



# **EQUIPAMENTOS HIDROMECAÂNICOS**

**Prof<sup>ra</sup> Dra YVONE DE FARIA LEMOS DE LUCCA**

**São Paulo, 6 de dezembro de 2016.**

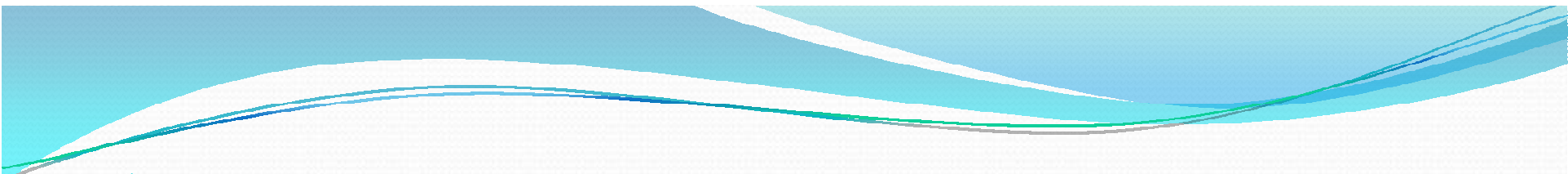
## Parte 9 – AERAÇÃO


- 1- Introdução
- 2- Tubos de aeração- Funções e características
- 3- Cálculo empírico
- 4- Coeficiente de aeração
- 5- Dimensionamento



## 1- INTRODUÇÃO

- ✓ Comportas instaladas em galerias e que não desembocam diretamente na atmosfera
- ✓ Depressões a jusante do tabuleiro
- ✓ Função da vazão, do grau de abertura da comporta e da geometria da instalação
- ✓ Vibrações e cavitação

- 
- ✓ Primeiros projetos de comportas de alta pressão: houve severos danos às comportas e aos tuneis;
  - ✓ Barragem de Roosevelt, EUA, (1908);
  - ✓ 6 comportas tipo gaveta, 1,5 m de vão e 3 m de altura e carga de 67 m;
  - ✓ 1909, Barragem de Pathfinder-;
  - ✓ 4 comportas de 1,1 m de vão e 1,96 m de altura;
  - ✓ Sons de trovões, explosões e tremores na barragem.

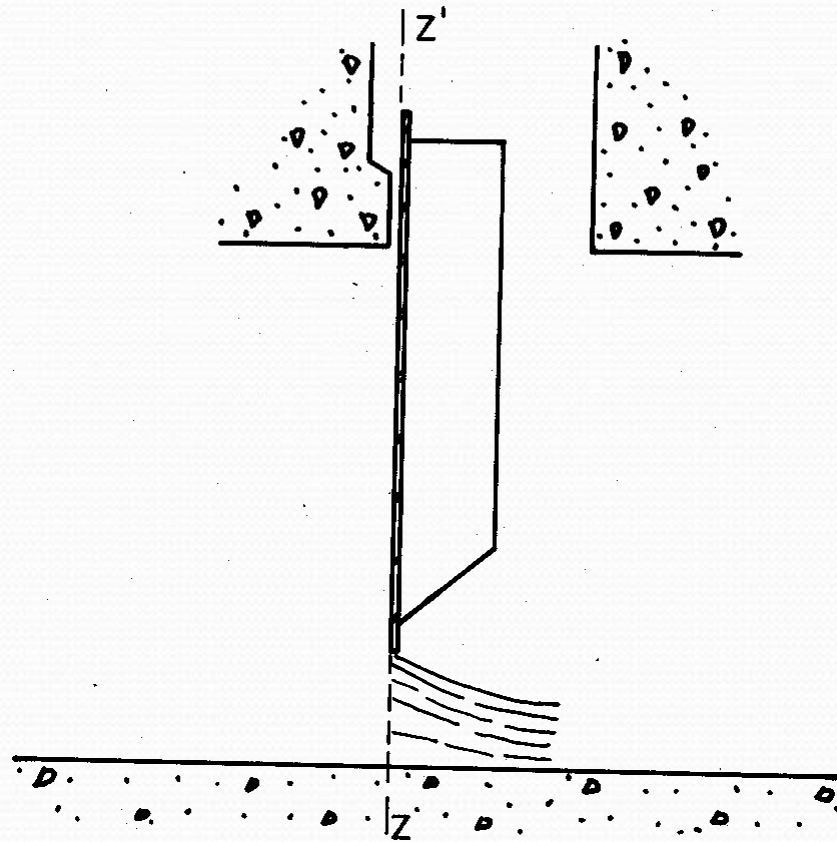
- 
- ✓ Observaram-se grandes volumes soltos de rochas, trechos destruídos das paredes de concreto abaixo das comportas e a blindagem de 19 mm de espessura amassada, como se fosse de papel!!!!!!
  - ✓ A partir de então as comportas de alta pressão passaram a ser dotadas de tubos de aeração a jusante das mesmas!!!!!!
  - ✓ pressão passou a ser próxima da pressão atmosférica.



## 2-Tubos de aeração- Função e características

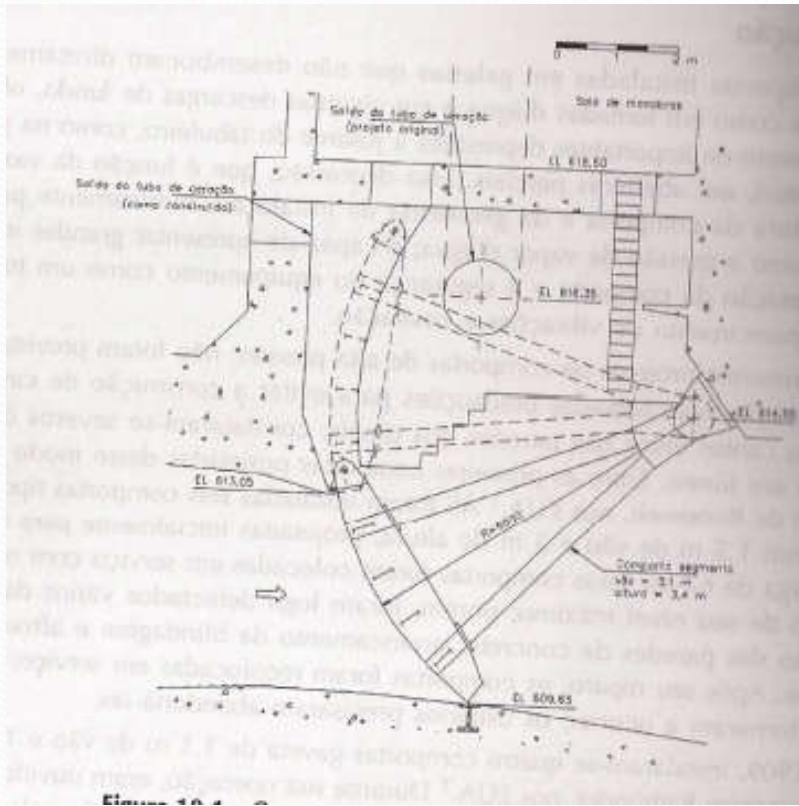
- ✓ São indispensáveis em em instalações de comportas planas com paramento e vedação a jusante;
- ✓ Comporta com paramento e vedação a montante não precisam pois a demanda de ar pode ser feita através do próprio poço da comporta!!!!
- ✓ Comportas segmento em descarga de fundo, nem sempre é possível prever um tubo de aeração!!!!

# COMPORTA PLANA COM PARAMENTO A MONTANTE



Paramento se desloca na direção  $Z-Z'$ , não há formação de depressões, portanto não são criadas forças hidrodinâmicas!!!!!!

## Comporta segmento de descarga de fundo




- ✓ 3,1 m de vão e 3,4 m de altura;
- ✓ Carga de 55m;
- ✓ Tubo de diâmetro de 1,2 m ;





A instalação de tubos de aeração possibilita:

- ✓ Redução ou eliminação da pressão subatmosférica no conduto com a comporta aberta parcialmente ou durante o fechamento de emergência;
- ✓ A entrada de ar durante a drenagem do conduto;
- ✓ O escapamento do ar durante o enchimento do conduto.

- 
- ✓ Tubo de aeração é formado na própria estrutura de concreto;
  - ✓ Pode ser embutido no concreto;
  - ✓ A maioria tem seção circular;
  - ✓ As vezes adota-se seção retangular ou quadrada para a facilidade de execução de formas;
  - ✓ Par maior eficiência, a extremidade inferior do tubo de aeração deve ser colocada no teto da galeria, o mais próximo possível da comporta, a uma distância que não exceda 2m;
  - ✓ A extremidade superior deve estar acima do nível d'água máx do reservatório e do lado de jusante!!!!

### 3- Tubos de aeração- Cálculo empírico para comportas de tomadas d'água

Fórmula empírica: 
$$d = 0,291 \cdot \left( \frac{P^2 L}{H_n^2} \right)^{0,273}$$

d=diâmetro do tubo de aeração em m;

P= potência nominal da turbina, em MW;

L= comprimento do tubo de aeração em m;

H<sub>n</sub>=queda nominal da turbina em m;

Os autores informam que o diâmetro do tubo calculado através da fórmula deve ser considerado como recomendação mínima!!!!!!



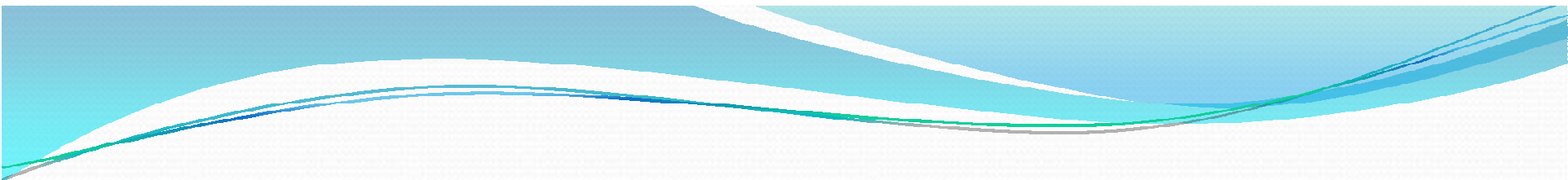
## 4- Coeficientes de aeração

- ✓ Pesquisas em modelos reduzidos e observações em protótipos!
- ✓ Resultados conduziram a uma grande dispersão de resultados e várias fórmulas foram desenvolvidas para o cálculo do coeficiente de aeração:

$$\beta = \frac{Q_a}{Q_w}$$

$Q_a$  = vazão de ar no tubo de aeração;

$Q_w$  = vazão de água descarregada pela comporta.

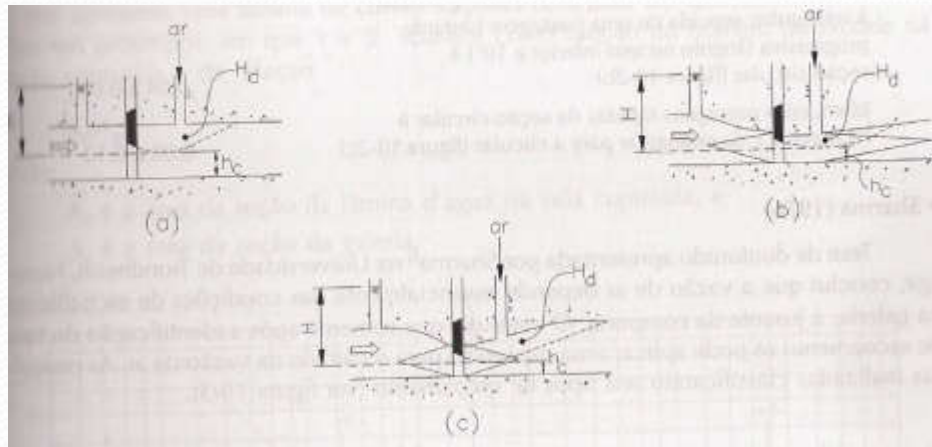

$$\beta = K.(F_c - 1)^n$$

$F_c$  = número de Froude na veia contraída;  
K e n = coeficientes empiricos;

$$F_c = \frac{v_c}{\sqrt{gh_c}} = \frac{\sqrt{2gH}}{\sqrt{gh_c}} = \sqrt{\frac{2H}{h_c}}$$

$V_c$  = velocidade da água na veia contraída;  
 $h_c$  = altura da lâmina d'água na veia contraída;  
H = altura da coluna de água referente ao topo da veia contraída;

## Tipos de galerias com comportas (Levin)



Dentre os trabalhos realizados destacam-se:

- ✓ Campbell e Guyton (1953);
- ✓ U.S.Army of Engineers (1964);
- ✓ Levin (1965);



Campbell e Guyton (1953)

Indicam que a vazão máxima de ar ocorre com a comporta aberta 80% e recomendam que se limite a velocidade máxima do ar no tubo em 45 m/s!!!!!!!

$$\beta = 0,04(F_c - 1)^{0,85}$$



U.S.Army Corps of Engineers (1964)

$$\beta = 0,03(F_c - 1)^{1,06}$$


A vazão máxima de ar ocorre com a comporta aberta 80% e o perfil inferior da comporta a 45 ° dá um coeficiente de contração de 0,80. Assim o número de Froude é calculado para uma altura da lâmina d'água igual a :

$$h_c = 0,8 \cdot 0,8h = 0,64.h$$

Onde *h* é a altura ou abertura máxima da comporta

A velocidade máxima do ar também é limitada a 45 m/s!!!





Levin (1965)

$$\beta = K(F_c - 1)$$

O coeficiente de forma  $K$  é adotado conforme tabela abaixo:

Condições	$K$
✓ Comporta plana em tunel circular	0,025 a 0,04
✓ Idem, com passagem progressiva da seção circular à retangular, seguida de uma passagem bastante progressiva (ângulo no teto inferior a $10^\circ$ ) à seção circular	0,04-a 0,06
✓ Idem, com passagens rápidas da seção circular à retangular. E de retangular para a circular	0,08 a 0,12

# Classificação dos tipos de escoamento em galerias com comportas

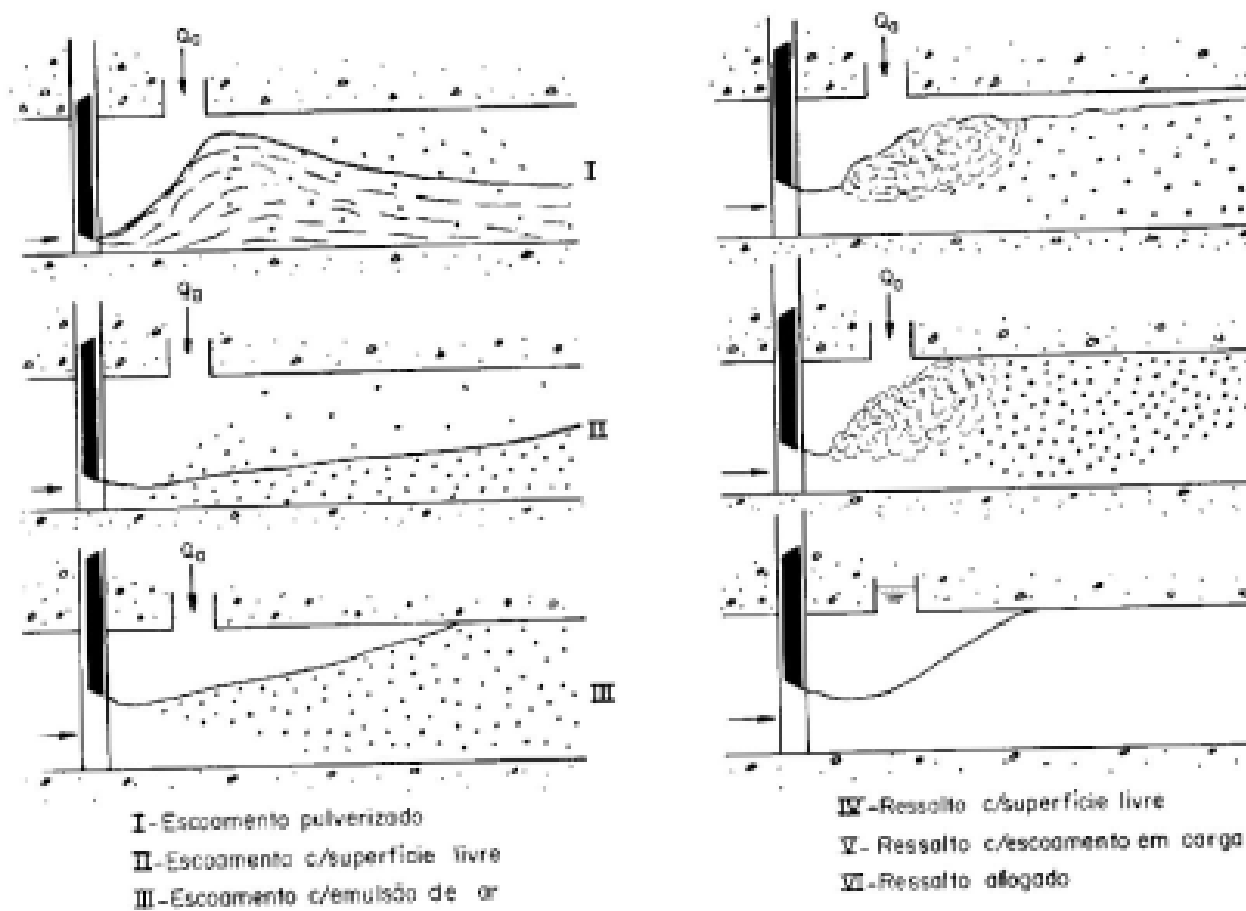
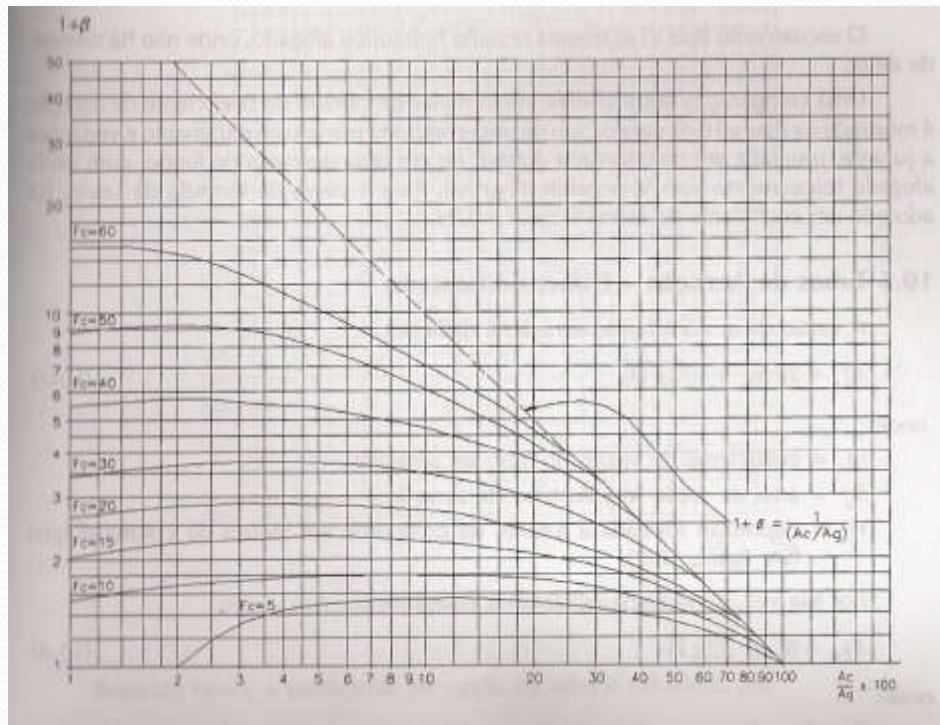
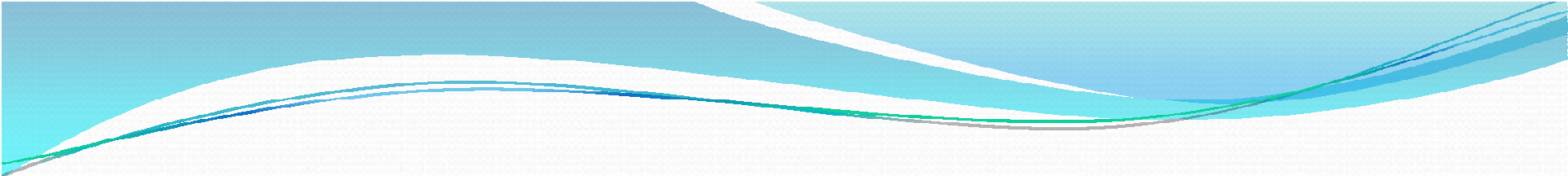


Fig. 10.3 Classificação dos tipos de escoamento em galerias com comportas (Sharma).

## Cálculo da vazão de ar para escoamento pulverizado com superfície livre ou com emulsão de ar (Sharma)





5- Tubos de aeração- Dimensionamento para comporta plana, paramento e vedações a jusante, em tomadas d'água ou descarga de fundo.

$$Q_{ar} = 28.m_a.S_a.\sqrt{2.g.H_d}$$

$Q_{ar}$  = vazão de ar no tubo de aeração;

$m_a$  = coeficiente de vazão do tubo de aeração;

$S_a$  = área da seção reta do tubo de aeração;

$H_d$  = depressão formada a jusante da comporta,( m.c.a ).


$$Q_w = B_c \cdot h_c \cdot \sqrt{2gH}$$

$Q_w$  = vazão de água sob a comporta;

$B_c$  e  $h_c$  = largura e altura da lâmina d'água na veia contraída;

$H$  = altura da coluna d'água referida ao topo da veia contraída.

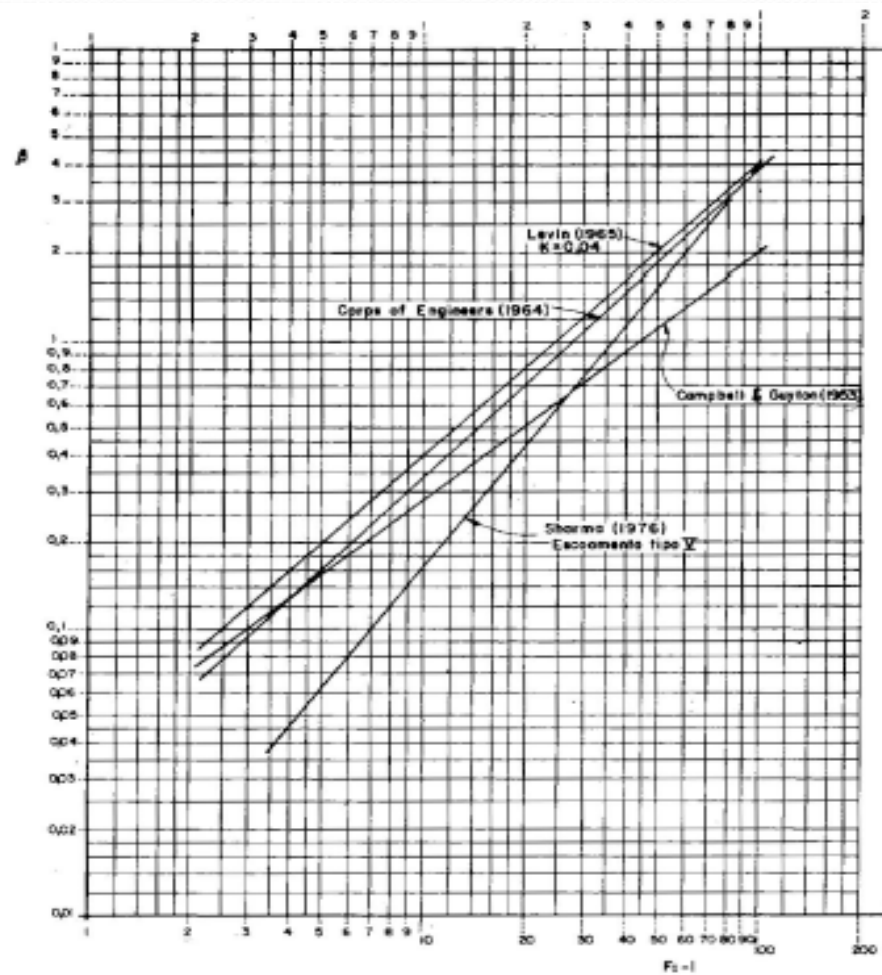
Como:

$$Q_{ar} = \beta \cdot Q_w$$

$$28 \cdot m_a \cdot S_a \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot H_d} = \beta \cdot B_c \cdot h_c \cdot \sqrt{2gH}$$

$$\therefore S_a = \frac{\beta \cdot B_c \cdot h_c}{28 \cdot m_a} \sqrt{\frac{H}{H_d}}$$

# Comparação dos coeficientes de aeração





Segundo Levin, o coeficiente de vazão do tubo é calculado por:

$$m_a = \frac{1}{\sqrt{\sum C_o + \lambda \frac{l}{d}}}$$

Onde :

$\sum C_o$  = soma dos coeficientes de perdas de cargas dinâmicas causadas por singularidades;

$\lambda$  = coeficiente de perda de carga por atrito, obtido do diagrama de Moody em função do número de Reynolds e da rugosidade relativa ( $\epsilon/d$ );

L e d = comprimento e diâmetro do tubo de aeração.

## Coeficientes de perdas de carga dinâmicas $C_o$

a) Entradas

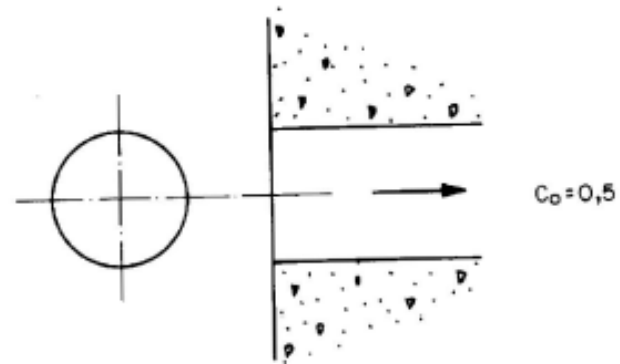
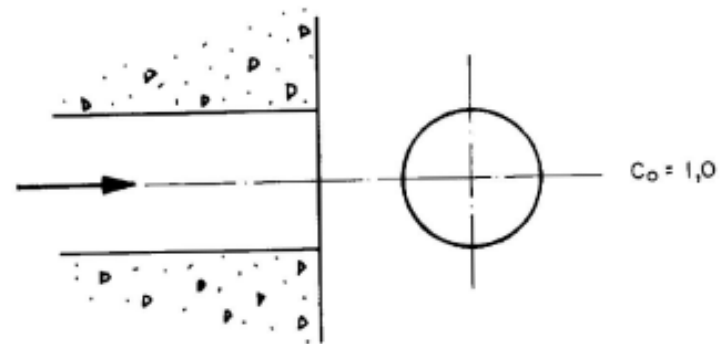


Fig. 10.6 Perda de carga em entradas circulares.

b) Saídas





### c) Grelhas

Seja

$$n = \frac{S_g}{S_a} \quad (10.14)$$

onde:

$S_g$  = área livre da grelha

$S_a$  = área da seção do tubo de aeração

Temos os seguintes coeficientes de perda de carga:

**TABELA 10.2 Coeficiente de Perda de Carga em Grelhas (ASHRAE)**

n	0,3	0,4	0,5	0,55	0,6	0,65	0,7	0,75	0,8	0,9	1,0
$C_o$	6,2	3,0	1,7	1,3	0,97	0,75	0,58	0,44	0,32	0,14	0

Em grelhas instaladas em entradas ou saídas, os valores de  $C_o$  indicados neste item devem ser somados aos coeficientes respectivos (0,5 ou 1,0, conforme o caso).

d) Joelhos

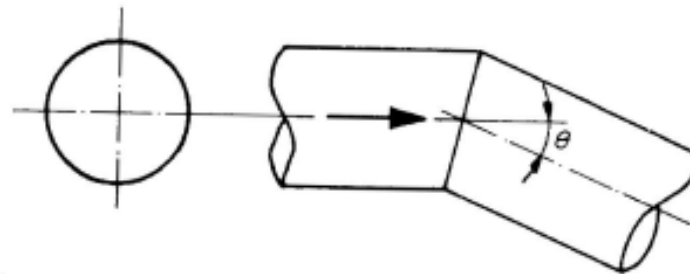


Fig. 10.8 Perda de carga em joelhos.

e) Curvas

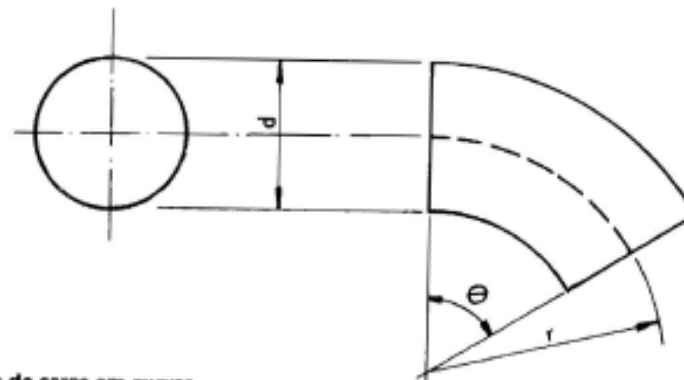


Fig. 10.9 Perda de carga em curvas.

**TABELA 10.3 Coeficiente de Perda de Carga em Joelhos (ASHRAE)**

$\theta$	20	30	45	60	75	90
$C_0$	0,08	0,16	0,34	0,55	0,81	1,2


**TABELA 10.4 Coeficiente de Perda de Carga em Curvas (ASHRAE)**

		$\theta$	$r/d$				
			0,5	0,75	1,0	1,5	2,0
$C_0$	30	0,32	0,15	0,10	0,07	0,06	0,05
	45	0,43	0,20	0,13	0,09	0,08	0,07
	60	0,55	0,26	0,17	0,12	0,10	0,09
	90	0,71	0,33	0,22	0,15	0,13	0,12



## Observações

- ✓ A determinação do coeficiente de aeração do tubo geralmente é feita por tentativas, partindo-se do conhecimento da geometria do tubo de aeração e de um valor arbitrado para o diâmetro!!!!!!
- ✓ Com isso, determinam-se as perdas de carga e a área da seção reta do tubo de aeração.
- ✓ Nesse ponto, checa-se o diâmetro: se diferir do arbitrado inicialmente, escolhe-se outro valor e repete-se o cálculo acima descrito!!!!!!




✓ A velocidade do ar no tubo de aeração depende diretamente da depressão  $H_d$  ;

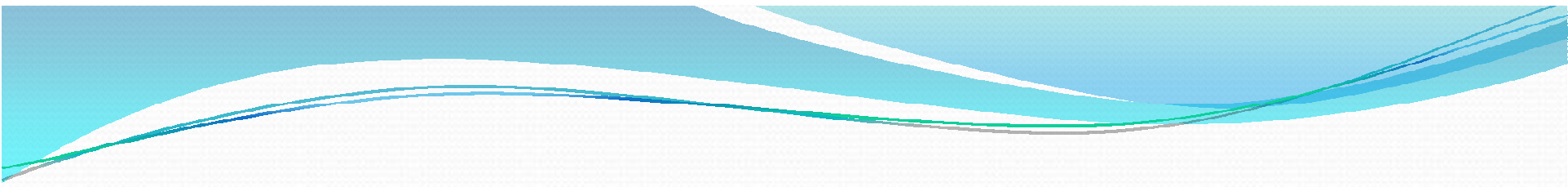
✓ Par um número de Mach inferior a 0,5, temos:

$$v_a = 28.m_a.\sqrt{2.g.H_d}$$

✓ A depressão formada a jusante da comporta não deve ultrapassar certos limites, quanto maior seu valor, maior a possibilidade do aparecimento de pulsações e de cavitação!!!!!!

✓ Levin diz que as depressões correspondentes até a 1,5 mca podem ser suportadas sem problemas em instalações bem projetadas!!!!!!

- 
- ✓ O U.S. Army Corps of Engineers sugere limitar a velocidade do ar em 45 m/s, o que, para um coeficiente de vazão de ar  $m_a = 0,7$ , equivaleria uma depressão em torno de 0,3 mca!!!!!!
  - ✓ No caso de tubo de aeração de seção retangular, os cálculos podem ser efetuados como se a seção fosse circular. A equivalência entre as seções circular e retangular, para a tubulação de mesmo comprimento, vazão e perdas, é dada pela seguinte fórmula de ASHRAE:


$$D_e = 1,3 \cdot \sqrt[0,8]{\frac{(a \cdot b)^5}{(a + b)^2}} = 1,3 \cdot \frac{(a \cdot b)^{0,625}}{(a + b)^{0,25}}$$

$D_e$  = diâmetro da seção circular equivalente;

$a$ ,  $b$  = dimensões do retângulo;

No caso particular de seção quadrada, a equivalência pode ser dada por:

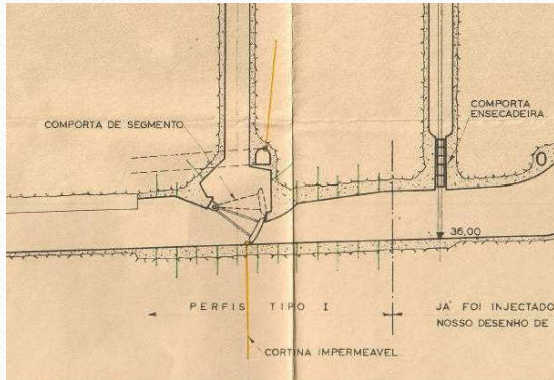
$$D_e = 1,093 \cdot a$$

Onde  $a$  = a dimensão do lado do quadrado.

# 1º Estudo de caso: U.H. Cambambe

Efeito do fenômeno da cavitação → comprometer a estrutura do túnel.

Comporta segmento de fundo- soleira reta, cavitação.



**Figura 1- corte da descarga de fundo da U.H. Cambambe**

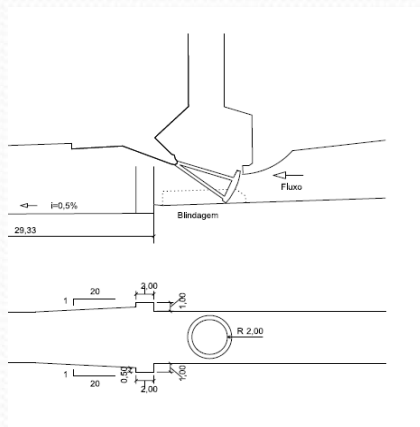


**Figura 2- Danos causados no protótipo (vista de jusante para montante)**



# U.H.Cambambe

- ✓ Pressões médias no escoamento, valores muito baixos.
- ✓ Projeto de ranhuras a jusante da comporta segmento; salto no escoamento e descolamento do fluxo, aumenta a entrada de ar, a pressão sobe para o valor da patm Local.



## 2º Estudo de caso- Eclusa de Tucuruí

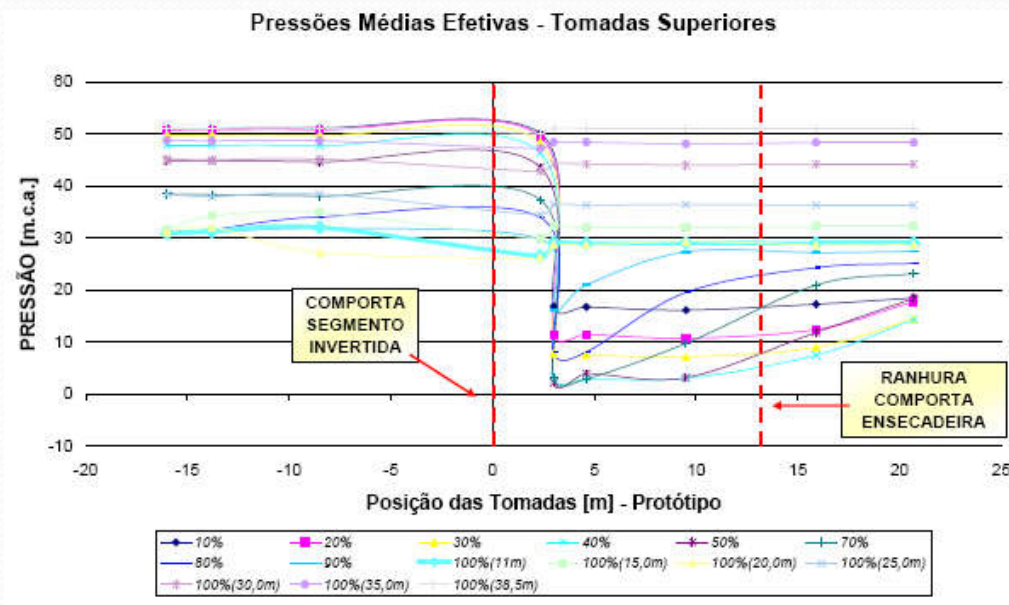
Comporta segmento invertida



## 2º Estudo de caso- Eclusa de Tucuruí

Comporta segmento invertida

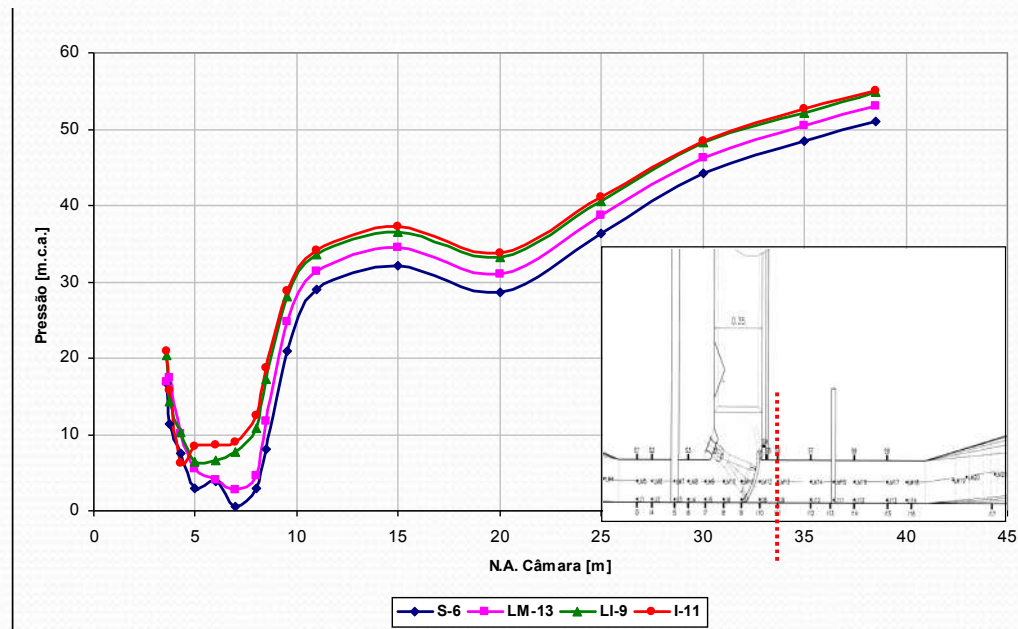
- ✓ Leis de manobras especiais para determinadas condições de submergência;
- ✓ Estudo de pressões médias em **modelo reduzido** definem a lei de enchimento;




## 2º- Estudo de caso- Eclusa de Tucuruí

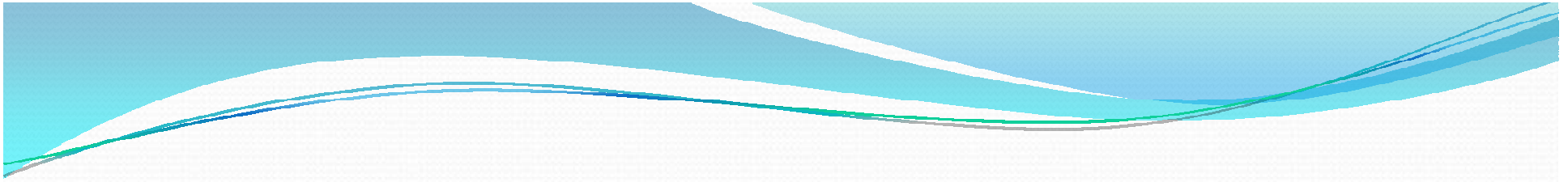
Dificuldades após o comissionamento do sistema de enchimento:

- ✓ Velocidades altas de ar entrando pela aeração ( ruídos excessivos);
- ✓ Vibrações das estruturas de concreto;
- ✓ Oscilações excessivas da comporta segmento invertida.



## 2º Estudo de caso- Eclusa de Tucuruí- (Continuação)

- ✓ A operação de abertura total sem parada intermediária não era adequada para algumas aberturas da comporta;
- ✓ A técnica de ensaio, a sensibilidade dos técnicos do laboratório de hidráulica em modelo reduzido  decisão da alteração da lei de manobra na obra;
- ✓ Gráficos de pressões médias, análise mais apurada dos resultados foi possível a comparação das informações da obra com os dados do laboratório;



- Foi realizada uma análise por sessões transversais ao longo do trecho em estudo e pelos gráficos de seções transversais definiu-se a necessidade de paradas intermediárias.
- A resposta dos dados do modelo reduzido foi imediata e decisiva para definição da nova lei de manobra do enchimento da câmara da eclusa.