



EQUIPAMENTOS HIDROMECAÂNICOS

Prof^{ra} D^{ra} YVONE DE FARIA LEMOS DE LUCCA

São Paulo, 6 de dezembro de 2016.

Parte 5- FORÇAS HIDRODINÂMICAS

✓ 1-INTRODUÇÃO

✓ 2-FATORES DE INFLUÊNCIA NAS FORÇAS
HIDRODINÂMICAS

✓ 3-MÉTODOS DE CÁLCULOS DAS FORÇAS
HIDRODINÂMICAS

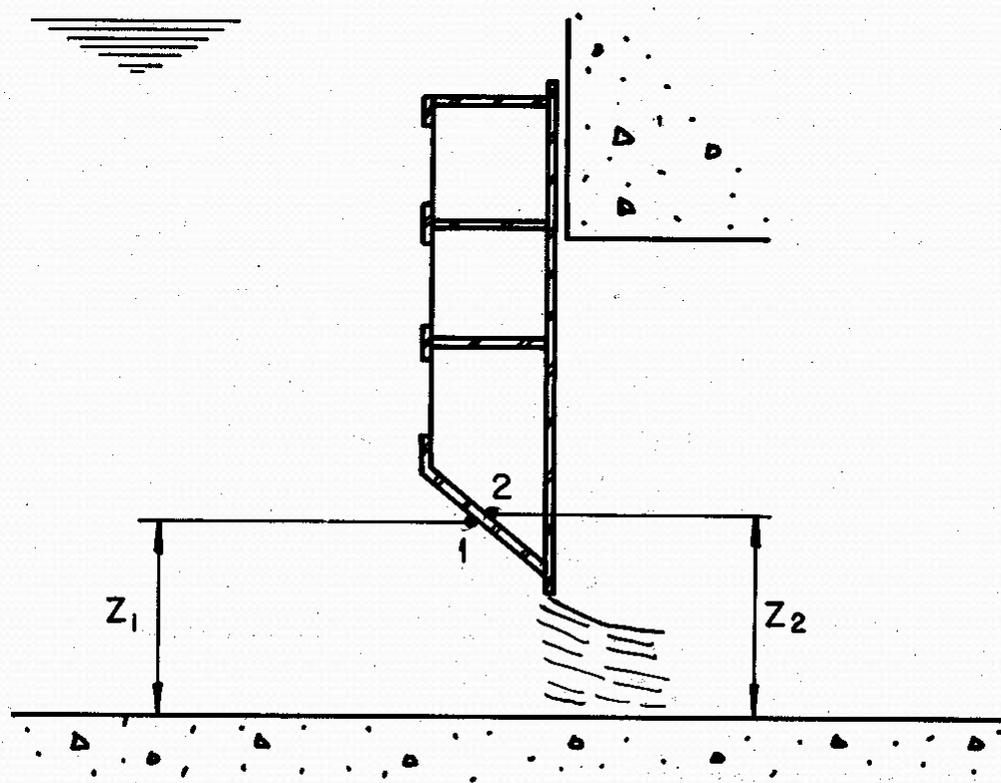
✓ 4-TESTES EM MODELO REDUZIDO



1- INTRODUÇÃO

- ✓ Comporta totalmente fechada, fluido em repouso, esforços hidráulicos são determinados por métodos analíticos;
- ✓ Ausência de fluxo: Forças hidráulicas = empuxo de Arquimedes;
- ✓ Comporta aberta, existe uma redução de pressão na parte inferior da comporta, devido ao fluxo em alta velocidade.

COMPORTA PARCIALMENTE ABERTA





✓ Bernoulli entre os pontos 1 e 2:

$$\frac{p_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2.g} + z_1 = \frac{p_2}{\gamma} + \frac{v_2^2}{2.g} + z_2$$

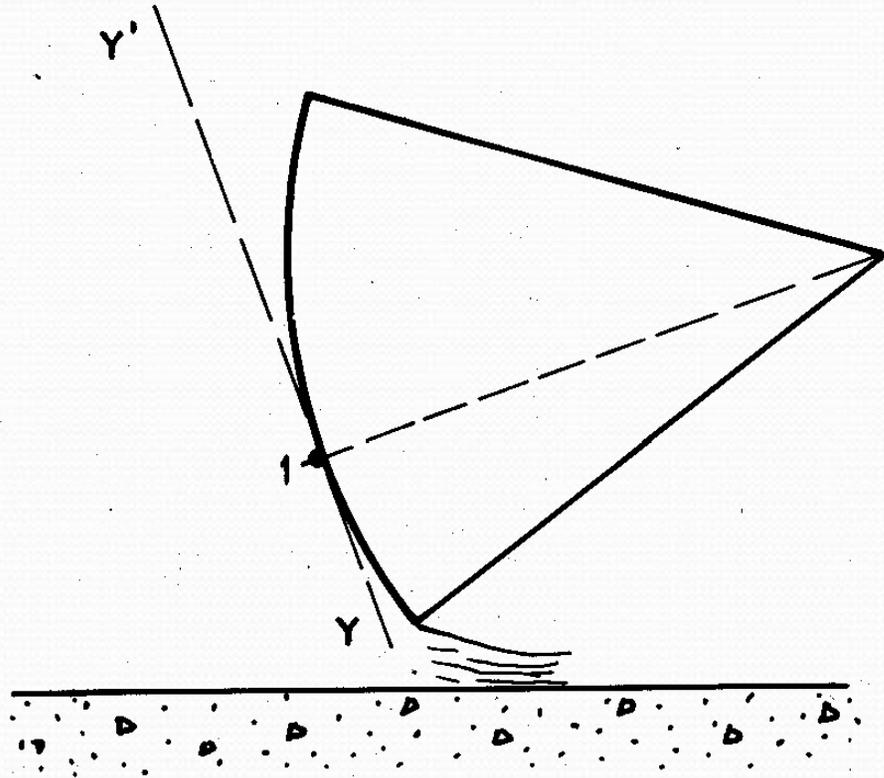
✓ Fazendo $z_1=z_2$, $v_2=0$, temos:

$$\frac{p_2 - p_1}{\gamma} = \frac{v_1^2}{2.g}$$

✓ O perfil inferior da comporta está submetido a uma diferença de pressão , que dá origem a uma força de downpull!!!!!!

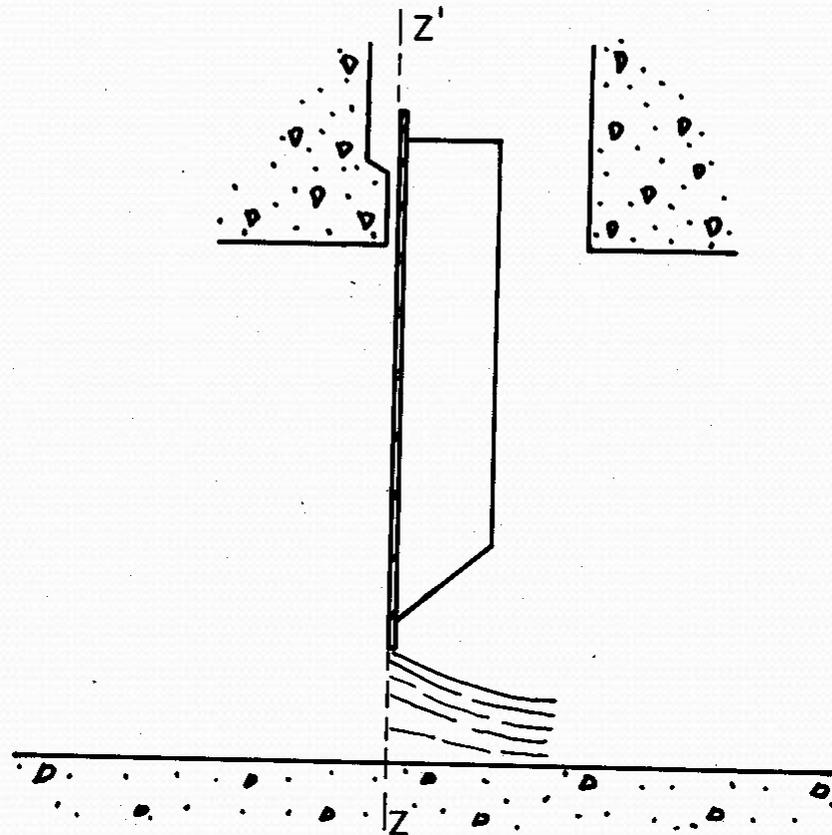
✓ Não aparecem em comportas planas com paramento a montante nem em comportas segmento!!!!

COMPORTA SEGMENTO PARCIALMENTE ABERTA



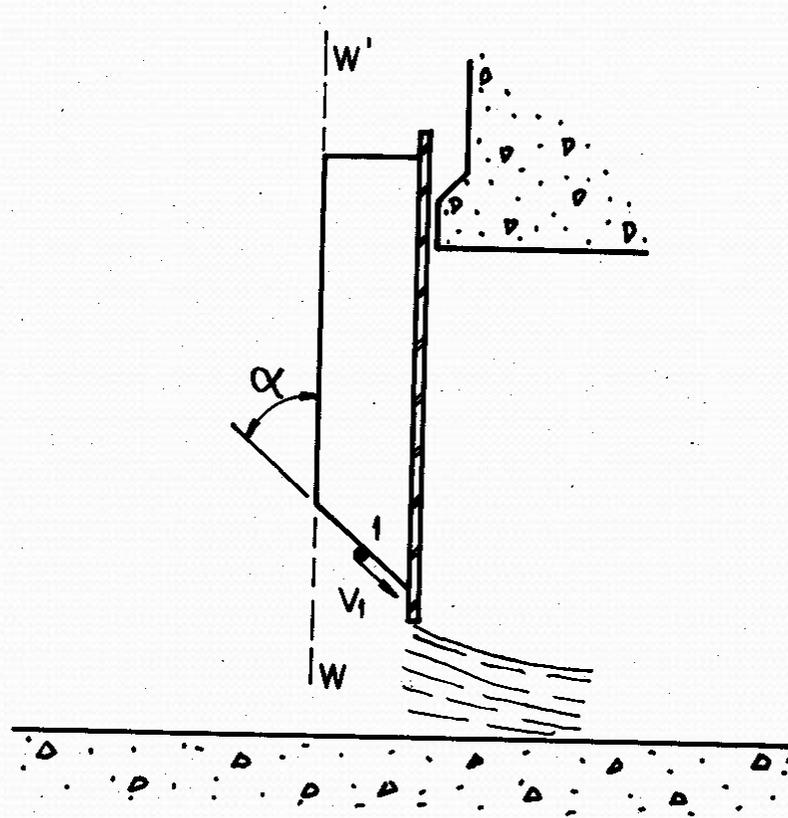
A velocidade da água tem a mesma direção do movimento da comporta no ponto 1 (tangente Y-Y'), portanto não há forças hidrodinâmicas!!!!!!

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 PLANA COM PARAMENTO A JUSANTE



Qualquer ponto do perfil inferior da comporta movimentar-se paralelamente à direção $W-W'$, enquanto o fluxo faz um ângulo com $W-W'$!!!! KNAPP, condição básica para o aparecimento de forças hidrodinâmicas!!!!

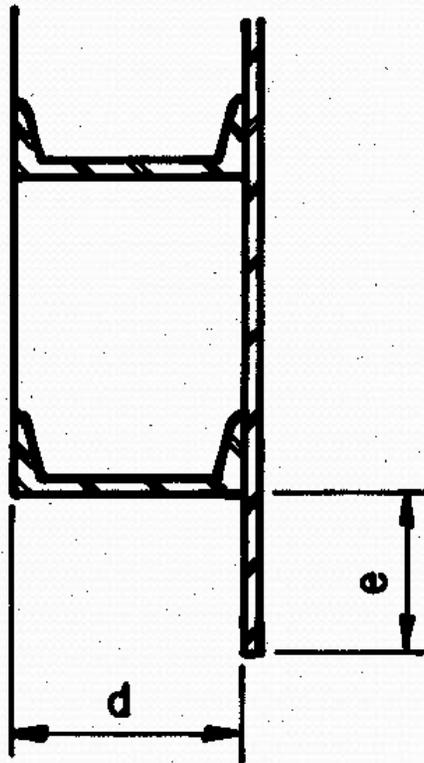


2- FATORES DE INFLUÊNCIA NAS FORÇAS HIDRODINÂMICAS

- ✓ A força de downpull é uma função da altura d água e da área da seção horizontal da comporta;
- ✓ Varia com o grau de abertura da comporta;
- ✓ Forma do perfil inferior da comporta ;
- ✓ Projeção da vedação superior;
- ✓ Folgas entre a comporta e os frontais montante e jusante;
- ✓ Espessura da comporta;
- ✓ Recesso na parede vertical de jusante.

Forma do perfil inferior

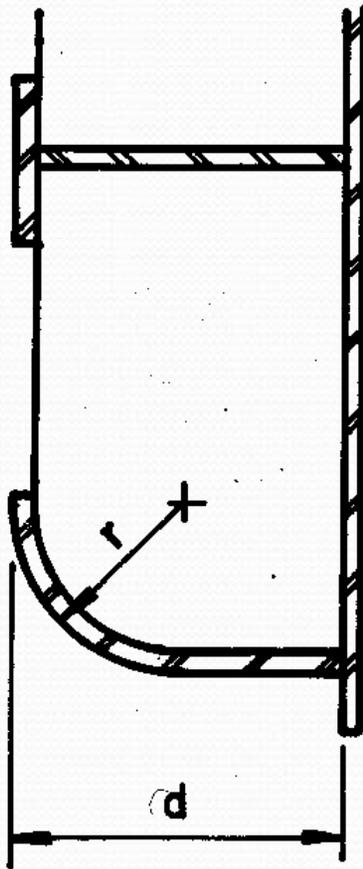
2.1-COMPORTA COM FUNDO CHATO



- ✓ Aumenta e/d , reduz downpull, a vibração e a demanda de ar!!!!
- ✓ e/d e abaixo de 0,6!!!!
- ✓ Longas extensões do paramento, requerem um esforço estrutural considerável abaixo da viga inferior!!!!

Forma do perfil inferior

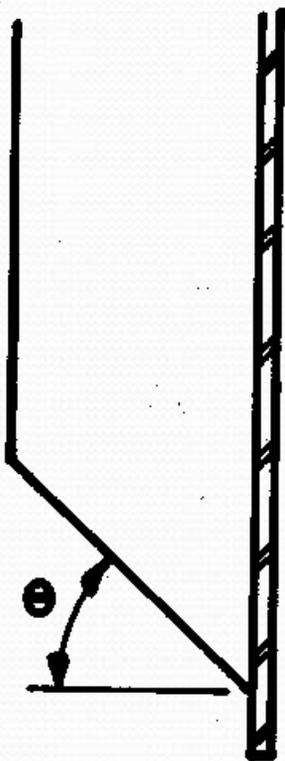
2.2- COMPORTA COM FUNDO CURVO



- ✓ Aumenta r/d , aumenta pressão no fundo, reduz downpull!!!!
- ✓ Grandes r/d causam instabilidades de fluxo e vibrações na comporta
- ✓ Limite prático $r/d < 0,5$.

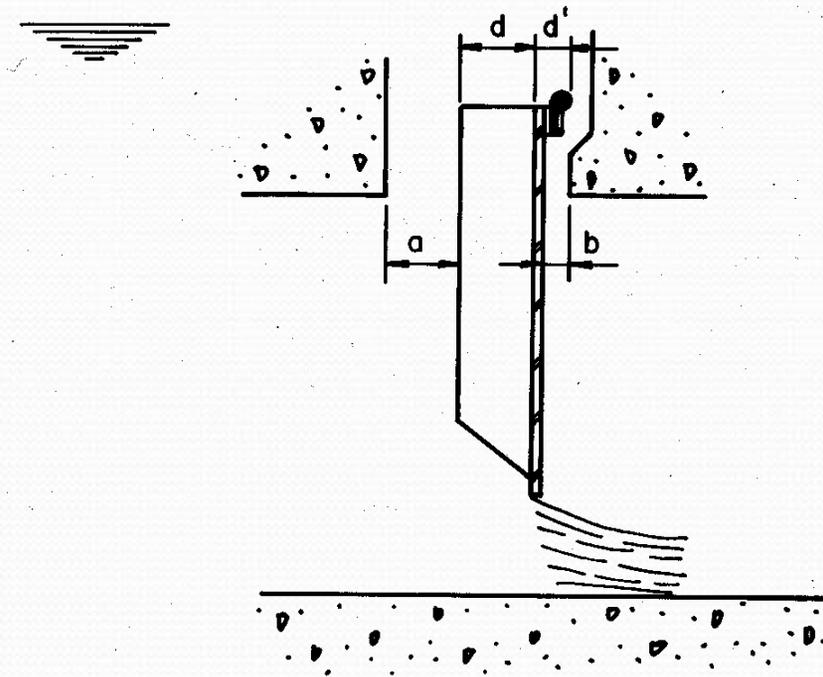
Forma do perfil inferior

2.3- COMPORTA COM FUNDO INCLINADO



- ✓ Downpull decresce com o aumento do ângulo θ !!!!
- ✓ $\theta < 45^\circ$, por dificuldades estruturais!!!!

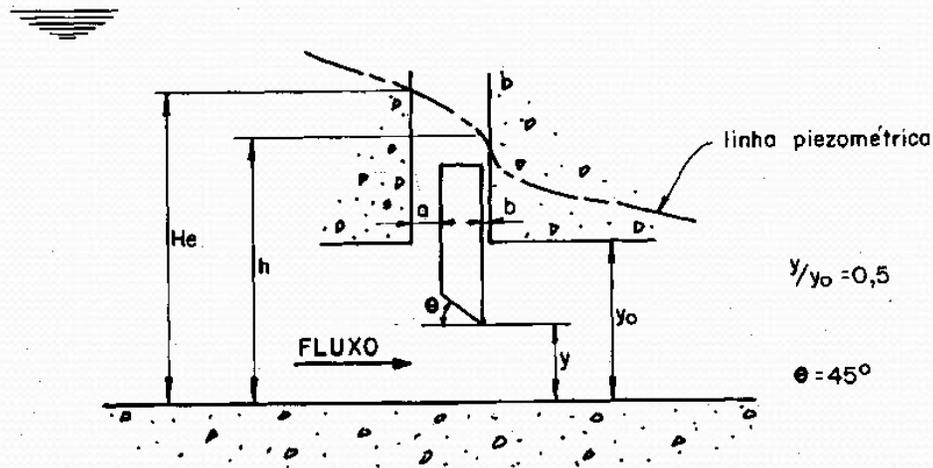
2.4- PROJEÇÃO DA VEDAÇÃO SUPERIOR



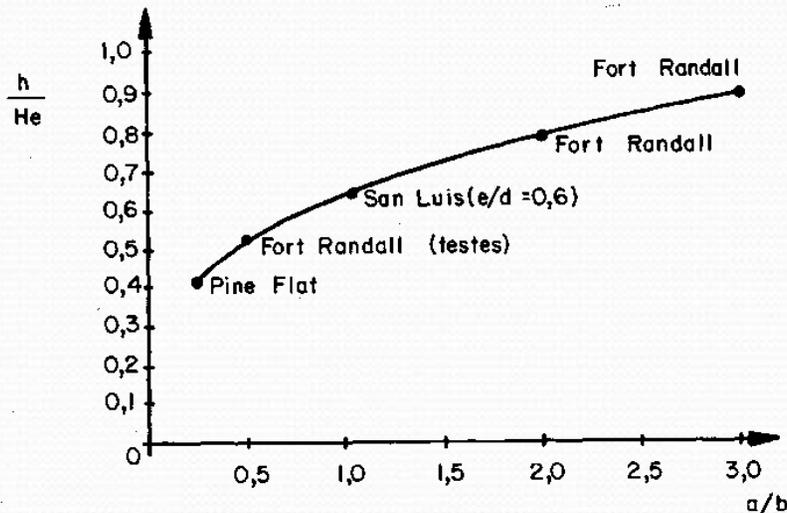
- ✓ Downpull aumenta com o aumento de d'/d ;
- ✓ d' é a soma das espessuras do paramento e da vedação superior e sua base!!!!

Folgas entre a comporta e os frontais

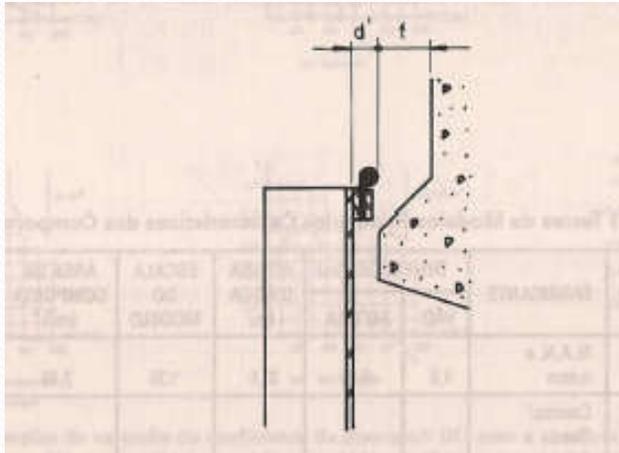
2.5- INFLUÊNCIA DE a/b NO NÍVEL D'ÁGUA DENTRO DO POÇO



- ✓ Downpull é uma relação inversa de a/b !!!!
- ✓ Gráfico anexo!!!!



2.6- Recesso na parede vertical de jusante



✓ Recesso na parede vertical gera um balanceamento de pressões acima e abaixo da vedação superior, reduzindo o downpull!!!!

✓ $f \geq 3d'$!!!!!!!



3- MÉTODOS DE CÁLCULO DAS FORÇAS HIDRODINÂMICAS

$$D_p = \gamma.K.A.H$$

Onde : γ = peso específico da água em kN/m^2

K = coeficiente de downpull

A = área da projeção horizontal da comporta
em m^2

H = carga referida à base da comporta
(m.c.a)

Características das comportas

TABELA 8.1 Testes de Modelos Reduzidos. Características das Comportas

OBRA	FUNÇÃO	FABRICANTE	DIMENSÕES (m)		ALTURA D'ÁGUA (m)	ESCALA DO MODELO	ÁREA DA COMPORTA (m ²) *	$\frac{D_p \text{ máx.}}{P_c}$ **
			VÃO	ALTURA				
Fumas	Tomada d'Água	M.A.N. e outros	4,6	9,65	33,5	1:20	3,48	1,8
Estreito	Tomada d'Água	Coemsa/ Riva Calzoni	6,55	10,63	19,5	1:25	4,93	1,82
Itumbiara	Desvio	BSI	5,0	7,86	25,75	1:20	6,3	1,24
Itumbiara	Tomada d'Água	Krupp (Brasil)	7,3	11,84	58,1	1:30	10,57	1,76
São Simão	Tomada d'Água	Voith (Brasil)	6,5	11,3	43,8	1:25	6,48	2,39
Marimbondo	Tomada d'Água	Sorefame	6,6	11,44	38,36	1:30	7,35	2,55

* área da seção horizontal da comporta

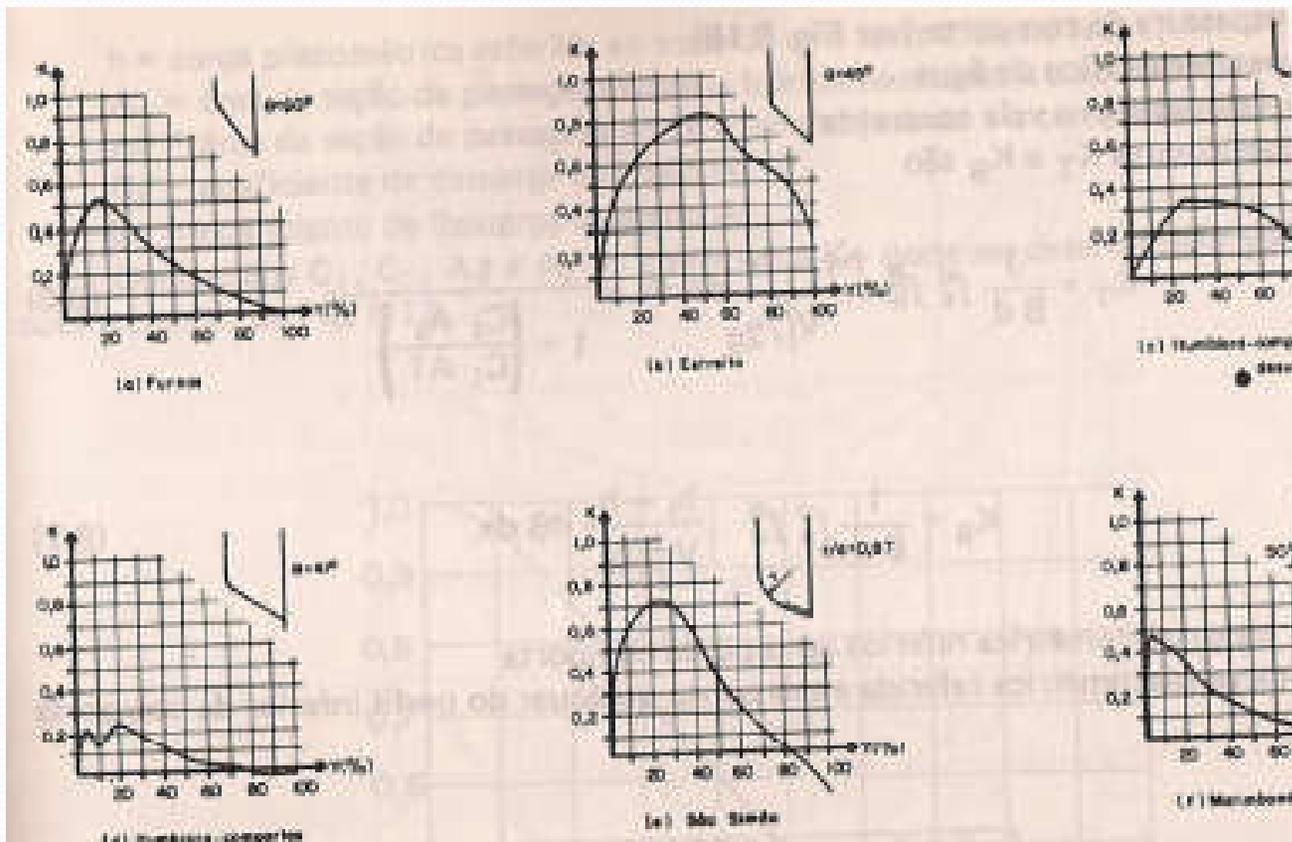
** relação entre o *downpull* máximo e o peso da comporta



Condições dos testes para a determinação do coeficiente K de downpull (gráficos anexos)

- ✓ Comporta tipo vagão, paramento e vedação a jusante;
- ✓ Nível máximo de operação;
- ✓ Furnas e Estreito, método direto estático;
- ✓ Outros, método direto dinâmico;
- ✓ Valores negativos do K representam forças de up lift;
- ✓ Forças de downpull $15 \leq Y \leq 50\%$;
- ✓ Máximos valores de K, $0,25 \leq K \leq 0,83$;
- ✓ Existe grande divergência dos resultados!!!!
- ✓ Necessidade de ensaios em modelos reduzidos!!!!

Gráficos da variação do coeficiente de downpull (K) com a abertura da comporta (Y)





Naudascher, Kobus e Rao, “ Hydrodynamic Analysis for high head gates” : Método analítico baseado nas forças hidrodinâmicas.

- ✓ Parâmetros geométricos da comporta;
- ✓ Velocidade do fluxo na veia contraída.
- ✓ Principal componente da força hidrodinâmica resulta da diferença de distribuição de carga piezométrica entre o topo e a parte inferior da comporta, equação (1), abaixo:

$$P_1 = (K_T - K_B).B.d.\gamma.\frac{v_j^2}{2.g} \quad \text{.....(1)}$$



- ✓ K_T = coeficiente de forma do topo da comporta;
- ✓ K_B = coeficiente de forma do perfil inferior da comporta;
- ✓ B = largura total da comporta;
- ✓ D = espessura da comporta;
- ✓ γ = peso específico da água;
- ✓ V_j = velocidade na veia contraída.

$$K_T = \frac{1}{B \cdot d} \int_0^d \int_0^B \frac{h_T - h}{\frac{v_j^2}{2 \cdot g}} dB dx = \frac{1}{1 + \left(\frac{C_2 A_2}{C_1 A_1}\right)^2}$$

$$K_B = \frac{1}{B \cdot d} \int_0^d \int_0^B \frac{h_j - h}{\frac{v_j^2}{2 \cdot g}} dB dx$$



h_T = carga piezométrica referida ao topo da comporta;

h_i = carga piezométrica referida a um ponto qualquer do perfil inferior da comporta;

h = carga piezométrica referida ao topo da veia contraída do jato;

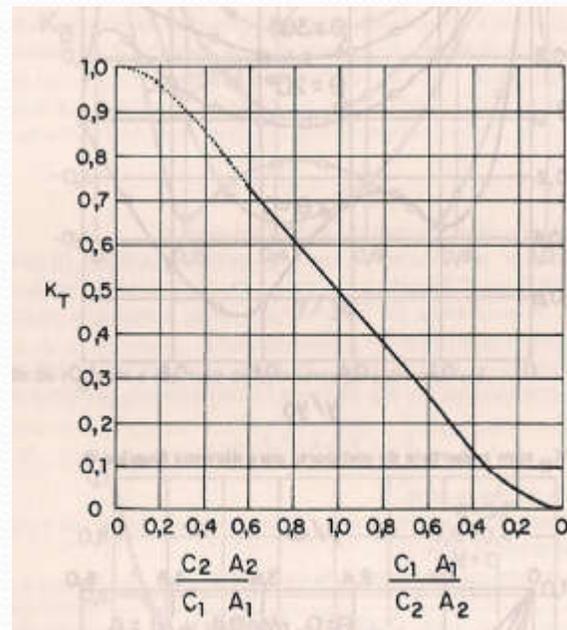
A_1 = área da seção de passagem entre o frontal montante e a comporta;

A_2 = área da seção de passagem entre o frontal jusante e a comporta;

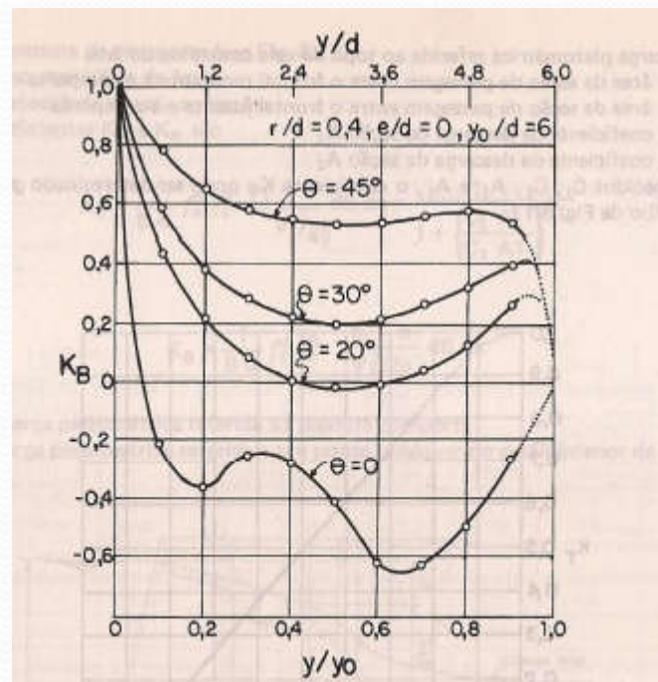
C_1 = coeficiente de descarga da seção A_1 ;

C_2 = coeficiente de descarga da seção A_2 .

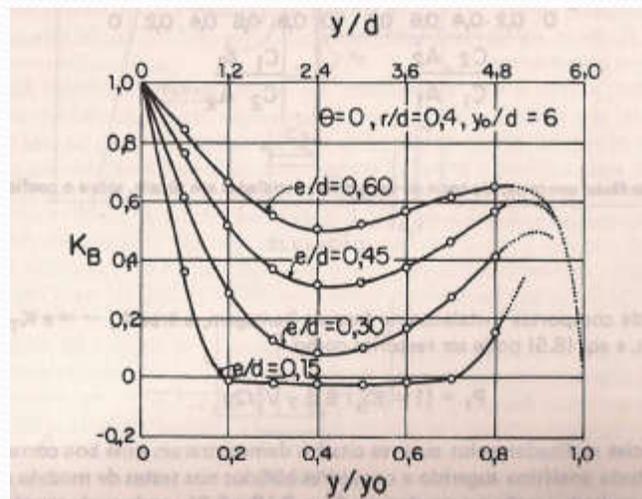
3.1- Efeito do fluxo em torno do topo de comportas instaladas em túneis, sobre o coeficiente K_T



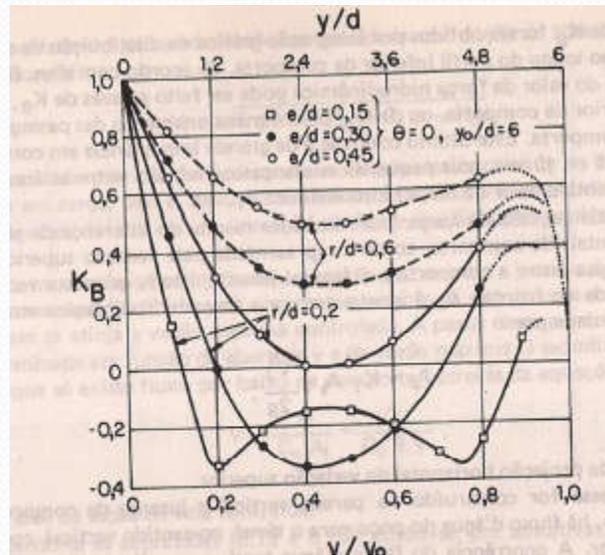
3.2- Variação de K_B com a abertura da comporta para diversos ângulos θ



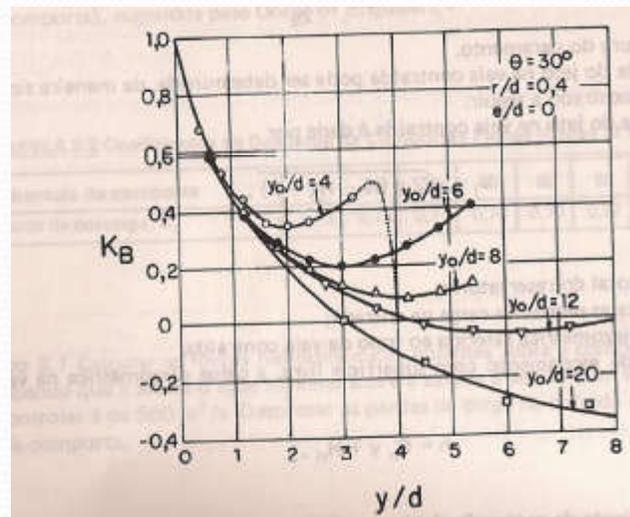
3.3- Variação de H_B com a abertura da comporta para diversos e/d



3.4- Variação de K_B com a abertura da comporta para diversos r/d



3.5- Variação de K_B com a abertura da comporta para diversos y_0/d



- 
- ✓ Dados de K_B foram obtidos por integração gráfica da carga piezométrica medida ao longo do perfil inferior da comporta;
 - ✓ Controle da força hidrodinâmica:
 - ✓ K_B através do perfil inferior da comporta;
 - ✓ K_T pelo dimensionamento das passagens em torno do topo da comporta.
 - ✓ K_T é importante em comportas instaladas em poços ou tuneis, pois pequenas mudanças nas áreas A_1 e A_2 afetam sensivelmente o valor da força hidrodinâmica P_1 .

- 
- ✓ Força hidrodinâmica P_2 resulta da diferença de pressões nas projeções horizontais da comporta, como a representada pela vedação superior.
 - ✓ Quando a vedação superior está encostada no frontal, A_2 é igual a zero, e a força hidrodinâmica atuante é:

$$P_2 = K_T A_S \gamma \frac{v_j^2}{2g}$$

Onde A_S é a área da projeção horizontal da vedação superior.



Se um recesso for construído na parede vertical a jusante da comporta, temos $A_2 \neq 0$. Há fluxo do poço para o túnel, no sentido vertical, contornando a vedação superior. Há então equalização das pressões acima e abaixo da vedação superior, eliminado assim a força P_2 !!!!

Comportas com extensão no paramento, existe uma força P_3 :

$$P_3 = K_T B d' \gamma \frac{v_j^2}{2g}$$

d' é a espessura do paramento



Velocidade do jato na veia contraída é:

$$v_j = \sqrt{2g(H - H_e - h)}$$

Onde :

H=carga total do reservatório;

H_e= perdas de carga na entrada;

h= carga piezométrica referida ao topo da veia líquida;



Em regime de escoamento com superfície livre, a carga piezométrica na veia contraída é:

$$h = C_c \cdot y + H_d$$

C_c = coeficiente de contração da lâmina d'água;

y = abertura da comporta;

H_d = depressão formada a jusante da comporta;

$$v_j = \sqrt{2 \cdot g \cdot (H - H_e - C_c \cdot y - H_d)}$$



Instalação tem uma seção de controle de vazão a jusante da comporta (turbina), o fluxo através da comporta aumenta de acordo com a abertura da comporta até que se atinja a vazão máxima controlada!!!!

A partir desse ponto a velocidade do jato é determinada em função da abertura y e da vazão máxima Q !!!!

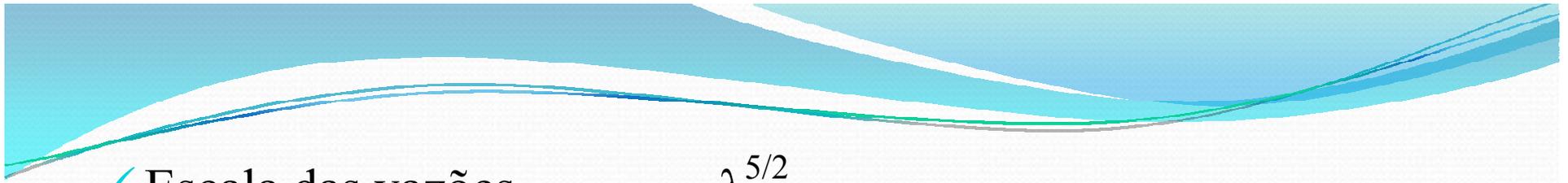
$$v_j = \frac{Q}{C_c \cdot A_j} = \frac{Q}{C_c \cdot B \cdot y}$$

C_c pode ser obtido do Corps of Engineeres, no qual os valores variam desde 0,73 (10% de abertura da comporta até 0,80 (90%)!!!!

4- TESTES EM MODELO REDUZIDO

De acordo com a semelhança de Froude as relações entre o protótipo e o modelo obedecem as seguintes escalas:

- ✓ Escala geométrica λ
- ✓ Escala das velocidades $\lambda^{1/2}$
- ✓ Escala dos tempos $\lambda^{1/2}$



✓ Escala das vazões

$$\lambda^{5/2}$$

✓ Escala das forças

$$\lambda^3$$

✓ Escala das pressões

$$\lambda$$

✓ Escala das frequências

$$\lambda^{-1/2}$$

✓ Os valores encontrados no modelo serão multiplicados pelas escalas acima para se obterem os correspondentes valores no protótipo!!!!!!!!!!

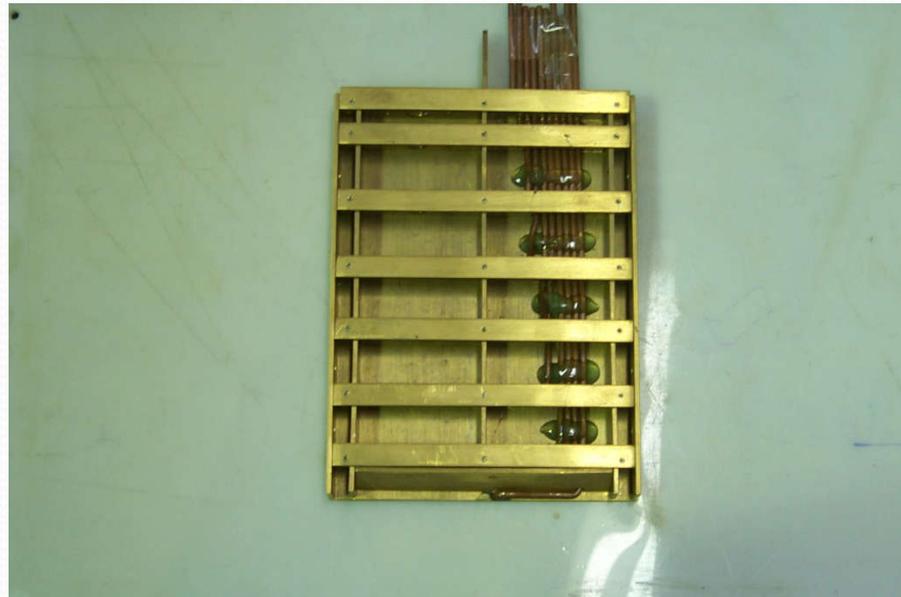
4.1- DESCRIÇÃO DO BANCO DE ENSAIOS



4.1- DESCRIÇÃO DO BANCO DE ENSAIOS (CONTINUAÇÃO) REPRESENTAÇÃO DE JUSANTE DO MODELO



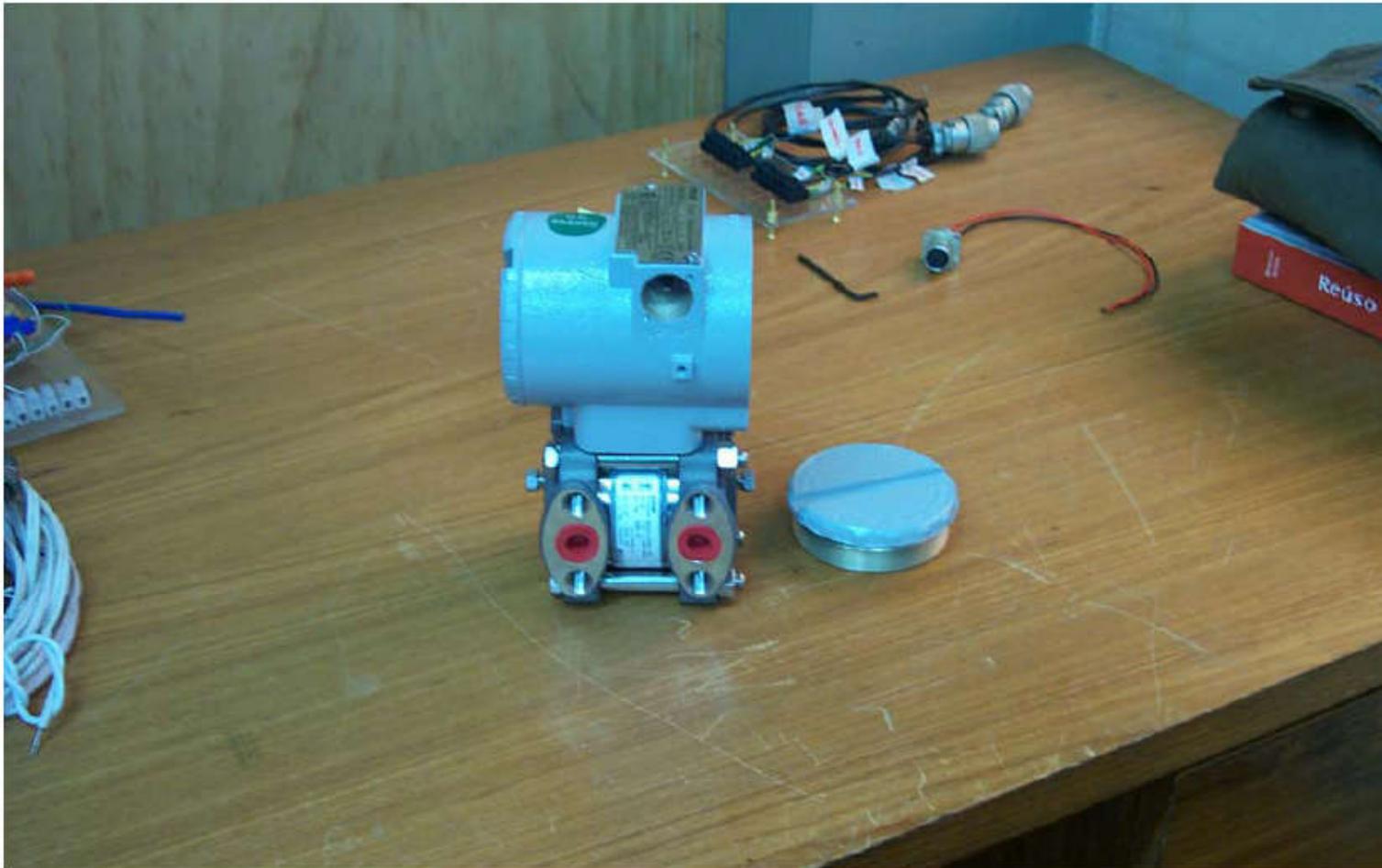
4.1- DESCRIÇÃO DO BANCO DE ENSAIOS (CONTINUAÇÃO) MODELO REDUZIDO DACOMPORTA



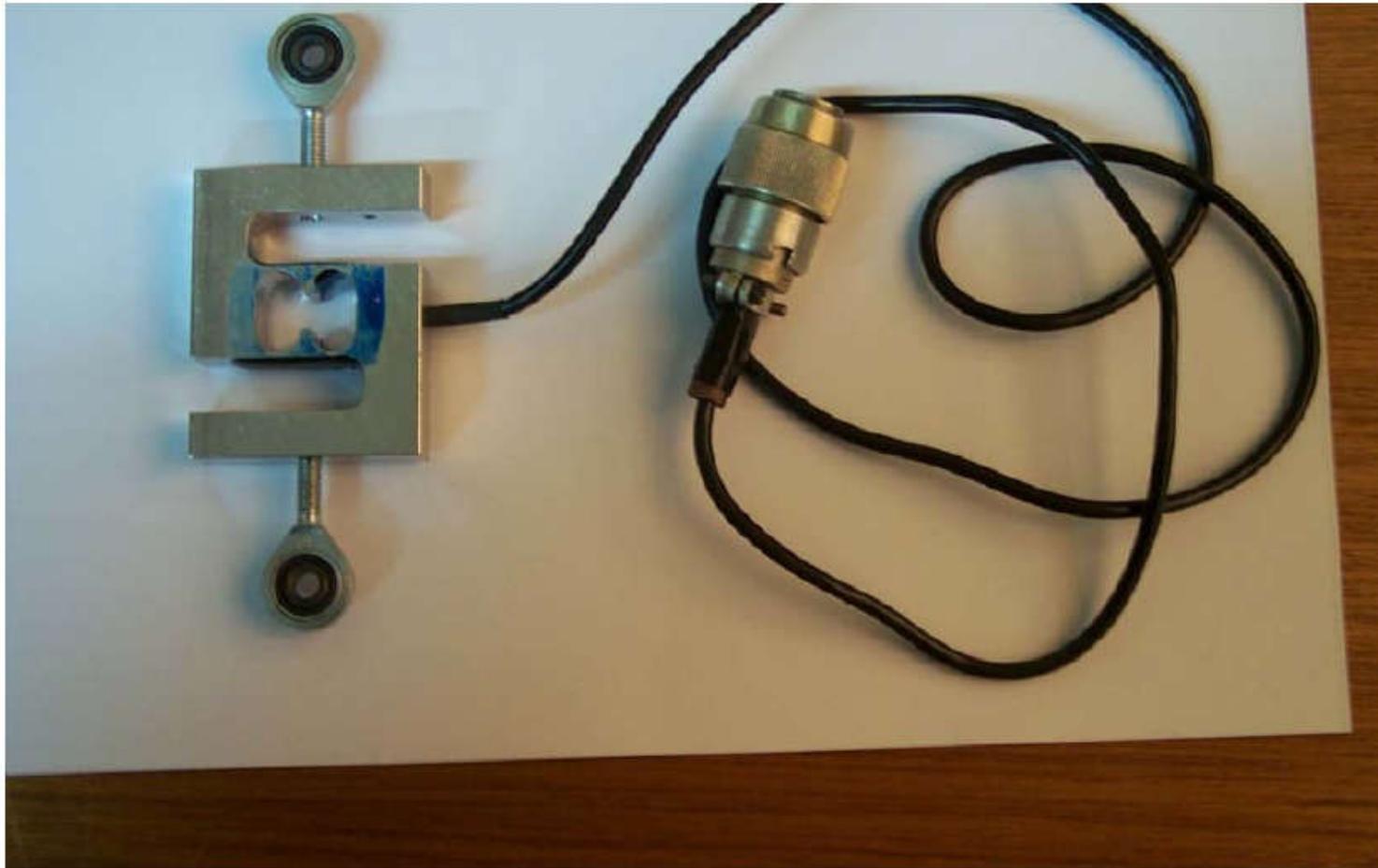
4.2- EQUIPAMENTOS DE MEDIÇÃO

- ✓ Medidor de vazão
- ✓ Piezômetros, para medição de pressões efetivas
- ✓ Transdutor de forças, para a medição das forças de acionamento da comporta;
- ✓ Transdutores de pressão, para medição da flutuação de pressão, de esforços hidráulicos verticais durante o enchimento do conduto e durante o fechamento de emergência;
- ✓ Transdutores diferenciais para a medição de esforços hidráulicos verticais durante o enchimento do conduto e durante o fechamento de emergência;
- ✓ Placa de aquisição de dados

4.2..1- Transdutor diferencial



4.2.2- Transdutor de forças



4.2.3- Sistema óleo dinâmico para acionamento da comporta



4.2.4- Vista geral do banco de ensaios



4.2.5- Vista geral da tubulação de jusante da comporta



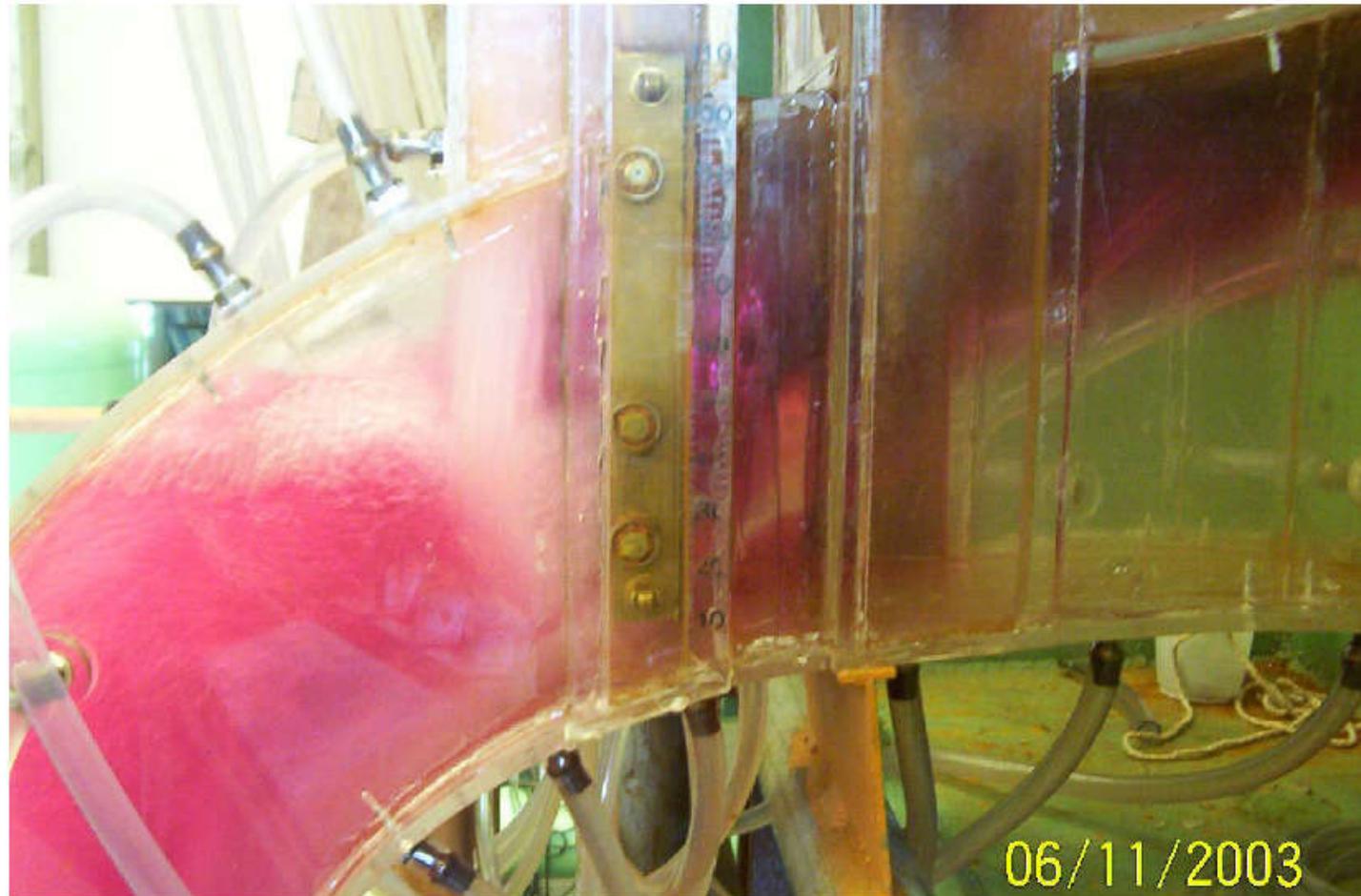
4.2.6- Sistema pneumático para acionamento da comporta



4.2.7- Detalhes do sistema pneumático



4.2.9- Método direto estático com abertura da comporta = 10%



4.2.9- Ensaio com método direto estático abertura 40%



4.2.8- Ensaio com o método direto estático abertura da comporta =40%

