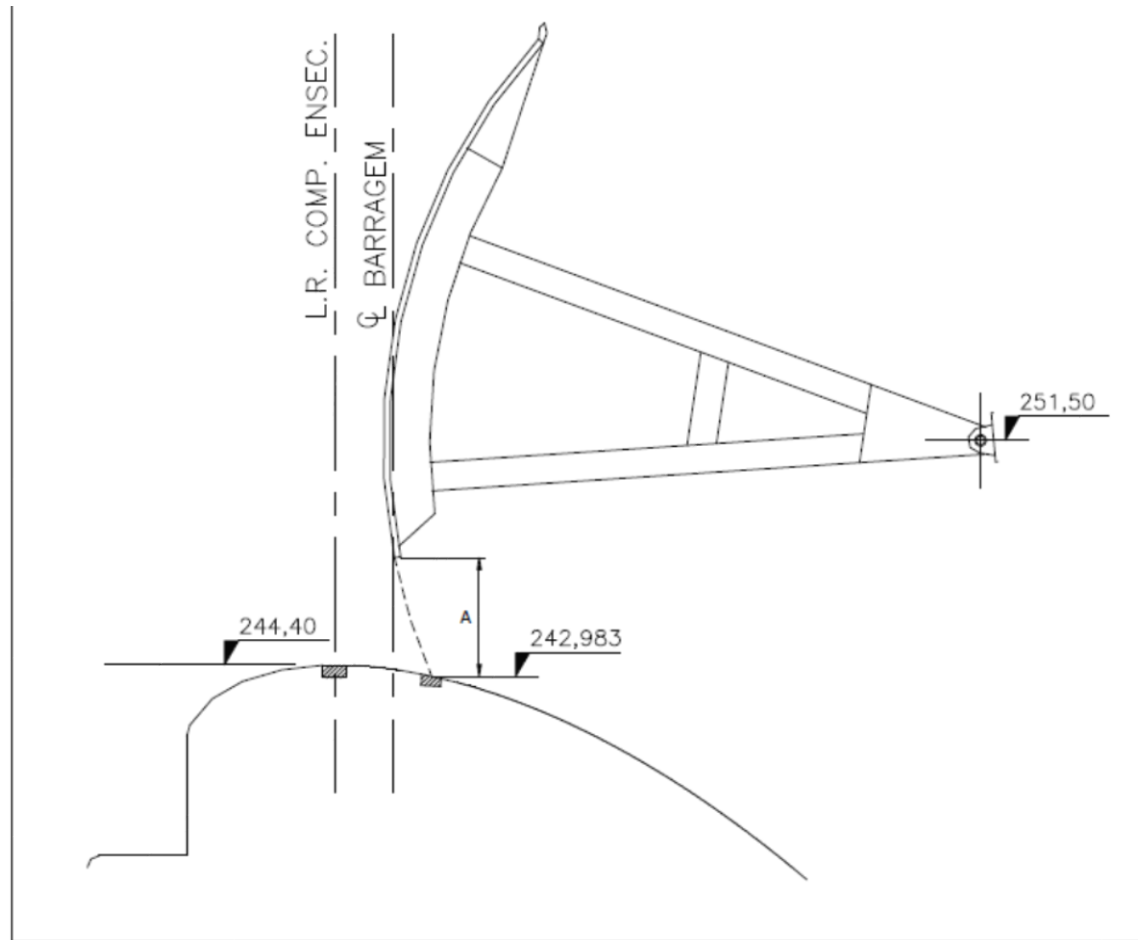
$$Q = C_q \cdot S \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot H}$$

Eq. 02

Sendo:

- $C_q$ : coeficiente de vazão;
- $S$ : área da abertura ( $m^2$ );

Para aberturas parciais, a carga  $H$  foi definida como sendo a distância entre o nível d'água de montante à metade da abertura  $A$ , indicada na Figura 2.1.



**Figura 2.1 – Abertura da comporta do vertedouro.**

### UHE FOZ DO CHAPECÓ - CURVA DE DESCARGA DO VERTEDOURO

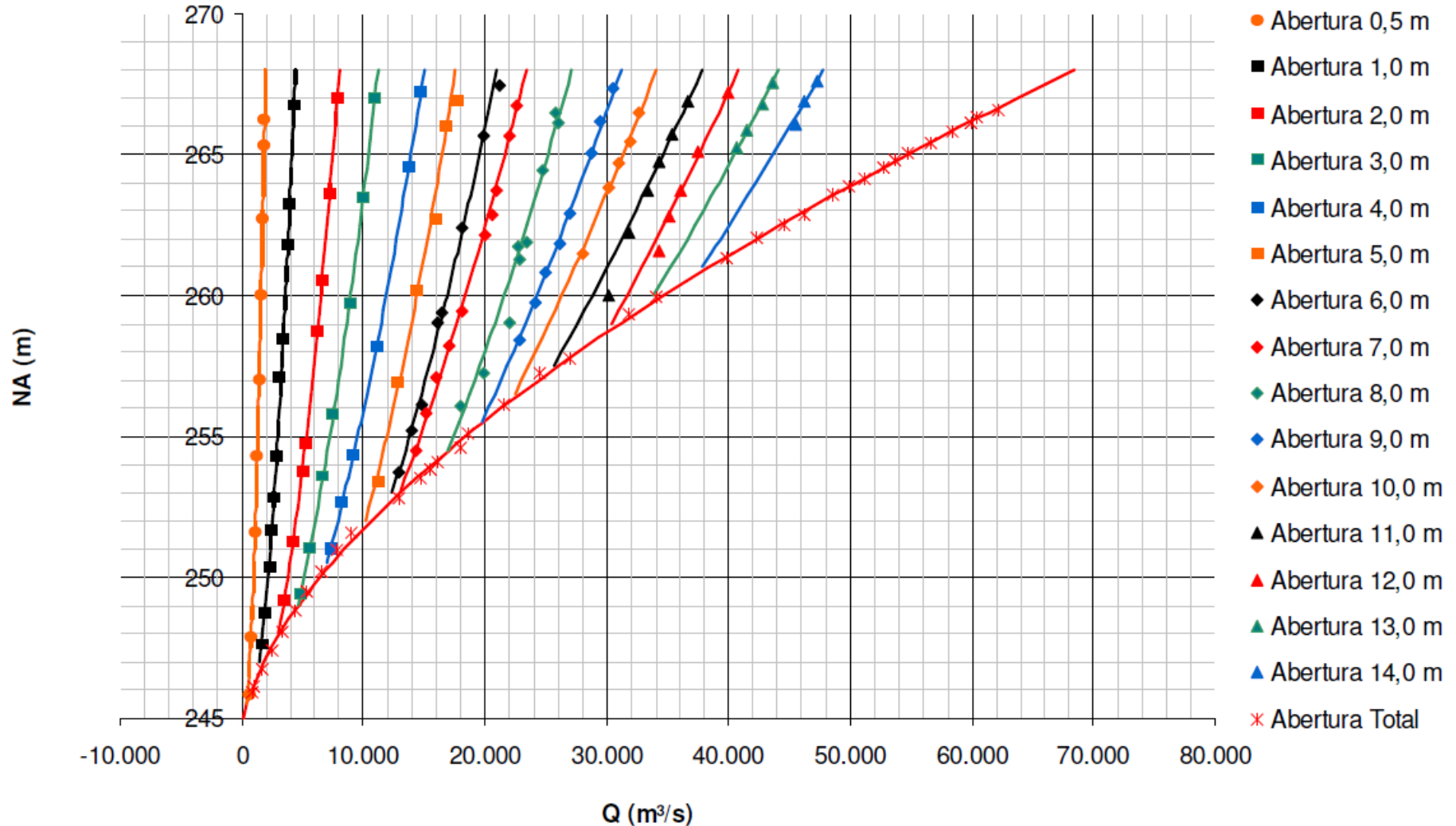


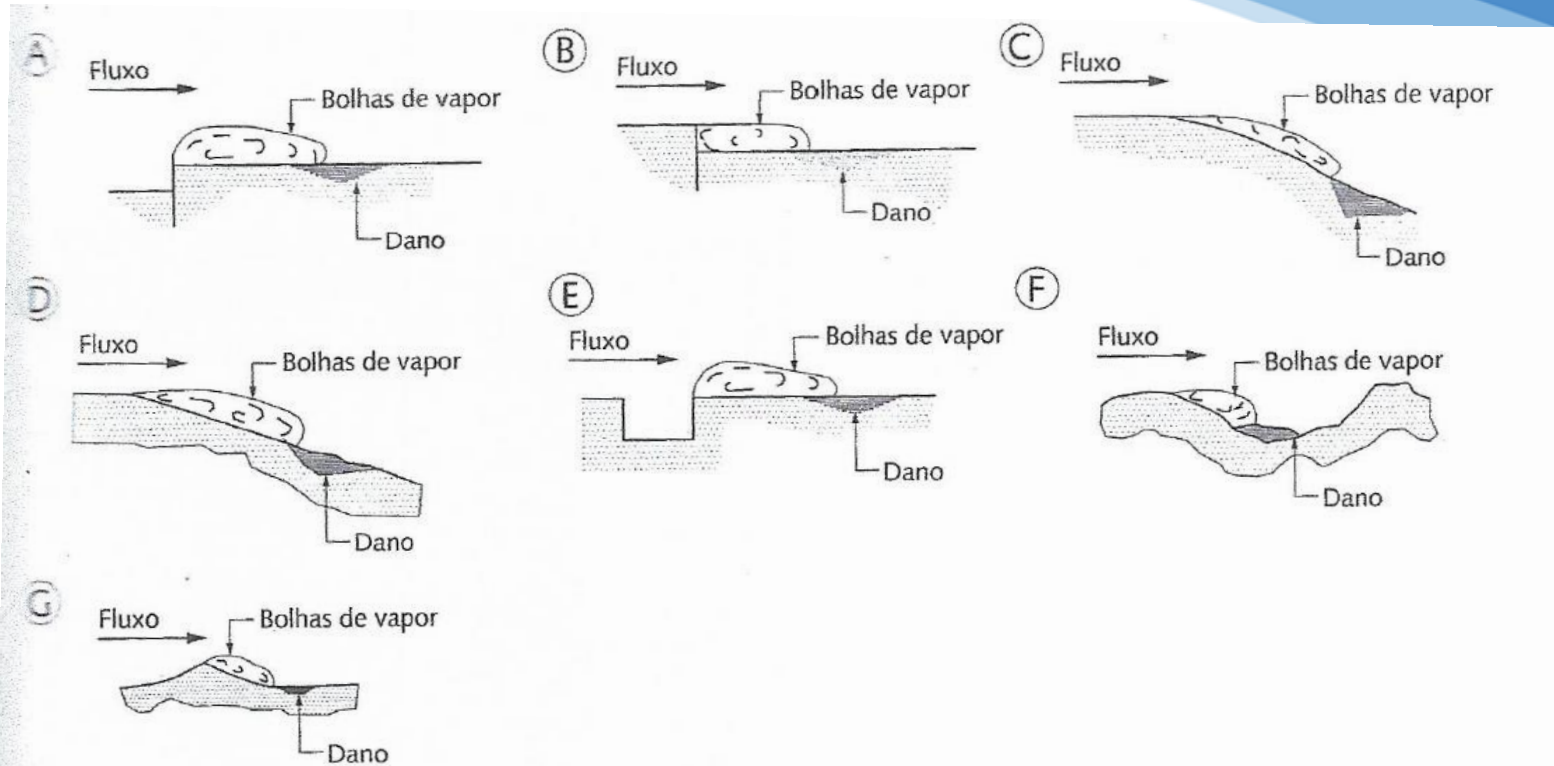
Figura 3.1 – Curva de descarga do vertedouro.

## CAVITAÇÃO EM CALHAS VERTEDOURAS

### 5.2 — Forma de evitar a cavitação

A cavitação é um fenômeno dinâmico, que pode surgir em escoamentos com altas velocidades, e que consiste na formação e subsequente colapso de cavidades ou bolhas cheias de vapor. Em geral estas bolhas formam-se em zonas onde, por qualquer circunstância, a pressão local desce até à tensão do vapor e o colapso inicia-se mais a jusante quando as bolhas são transportadas pelo escoamento para uma região onde a pressão local é superior à tensão do vapor. O colapso é muito rápido e origina ondas de choque de alta pressão, as quais, por efeito mecânico, provocam a destruição local das superfícies.

Sendo o betão um material com baixa resistência à cavitação, para a evitar, haverá que limitar as pressões negativas e dar aos paramentos onde elas se instalam um acabamento cuidado, de modo que as superfícies resultem lisas. Como ordem de grandeza, as depressões locais médias não deverão exceder  $-6$  m (coluna de água) [4]. Portanto deverá ser fixada a carga de dimensionamento, o grau de depressão ( $H/H_d$ ) e a posição da comporta de modo a não haver depressões superiores à indicada.



**Fig. 7.46** Tipos de irregularidade dos contornos sólidos e localização das prováveis áreas atingidas pela ação da cavitação. (A) (Ressalto abrupto; (B) rebaixo abrupto; (C) curva divergente; (D) declividade abrupta divergente; (E) recesso transversal; (F) superfície rugosa; (G) junta protuberante)

Fonte: Ball (1963).

## VERTEDOIRO DE ITAIPU

### DADOS DO VERTEDOIRO

- Capacidade  $Q = 62.200\text{m}^3/\text{s}$ ; - Soleira EL 200,00; - 3 Calhas
- Defletor EL 140,00 (de uma das calhas);  $\_NA$  maxnomal = El 220,40
- $V = 36,00\text{m/s}$  (velocidade Max).
- São várias lajes. Espessura 0,40m, agregado de 19mm.
- Resistência do concreto variável de acordo com o trecho de cada laje. Valores de 28 a 35 MPA.

OBS IMPORTANTE; O vertedouro desde o início de sua operação não colocou em funcionamento o sistema de aeração. Para tal necessita retirar o revestimento de proteção para a entrada de ar proveniente dos aeradores laterais.

- Até o momento as erosões ocorridas tem sido de natureza abrasiva.

## AERAÇÃO

A necessidade de dispositivos de aeração para evitar a cavitação é baseada no índice de cavitação incipiente. O índice de cavitação natural deverá ser inferior ao índice de cavitação incipiente.

Exemplos de aerador a seguir UHE Irapé.



## UHE IRAPÉ



**Homenagem ao Eng. Sergio Brito**



## UHE IRAPÉ – Túnel de descarga



## UHE IRAPÉ – Túnel de descarga - Aerador



## UHE IRAPÉ – Túnel de descarga - Aerador



## UHE IRAPÉ – Túnel de descarga - Aerador



## UHE IRAPÉ – Túnel de descarga - Aerador



## CALHAS DO VERTEDOURO DA UHE SÃO SIMÃO





# SALTO DE ESQUI

CONCEITO

DANOS OCORRIDOS

## UHE TELES PIRES



VERTEDOIRO  
ÂNGULO DE  
LANÇAMENTO 15°

## UHE TELES PIRES



VERTEDOIRO  
ÂNGULO DE  
LANÇAMENTO 25°

## UHE TRÊS MARIAS

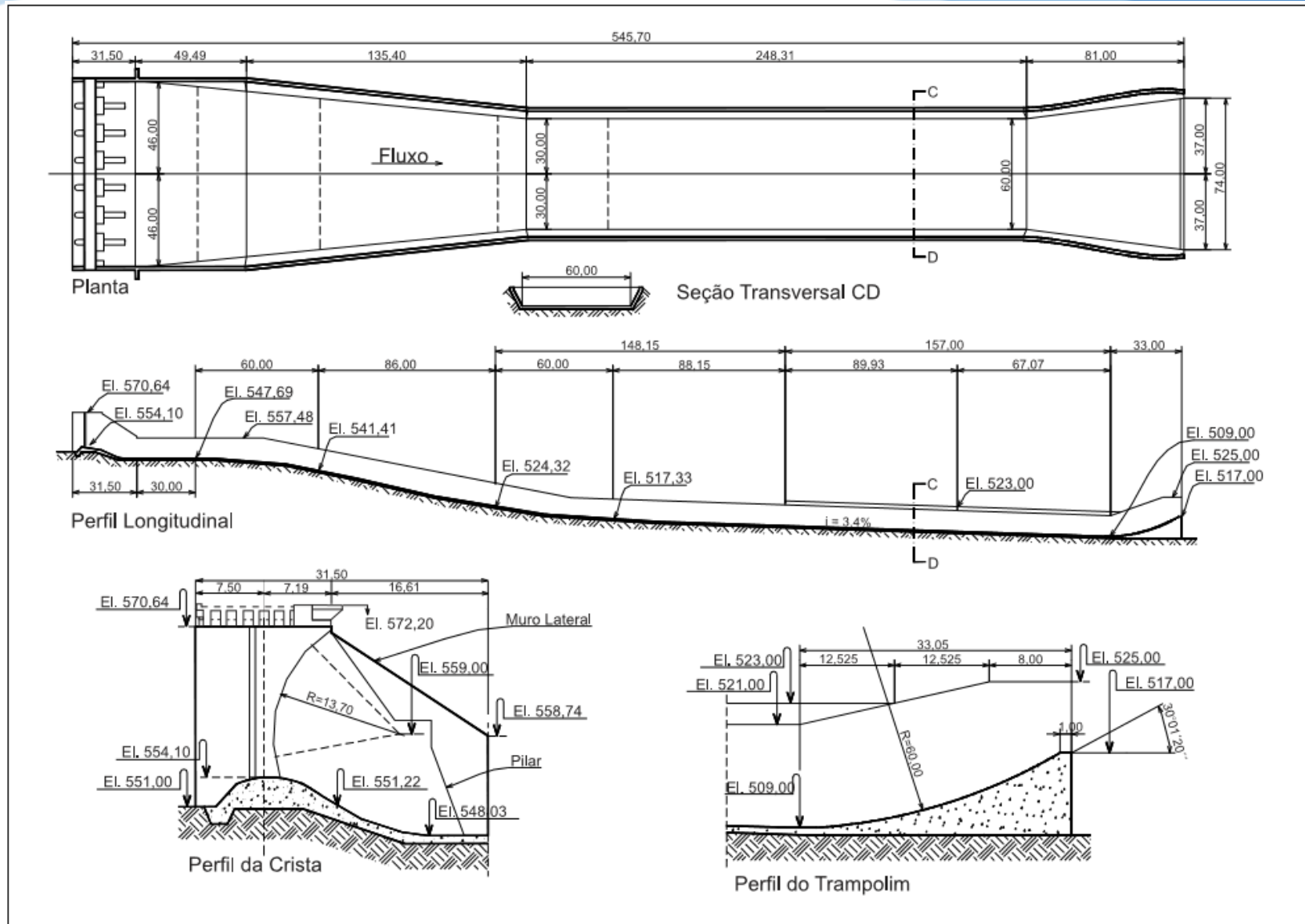
BACIA RIO SÃO  
FRANCISCO

$Q_a = 23.400 \text{ m}^3/\text{s}$

$Q_v = 8.700 \text{ m}^3/\text{s}$

$Q_{\text{max}} = 5.087 \text{ m}^3/\text{s}$











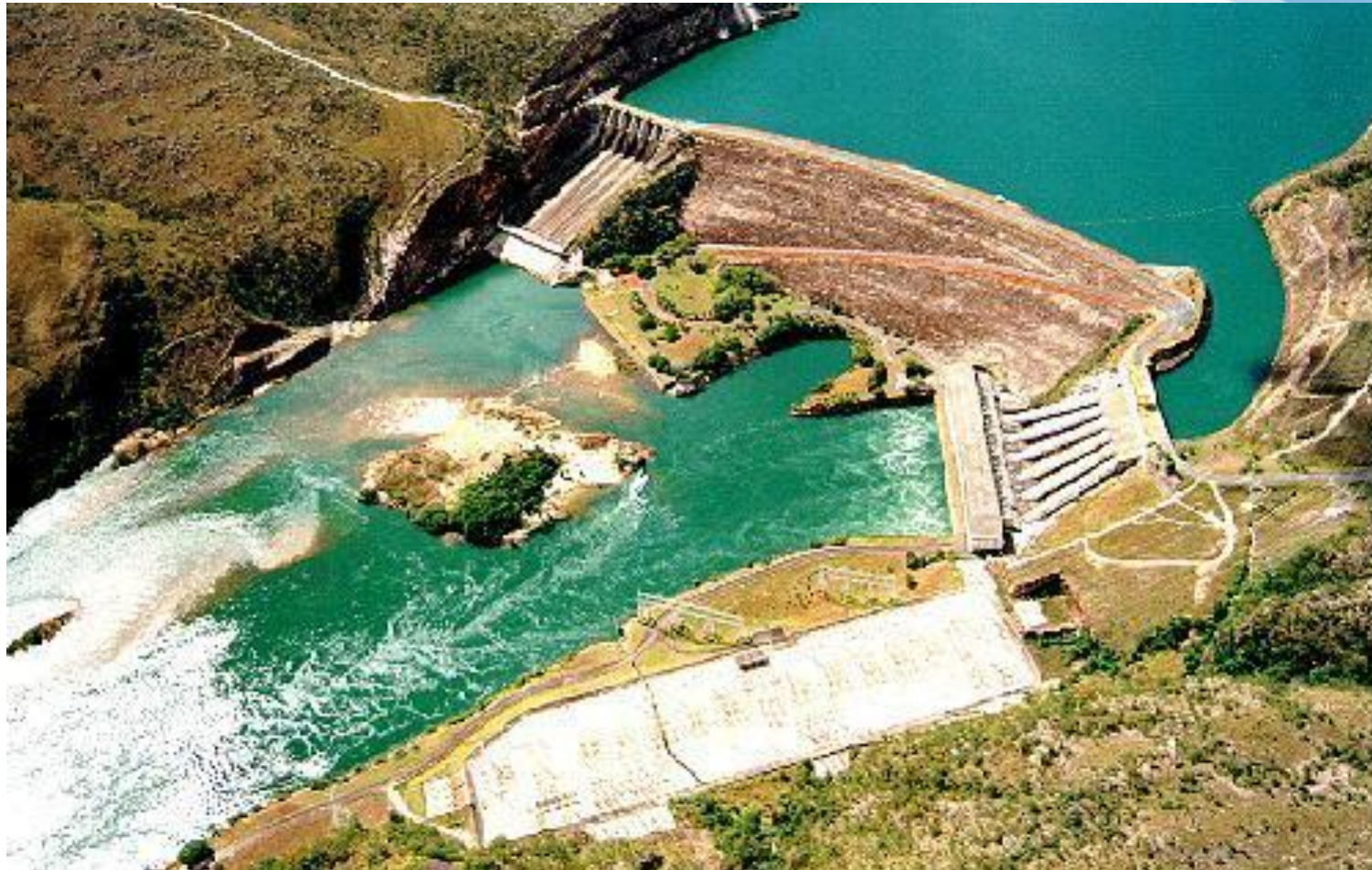








## UHE Estreito



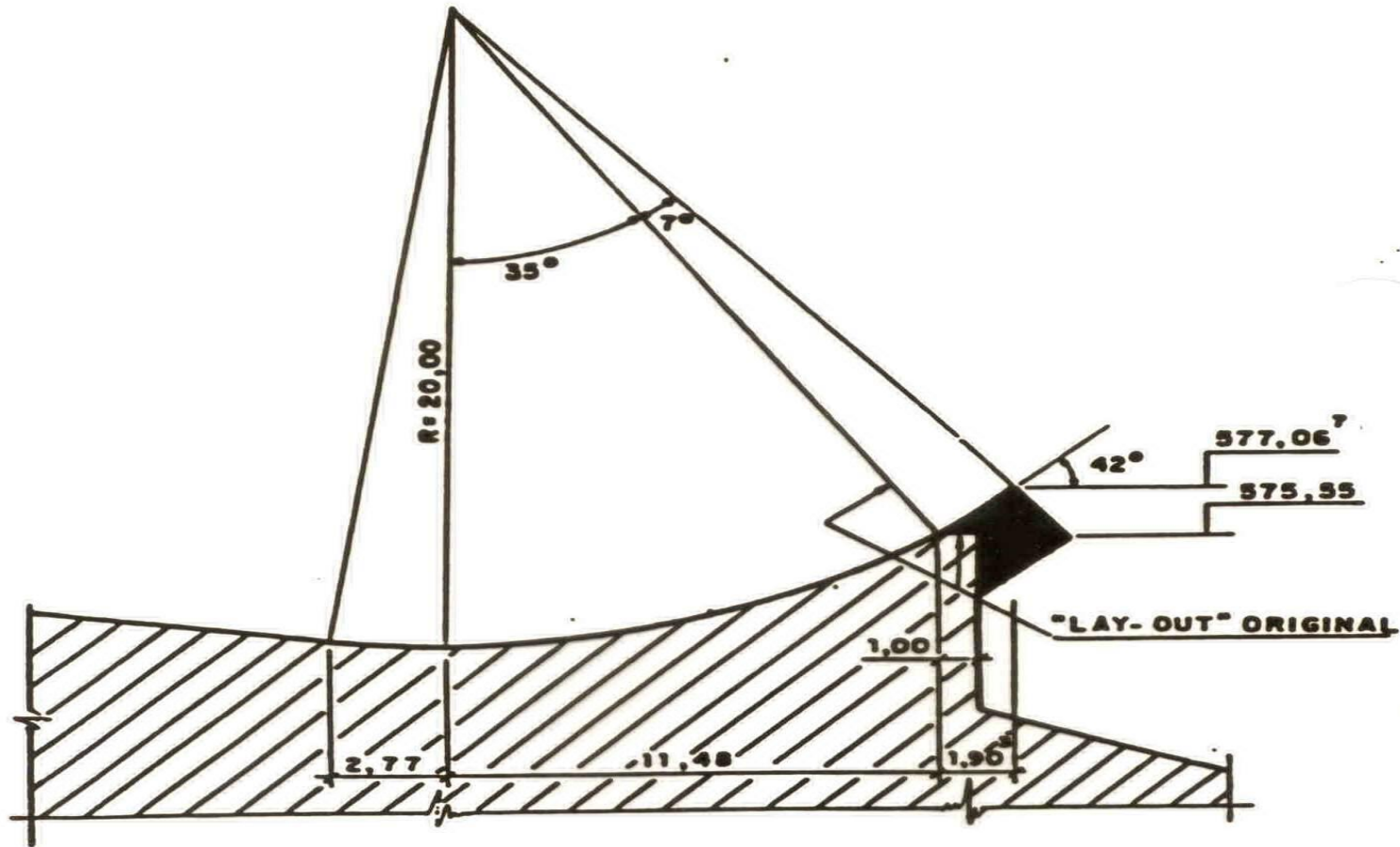
## UHE Estreito



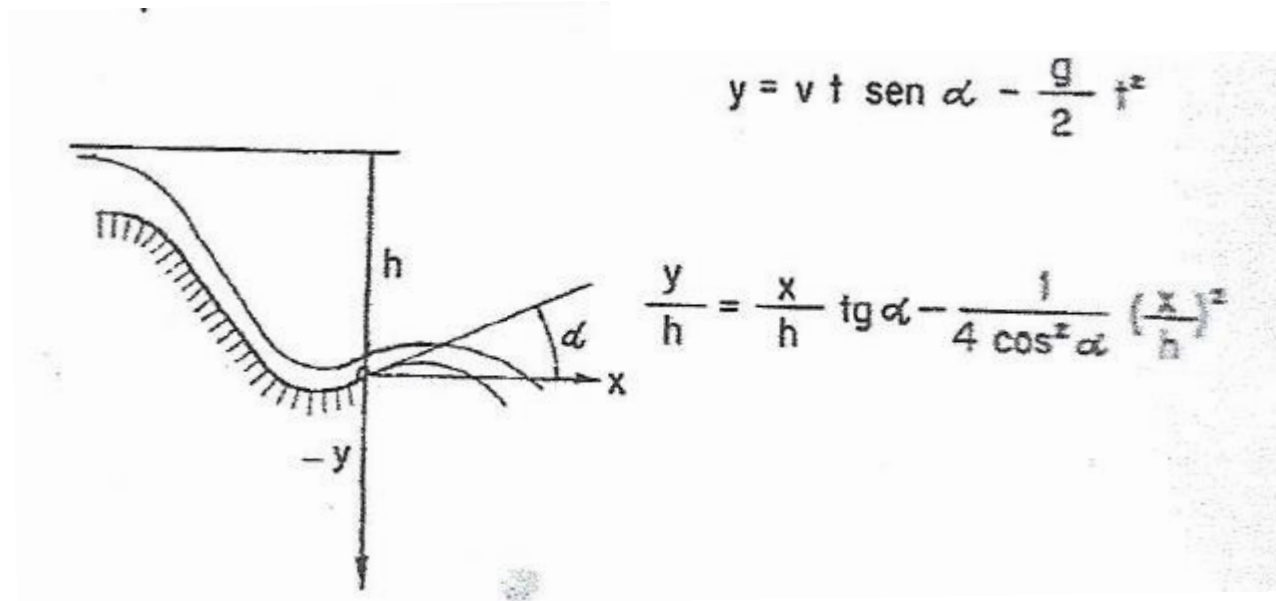
BACIA DO RIO GRANDE

$Q_v = 13.000 \text{ m}^3/\text{s}$

## UHE Estreito



## ALCANCE DO JATO



## BACIA DE LANÇAMENTO

√ Bacia de lançamento

O interesse de se efetuar uma pré-escavação da bacia de lançamento e a extensão desta pré-escavação serão avaliados com base na previsão da magnitude da fossa de erosão natural e das conseqüências dessa erosão.

As dimensões da fossa de erosão dependem das características hidráulicas do jato efluente do salto de esqui e da natureza da rocha na região da bacia de lançamento, cuja avaliação inicial é difícil e aproximada.

Estudos em modelo reduzido com fundo móvel com material solto ou com material coesivo são úteis para orientar a dimensão da erosão.

Uma avaliação inicial da profundidade da fossa de erosão poderá ser efetuada com base na fórmula de Veronese:

$$h_e = K \cdot q^{0,54} H^{0,225}$$

onde:

$h_e$  = profundidade da erosão medida a partir do nível de água na bacia de lançamento, em m;

$q$  = vazão específica máxima, em m<sup>3</sup>/s/m;

$H$  = desnível total entre o nível de água no reservatório e o nível de água na bacia de lançamento, em m;

$K$  = coeficiente de Veronese, a ser definido:

1,9, valor para areia solta, que pode ser considerado como um valor limite;

1,4 a 1,5, valor médio que reflete dados observados em diversas obras;

0,7, valor aplicável à fundação em basaltos de excelente qualidade.



## UHE TELES PIRES – VERTEDOR E FOSSA DE EROSÃO



## DESCARREGADOR DE FUNDO

# Comentários.

# BACIA DE DISSIPACÃO DE ENERGIA

CRITÉRIOS

CUIDADOS OPERACIONAIS

OPERAÇÃO ASSIMÉTRICA DE COMPORTAS. EXEMPLOS:

# BACIA DE DISSIPACÃO DE ENERGIA

O ressalto hidráulico é um movimento rapidamente variado, é a passagem brusca do escoamento super crítico para subcrítico.

O dimensionamento preliminar da bacia de dissipação deverá seguir a experiência do Bureau of Reclamation ref. (2) ou ref. (6) e será verificado em modelo hidráulico reduzido.

A profundidade da bacia será prevista para a vazão de projeto, enquanto o seu comprimento poderá ser otimizado para uma enchente de período de recorrência de 100 a 200 anos, admitindo-se a expulsão do ressalto para enchentes mais raras; os danos serão justificados por uma análise econômica.

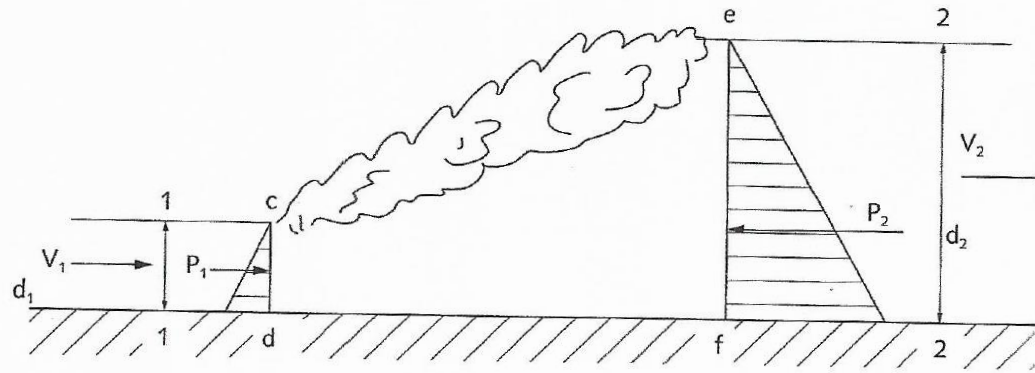


Fig. 7-37 Diagrama esquemático do ressalto hidráulico  
Fonte: Elevatorski (1959).

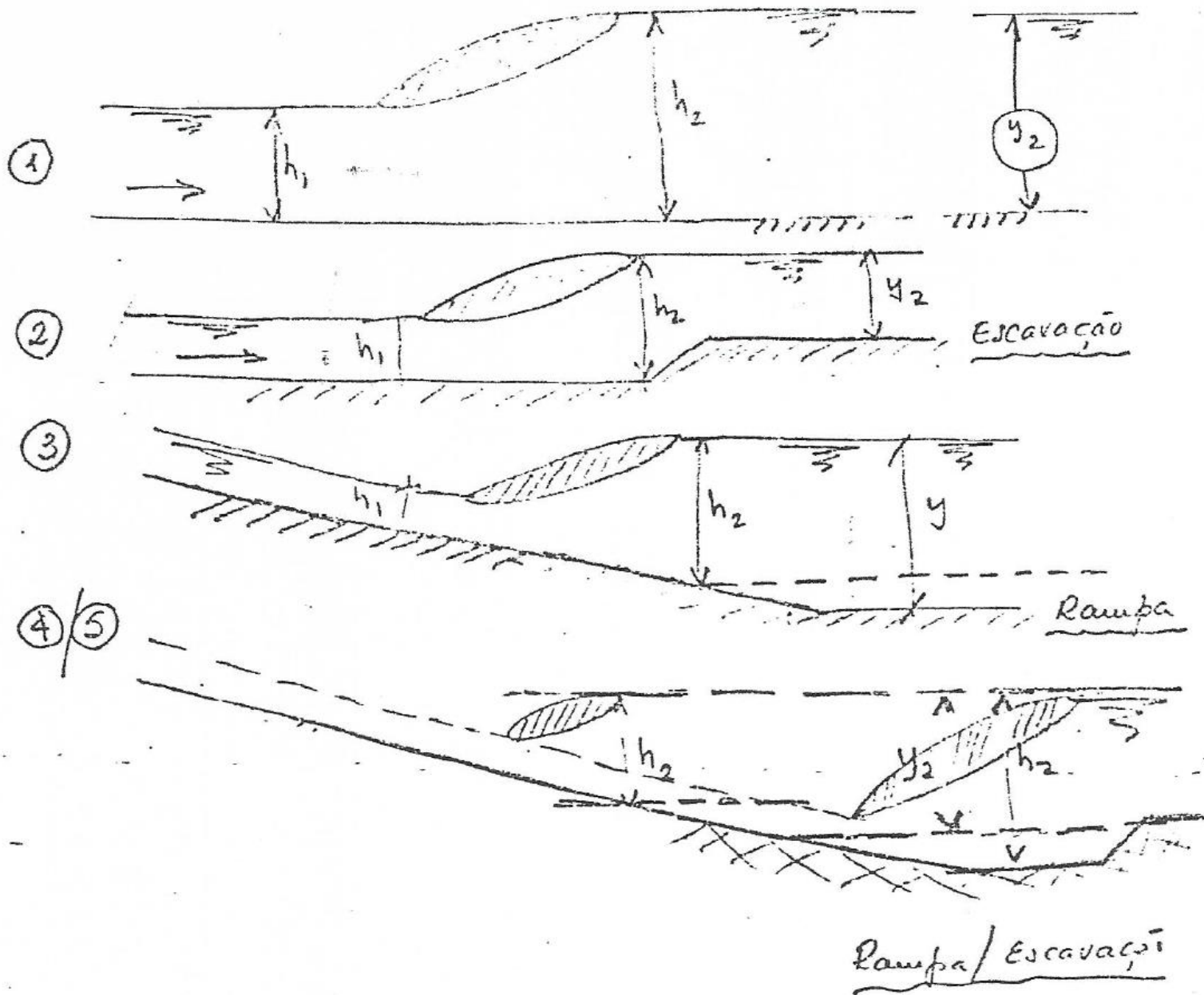
Como relatado por Elevatorski (1959), diversos pesquisadores trabalharam no assunto até chegarem à clássica equação adimensional, apresentada no gráfico da Fig. 7.38:

$$\frac{d_2}{d_1} = \frac{1}{2} \left( \sqrt{8F^2 + 1} - 1 \right) \quad (7.7)$$

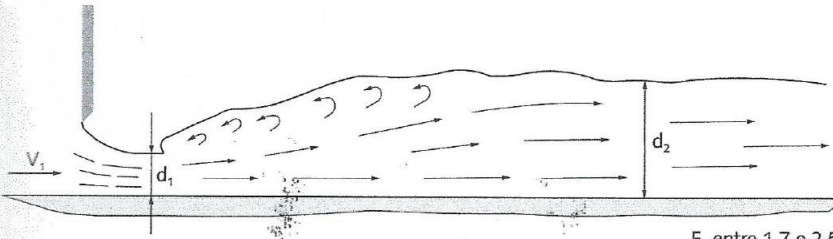
$$F_1 = \frac{V_1}{\sqrt{g \cdot d_1}}$$

O comprimento da bacia ( $L_1$ ) é função da altura do ressalto. Quando o leito rochoso é fraturado, Elevatorski (1959) recomenda:

$$L_1 \cong 7 (d_2 - d_1) \quad (7.9)$$

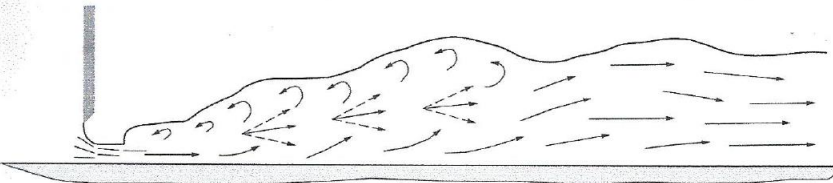


/ vertedouros |



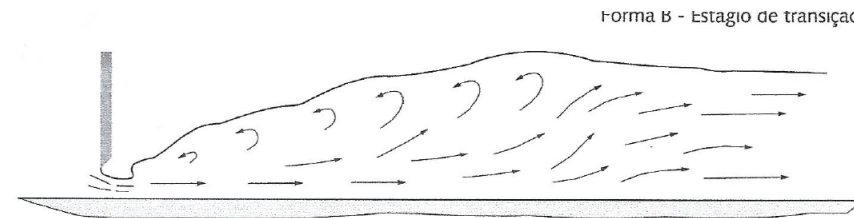
$F_1$  entre 1,7 e 2,5  
Forma A - Estágio de pré-ressalto

RESSALTO FRACO



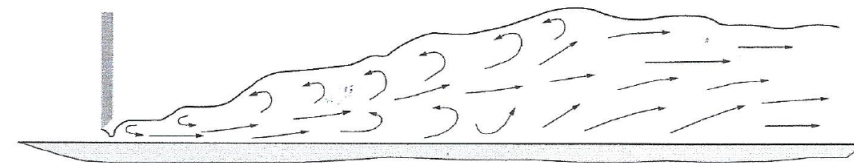
$F_1$  entre 2,5 e 4,5  
Forma B - Estágio de transição

RESSALTO OSCILANTE



$F_1$  entre 4,5 e 9,0  
Forma C - Intervalo de jatos bem balanceados

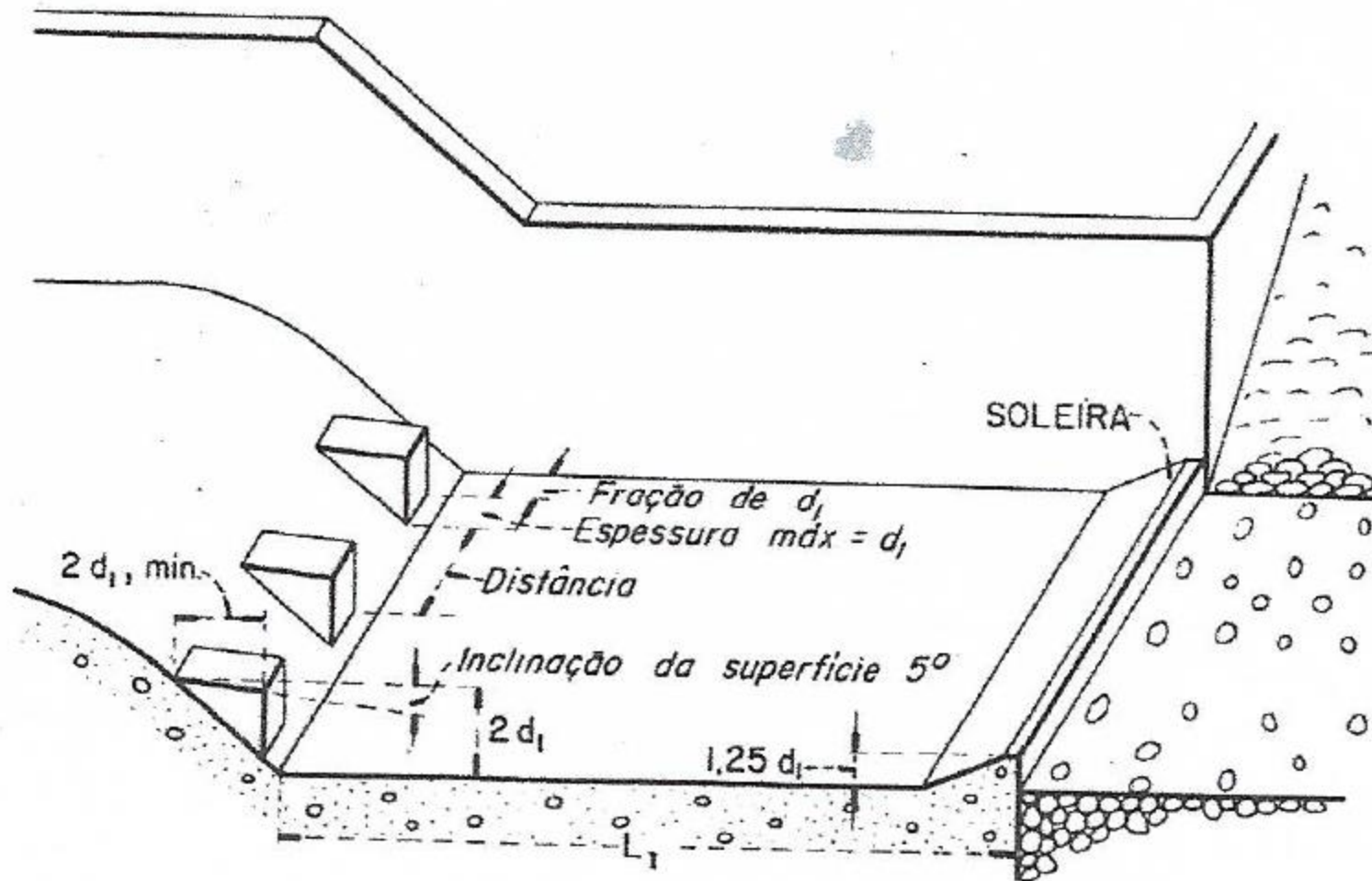
RESSALTO ESTÁVEL



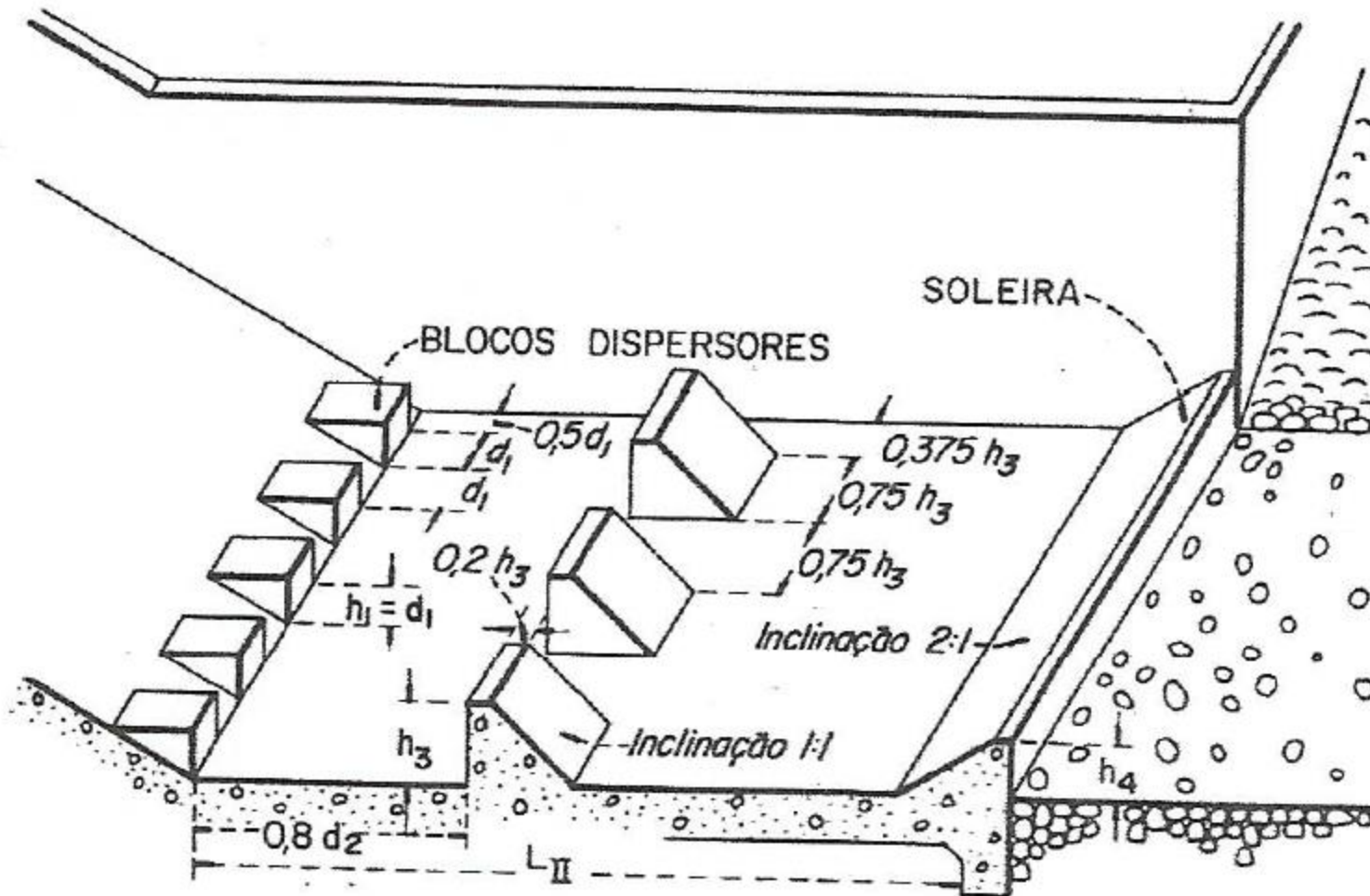
$F_1$  maiores que 9,0  
Forma D - Ressalto efetivo, mas com a superfície A  
Jusante rugosa

RESSALTO FORTE

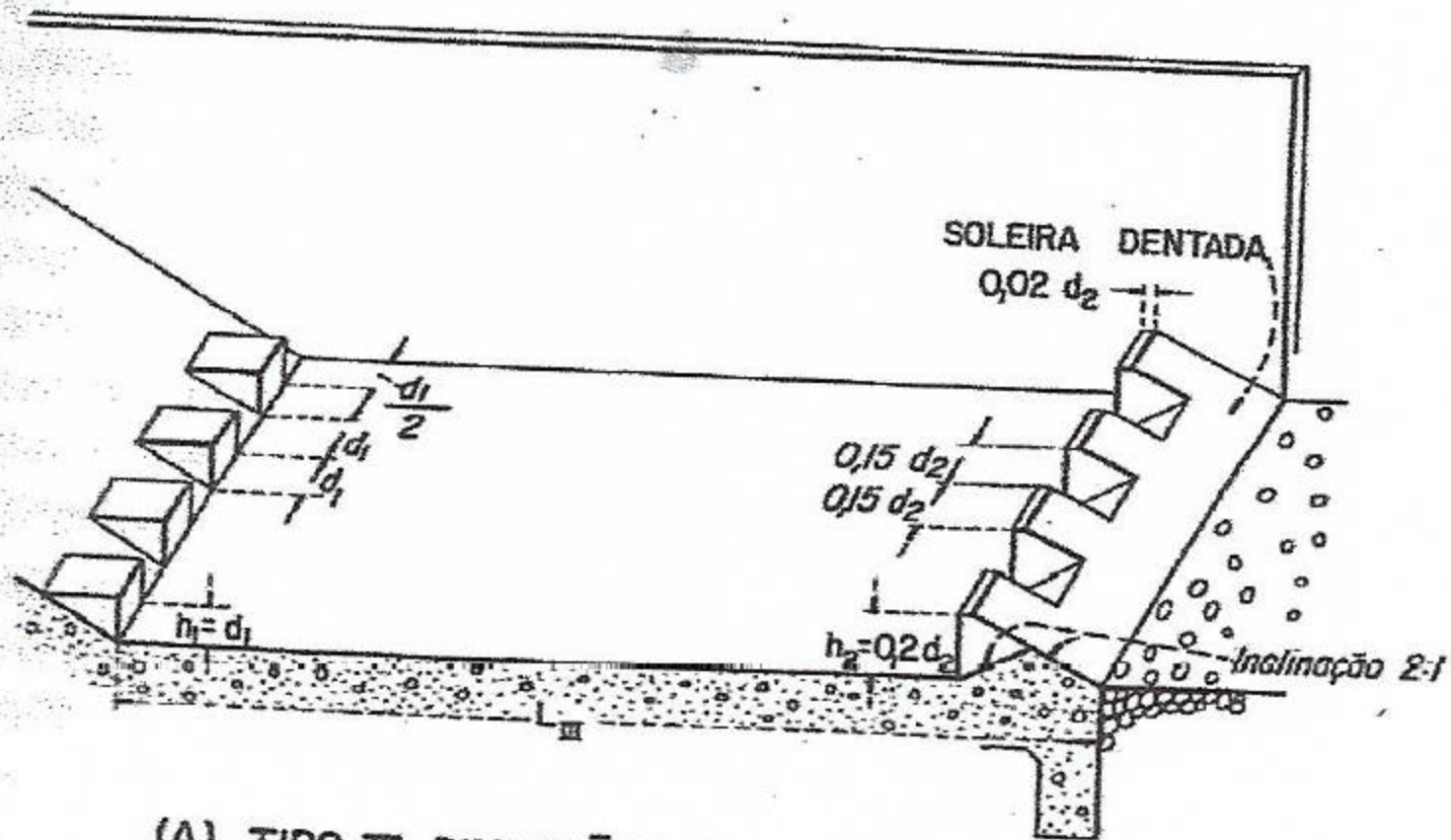




(A) TIPO I DIMENSÕES DA BACIA  
Número de Froude



(A) TIPO II DIMENSÕES DA BACIA  
Número de Froude



(A) TIPO III DIMENSÕES DA BACIA  
Número de Froude

## OPERAÇÃO DE VERTEDOUROS

# Comentários.

# UHE Marimbondo



BACIA DO RIO GRANDE

$P = 1.400 \text{ MW}$   
 $Q_v = 21.400 \text{ m}^3/\text{s}$   
 $Q_{\text{bacia}} = 16.000 \text{ m}^3/\text{s}$

# UHE Marimbondo

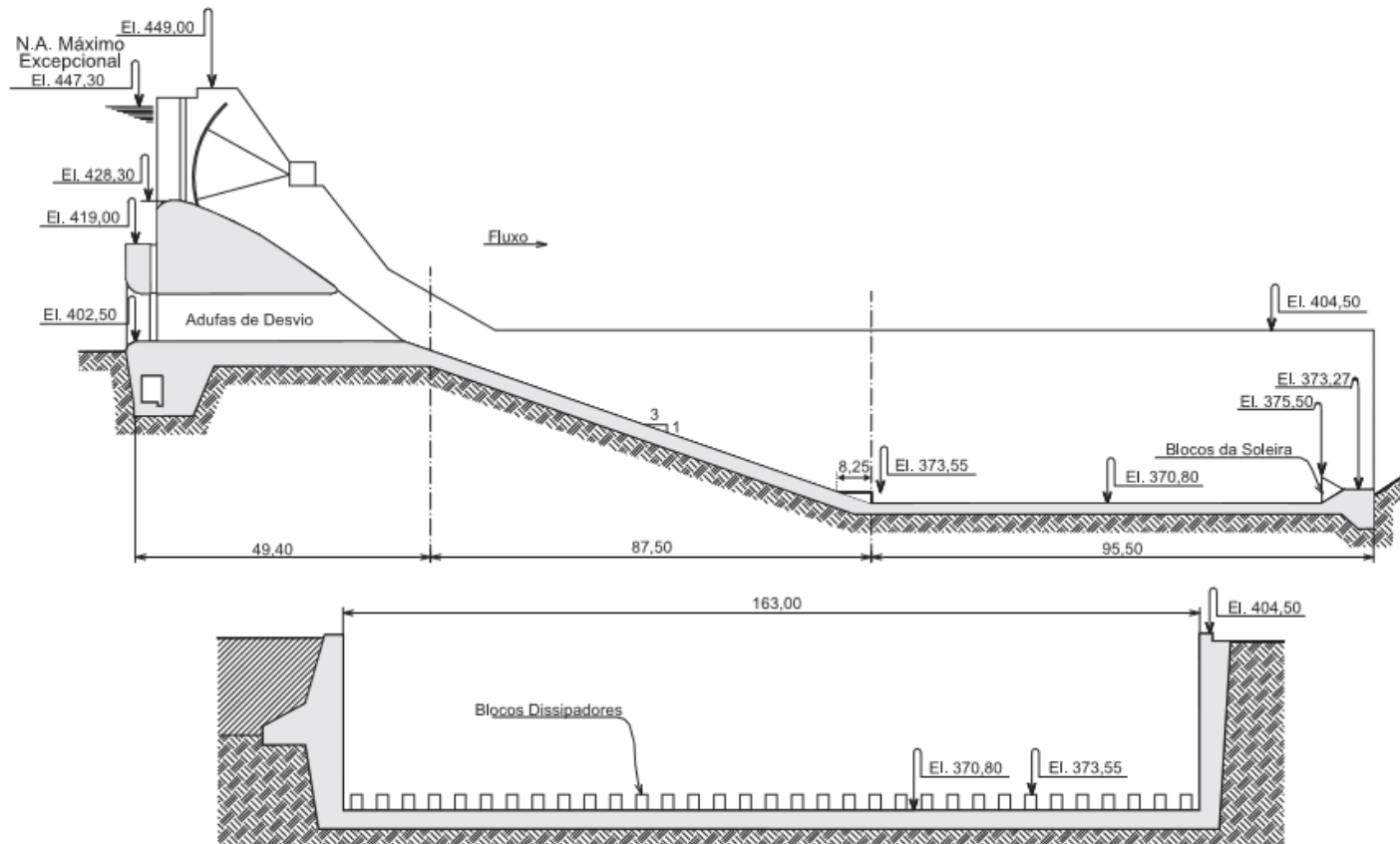


Figura 1 - Perfil longitudinal e seção do Vertedouro

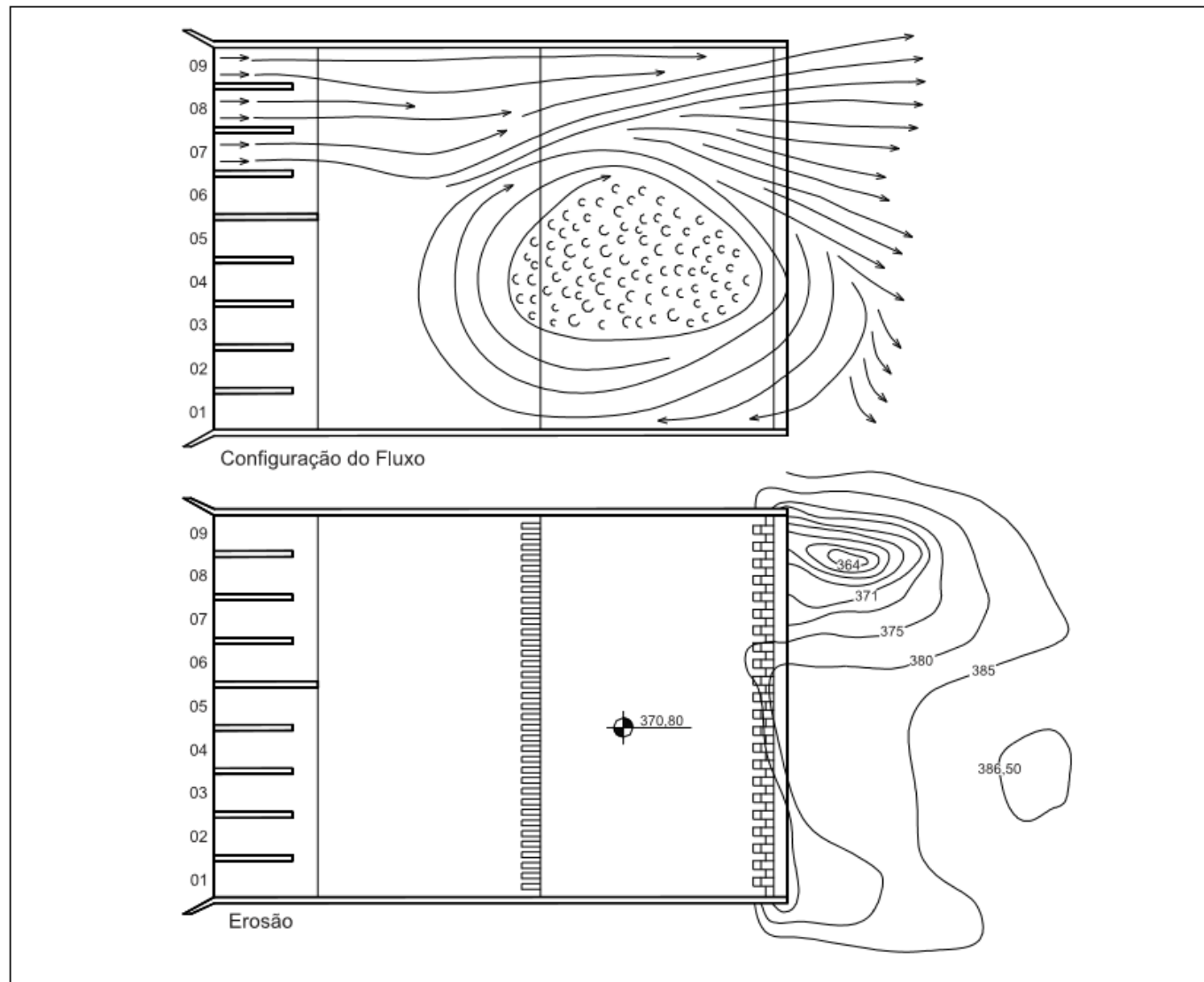
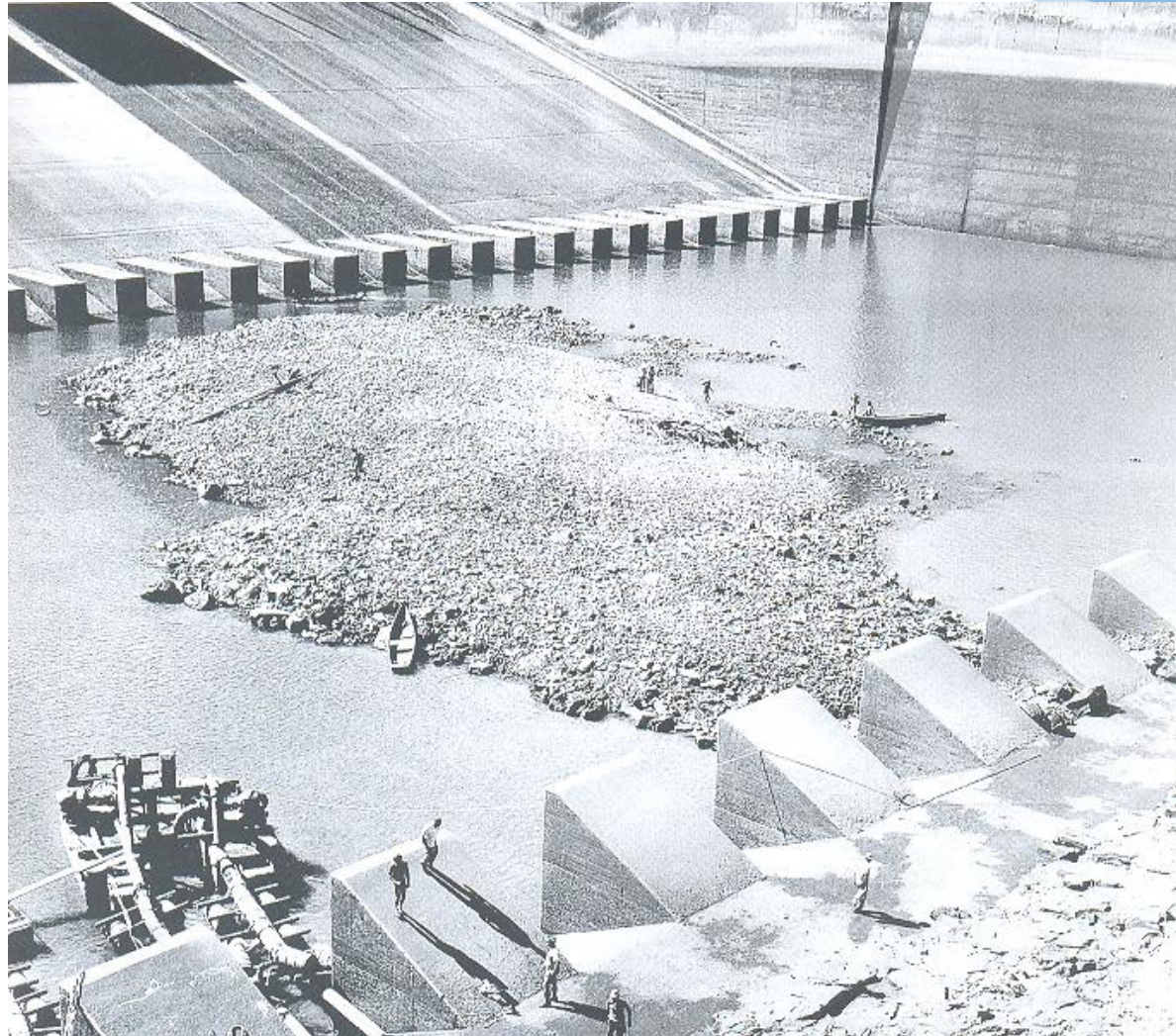


Figura 2 - Resultados dos ensaios em modelo com um vertimento de 4.000 m³/s

# UHE Marimbondo





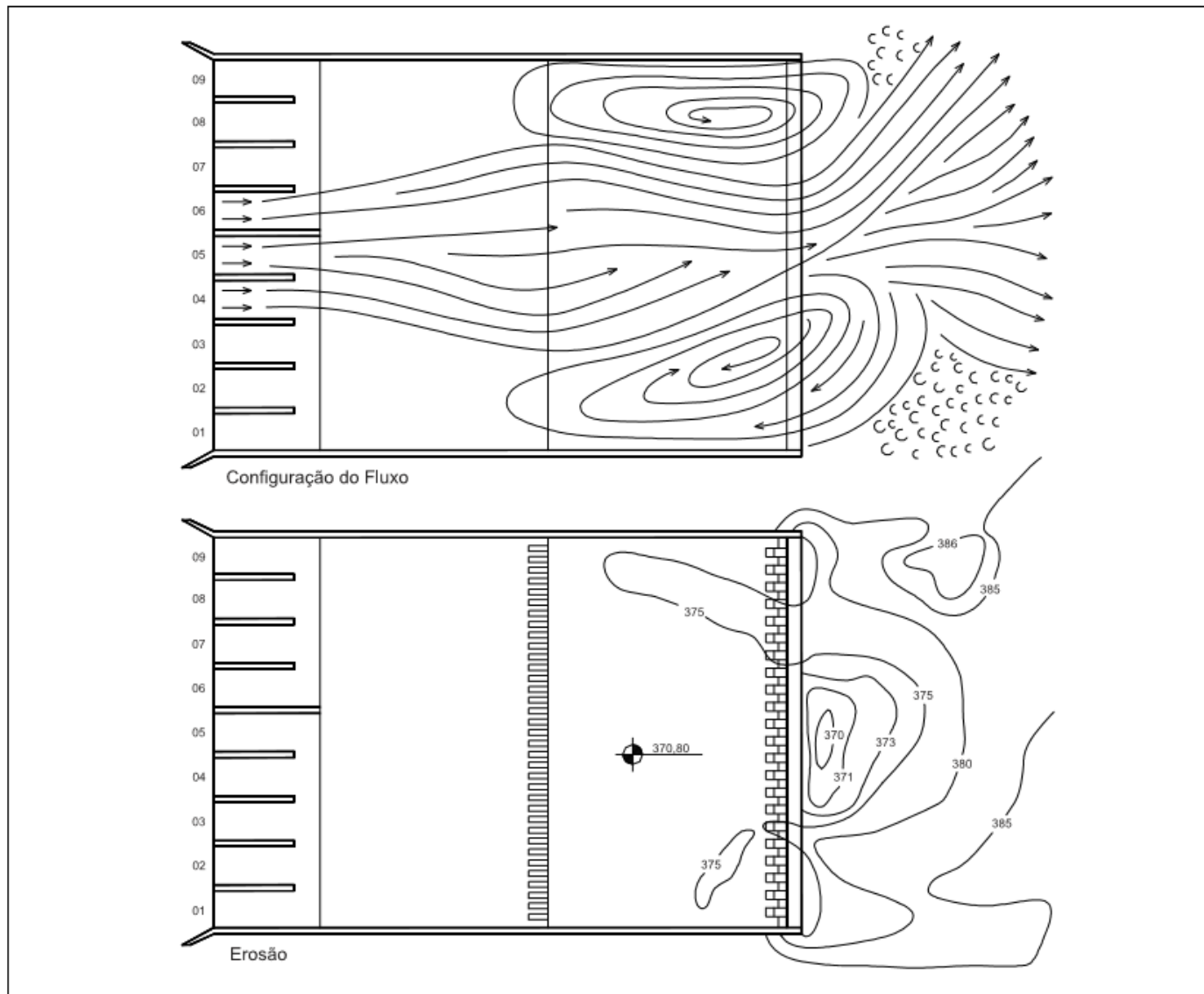


Figura 3 - Resultados dos ensaios em modelo com um vertimento de 4.000 m<sup>3</sup>/s

## UHE Marimbondo



Foto 7 - Detalhe das ferragens arrancadas da bacia de dissipação



Foto 8 - Ferragens arrancadas e pedras arredondadas

# UHE MARIMBONDO



# UHE Marimbondo



# CAVITAÇÃO EM BACIAS DE DISSIPACÃO

# UHE PORTO COLOMBIA



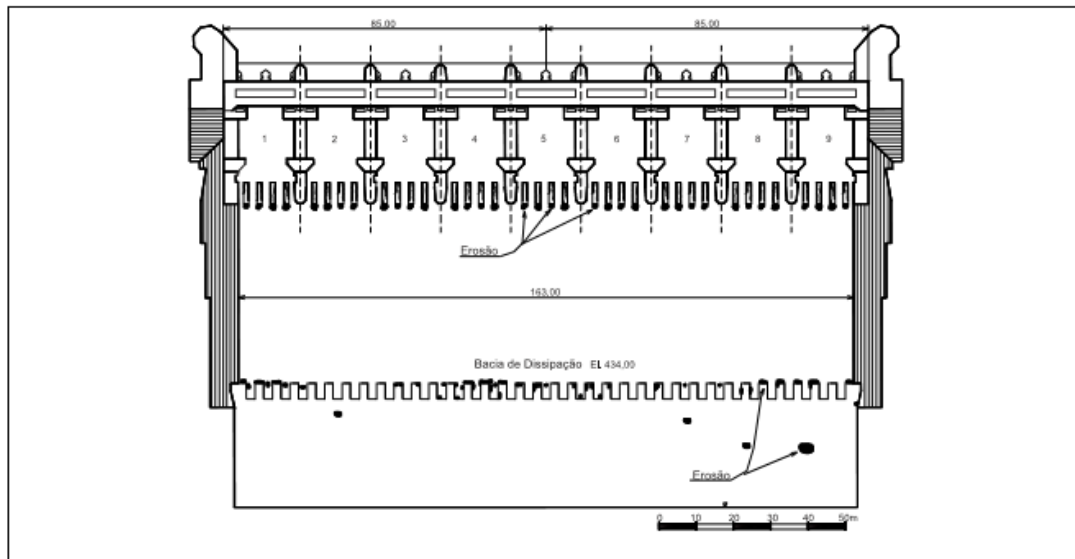


Figura 1 - Planta do vertedouro e mapeamento das erosões

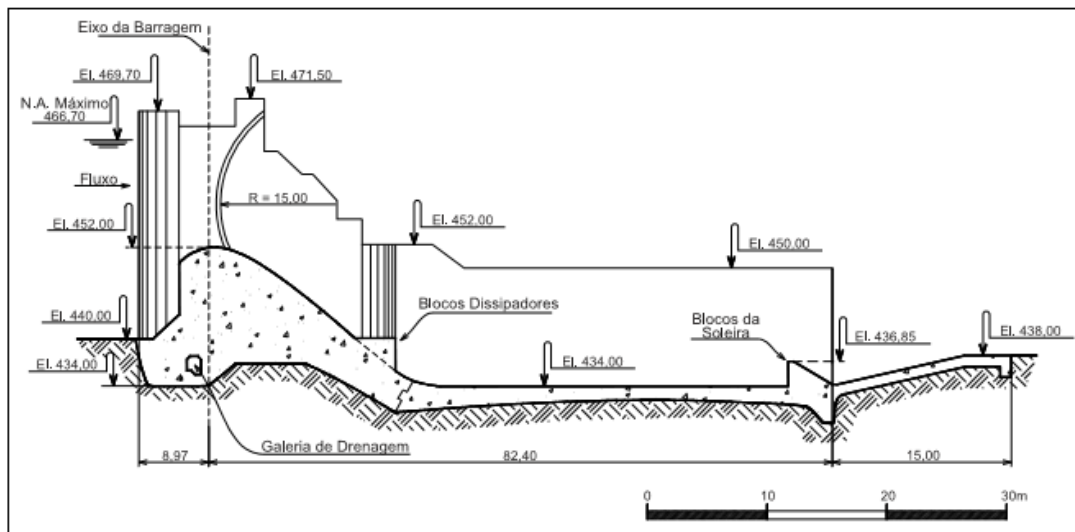
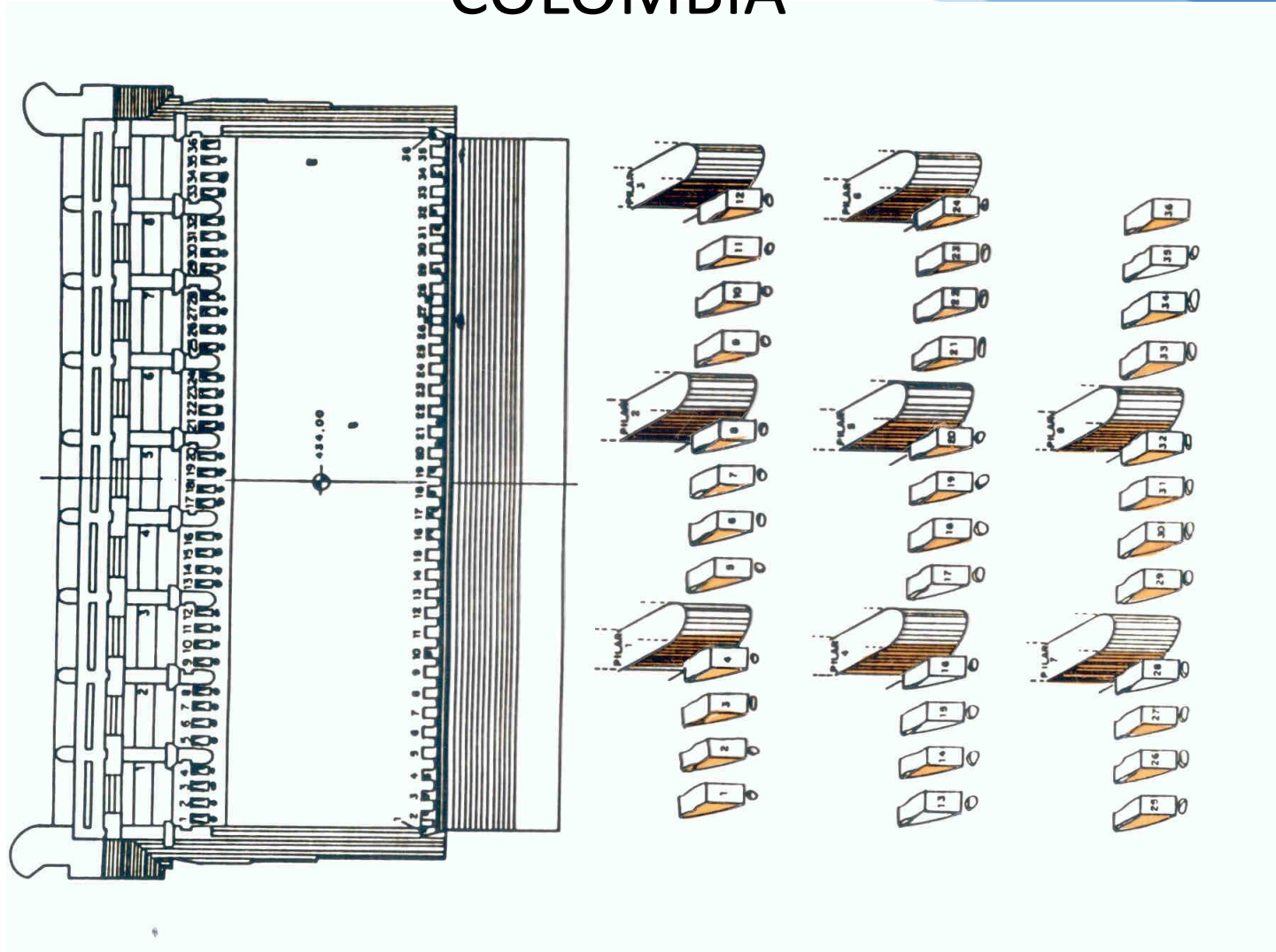


Figura 2 - Perfil longitudinal do vertedouro original

# UHE PORTO COLOMBIA





# UHE PORTO COLOMBIA

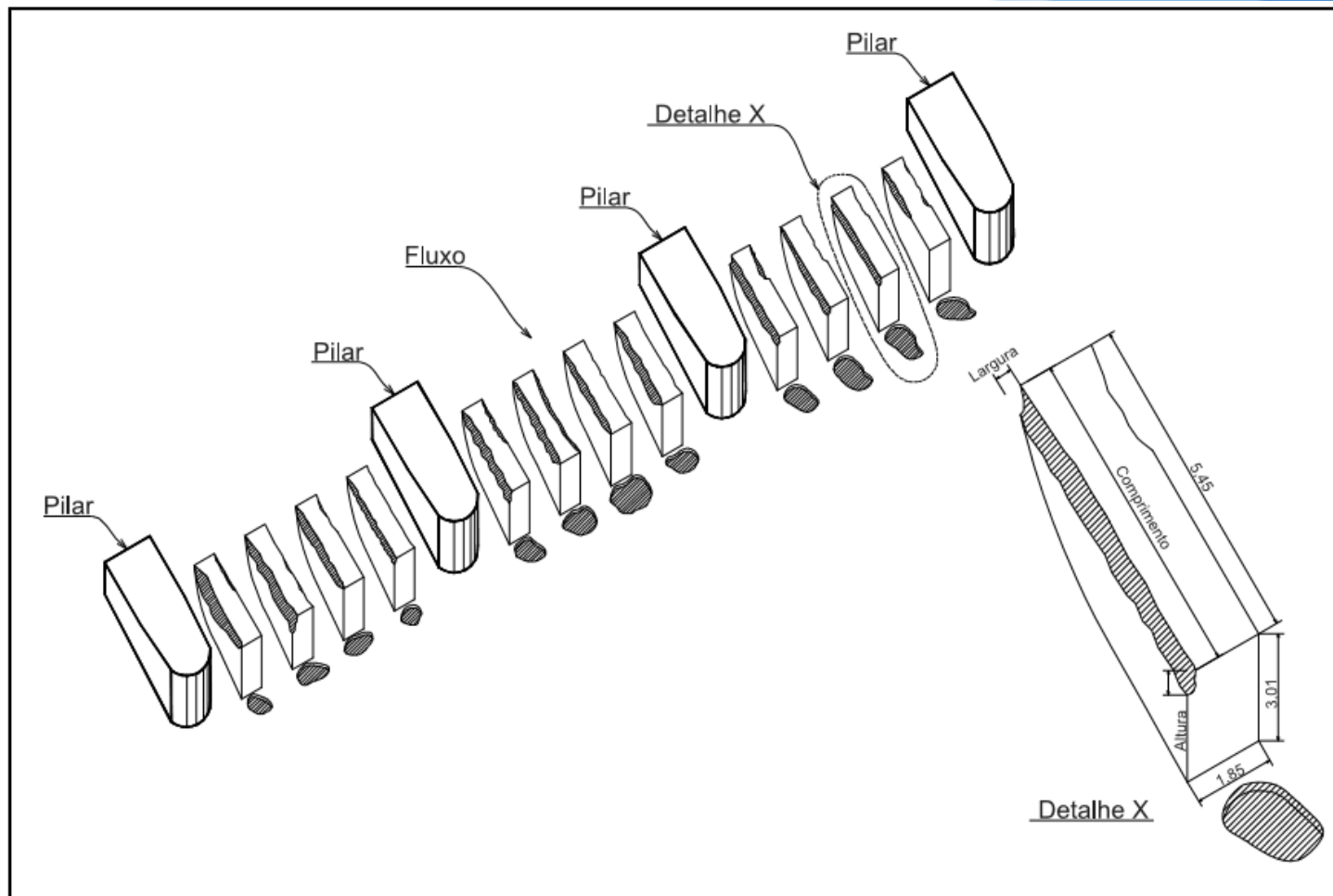


Figura 3 - Configuração típica de erosão dos blocos da calha  
(*chute blocks* - mapeamento de 1990)

# UHE PORTO COLOMBIA



# UHE PORTO COLOMBIA



# UHE PORTO COLOMBIA

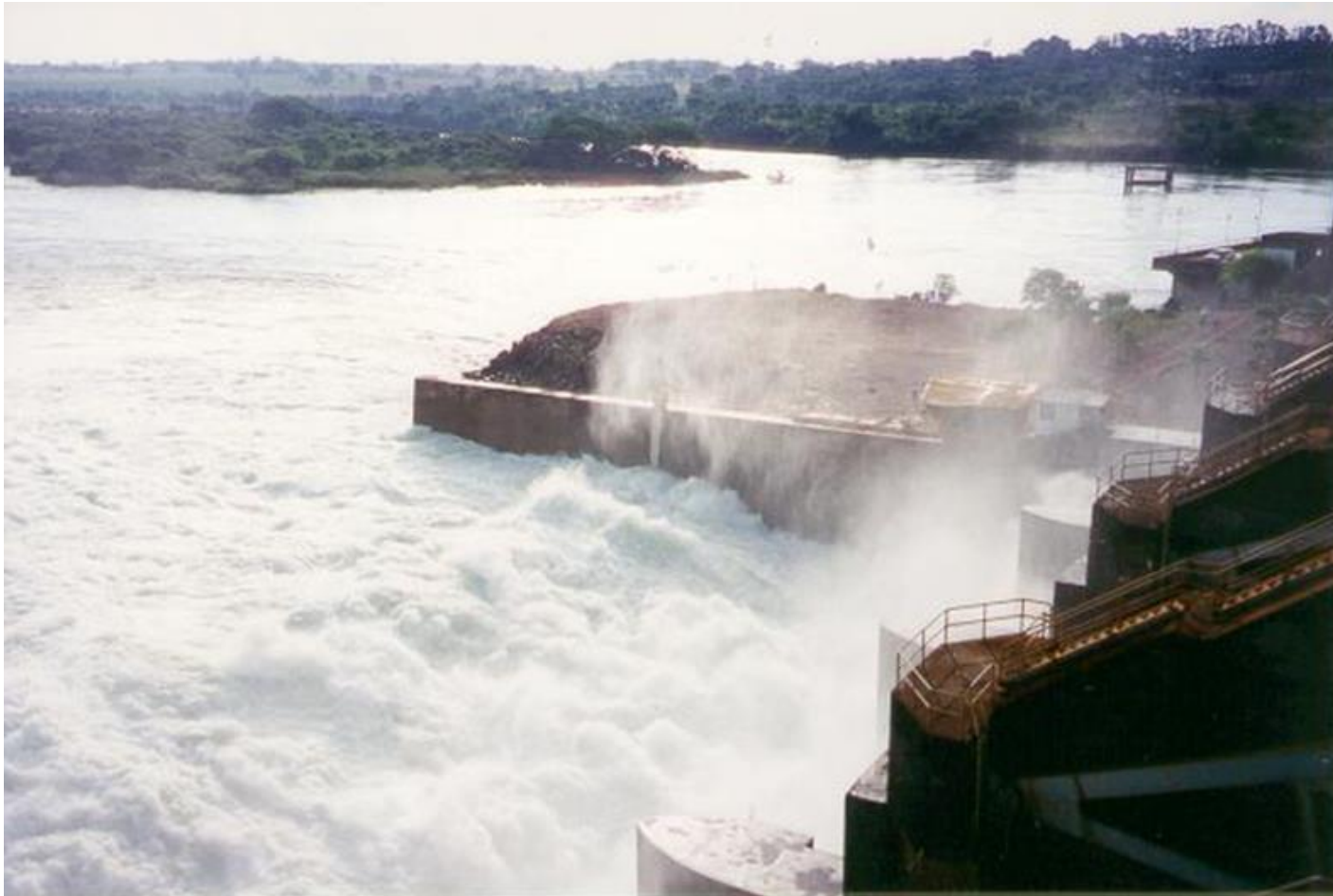


# UHE PORTO COLOMBIA



Foto 7 - Vista do vertedouro na conclusão das obras de recuperação

# UHE PORTO COLOMBIA



BACIA DO RIO GRANDE

P = 320 MW

Qv = 16.000 m<sup>3</sup>/s

## TOMADA D'ÁGUA

### - Canal de adução

O escoamento de aproximação da tomada d'água deverá ser subcrítico afim de minimizar a formação de vórtices e perda de carga.

O canal deve ser dimensionado para vazão máxima da usina, e sua perda de carga estimada pela forma de *Manning*.

A formação de vórtices desfavoráveis é muito influenciada pela circulação do escoamento no canal de aproximação. Portanto, o critério de submergência deverá ser considerado apenas como uma estimativa preliminar para o projeto da tomada de água, que será posteriormente verificado em modelo reduzido.

## TOMADA D'ÁGUA

### ▪ Geometria

A tomada de água será projetada de forma a estabelecer uma aceleração progressiva e gradual do escoamento do reservatório à adução, evitando-se os fenômenos de separação do escoamento e minimizando-se as perdas de carga.

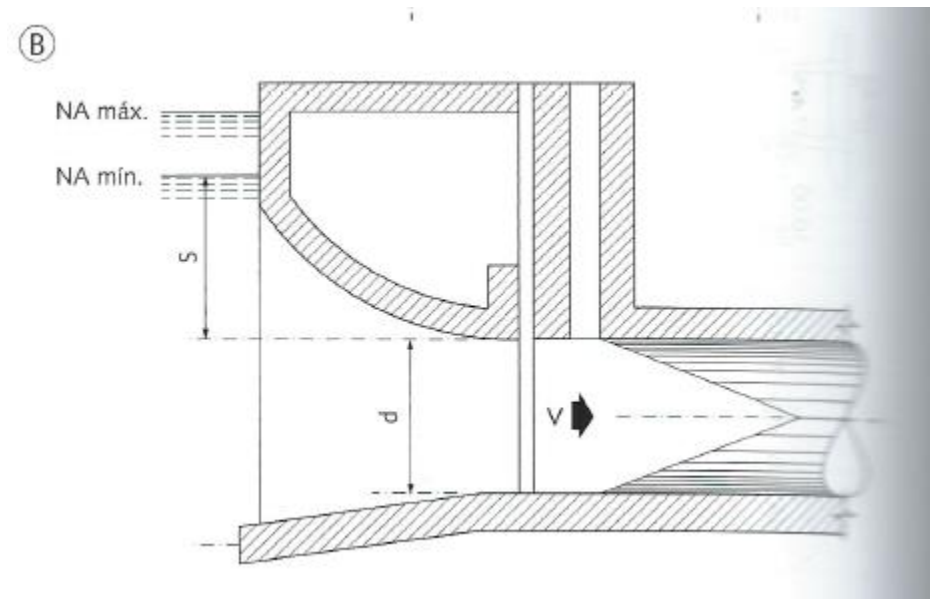
Para tomadas com carga menor que 30 m.c.a., a velocidade adotada na seção bruta das grades será de 1,0 a 1,5 m/s. Para tomadas com carga maior que 30 m.c.a., a velocidade adotada será de 1,5 a 2,5 m/s.

Na seção das comportas, a velocidade máxima não deverá ultrapassar a 6 m/s.

Submergência mínima

$$S = C \cdot V \cdot \sqrt{d}$$

$$C = 0,543 \text{ a } 0,724$$





- Duto de ventilação

O duto de ventilação será dimensionado para uma vazão de ar igual ao engolimento máximo da turbina, admitindo-se uma velocidade máxima de 60 m/s.

- dimensionamento das grades deverá considerar os efeitos de vibração que as mesmas serão submetidas.

## REMANSO DE RESERVATÓRIO

Remanso de elevação – Classe M

O cálculo do perfil da linha de água a montante da barragem será efetuado pelo método das diferenças finitas "Standard Step Method", com o objetivo de definir a área de inundação do reservatório, as interferências sobre obras existentes, e as condições de escavação do canal de restituição de eventuais usinas nas extremidades superiores do reservatório.

Aferição do perfil da linha d'água ( Comentários)

## VIDA ÚTIL DO RESERVATÓRIO

Sob o ponto de vista sedimentológico a vida útil de um reservatório cessa quando o assoreamento passa a prejudicar a operação do aproveitamento hidrelétrico. Além da perda da capacidade do reservatório, podem ser citados como problemas decorrentes, a redução gradual da geração de energia, dificuldades de operação da tomada de água, válvulas de descarga e comportas, danos às turbinas por abrasão, deposição de sedimentos na área do delta, reduzindo o volume útil do reservatório e criando dificuldades de navegação, deslocamento da área de remanso para montante e enchentes mais frequentes.

Deverão ser determinados:

- Deflúvio sólido total médio anual
- Eficiência de retenção de sedimentos no reservatório
- Tempo de assoreamento total do reservatório e do seu volume morto
- Depósitos no pé da barragem para 50 e 100 anos
- Traçados das curvas Cota x Área x Volume para 50 e 100 anos de assoreamento
- Efeito das grandes enchentes e o transporte de sedimentos para o reservatório.

Obs.: Preservação da mata ciliar, fator de grande importância para reduzir a afluência de sedimentos para o reservatório.

## UHE RIO DAS PEDRAS – ASSORIAMENTO COMPLETO DO RESERVATÓRIO



# OBRIGADO!

**PRIMEIRA BARRAGEM DE ENROCAMENTO COM FACE DE CONCRETO NO BRASIL  
RESERVATÓRIO DE USO MULTIPLO**

