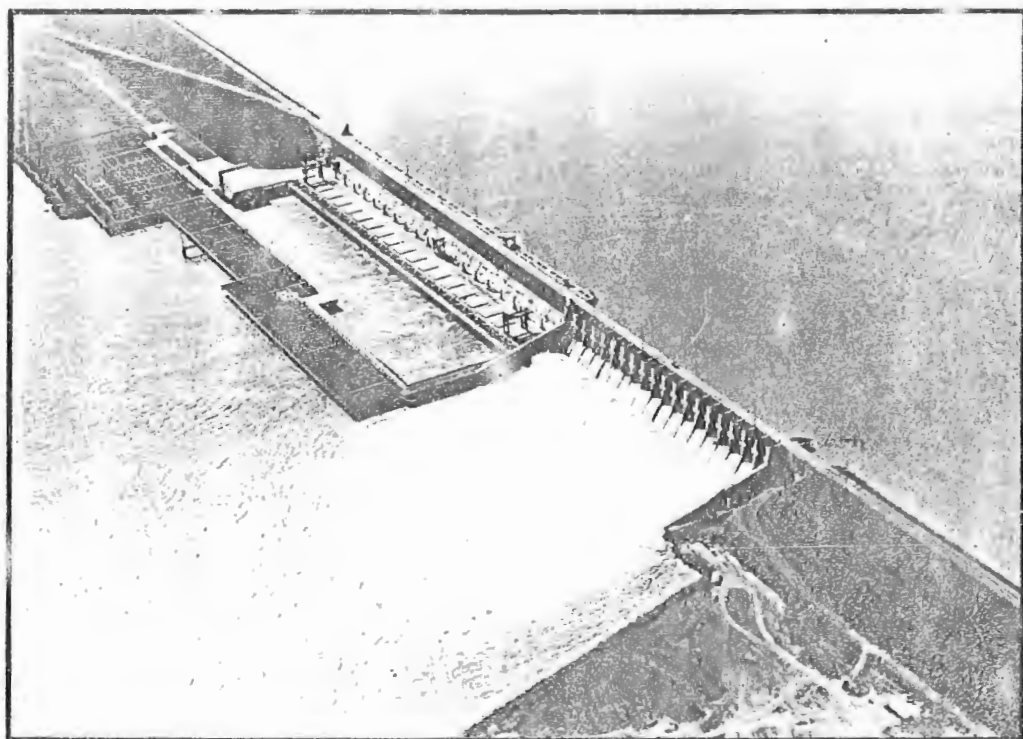


IV SIMPÓSIO DE ENGENHARIA CIVIL DE ILHA SOLTEIRA



**6 A 8 DE OUTUBRO
DE 1993**

ILHA SOLTEIRA -- ESTADO DE SÃO PAULO.

**O coeficiente de Perda de Carga em Dutos Forçados
de Secção Composta.**

Prof. Hans G. Arens
Escola de Engenharia de São Carlos USP

RESUMO

O coeficiente de perda de carga f_c de um duto forçado de secção composta é determinado através de um modelo físico simplificado. Os resultados teóricos são então comparados com os resultados experimentais obtidos através de ensaios de duas secções geométricas formadas por um ou dois dutos circulares inseridos concentricamente numa canalização principal.

Apoio financeiro da FAPESP (Processo 92/3129-6)

Escola de Engenharia de São Carlos - USP
Departamento de Hidráulica e Saneamento
Av. Dr. Carlos Botelho, 1465
13.560 - SÃO CARLOS - SP



NT. 85-4395

1. Introdução.

O grupo de pesquisa do Laboratório de Hidráulica do Departamento de Hidráulica e Saneamento da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo (SHS/EESC/USP), vem realizando diversas pesquisas ligadas ao projeto de um banco de ensaios visando a realização de testes de cavitação em bombas centrífugas.

Uma das características marcantes desse banco é o uso de duas bombas auxiliares para variar o NPSH (Net Positive Suction Head) da unidade de teste. Esta, por sua vez, é conectada ao banco através de uma canalização vertical que atua como uma perda de carga passiva e que deve satisfazer alguns quesitos importantes, entre os quais se destacam:

a- deve ser curta para permitir uma montagem compacta.

b- deve gerar uma perda de carga adicional na sucção da unidade de ensaio, sem criar nenhuma região de velocidades mais elevadas, na qual podem surgir pontos de cavitação externos à máquina, que mascaram o resultado dos testes.

A introdução de estranguladores, diafragmas ou de outros dispositivos para dissipar energia, não é aconselhável, pois esses elementos quase sempre geram regiões de velocidade elevada surgindo então o risco do surgimento de eventuais pontos de cavitação.

Pode-se, entretanto, introduzir na canalização principal, segmentos de canalizações de menor diâmetro (secundários), que formam, em conjunto com o duto externo, uma canalização de secção composta (fig.1).

Como o coeficiente de perda de carga f_c da canalização composta, é maior do que o valor f correspondente à canalização externa, consegue-se ampliar a dissipação de energia e, se as dimensões forem bem escolhidas, as velocidades na região central e na regiões anulares também não se afastarão significativamente do valor médio da canalização principal.

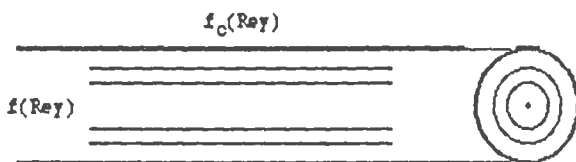


Fig.1.1 Uma secção composta formada por 2 segmentos concêntricos

A figura 1.1 exemplifica uma dessas secções compostas, na sua geometria mais simples, formada por 2 segmentos circulares de espessura desprezível, inseridos de forma concêntrica na canalização principal.

Resolveu-se então levantar experimentalmente as curvas características $f_c(Rey)$ de algumas secções compostas mais simples, comparando-as com as curvas teóricas $f_{cth}(Rey)$ obtidas através de um modelo analítico. O resultado obtido servirá para o dimensionamento criterioso da canalização de acoplamento já mencionada.

2. O modelo físico.

A figura 2.1 mostra um escoamento laminar axi-simétrico, através de uma secção composta formada por uma secção circular e anular, obtida pela inserção de um duto cilíndrico em uma canalização principal.

Se v_0 for a velocidade no centro da canalização, o perfil de velocidade na secção circular obedece a

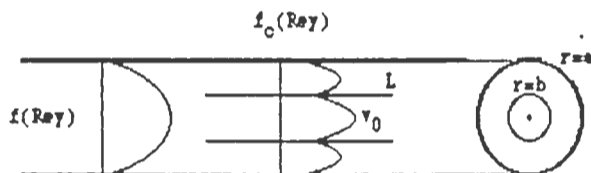


Fig.2.1 Escoamento laminar através de uma secção composta formada por duas secções (circular e anular).

$$v_1 = v_0 \left[1 - \frac{r^2}{b^2} \right] \quad (2.1)$$

e na região anular a

$$v_2 = v_0 \frac{a^2}{b^2} \left[1 - \frac{r^2}{a^2} + k \ln \frac{a}{r} \right] \quad (2.2)$$

onde k é definido por

$$k = \frac{1 - \frac{b^2}{a^2}}{\ln \frac{b}{a}} \quad (2.3)$$

As velocidades médias v_{m1} e v_{m2} assumem então

$$v_{m1} = \frac{v_0}{2} \quad (2.4)$$

$$v_{m2} = v_0 \frac{2}{b^2 \left(1 - \frac{b^2}{a^2} \right)} \left[\frac{x^2}{2} \left(1 - \frac{x^2}{2} + k \left(\frac{1}{2} + \ln \frac{1}{x} \right) \right) \right]_{\frac{b}{a}}^1 \quad (2.5)$$

A equação da continuidade acarreta

$$\frac{v_m}{v_0} = \frac{v_{m1}}{v_0} \frac{b^2}{a^2} + \frac{v_{m2}}{v_0} \left(1 - \frac{b^2}{a^2} \right) \quad (2.6)$$

e lembrando que

$$v_0 = \frac{\Delta p}{L} \frac{b^2}{4\mu} \quad (2.7)$$

e

$$f_c = \frac{\Delta p}{\frac{1}{2} \rho v_{m1}^2 \frac{L}{2a}} \quad (2.8)$$

tem-se que

$$f_c = \frac{32}{\text{Rey} \left(\frac{v_m}{v_0} \right) \left(\frac{b^2}{a^2} \right)} \quad (2.9)$$

As equações (4) (5) (6) e (9) mostram que v_1/v_0 v_2/v_0 e f são funções do parâmetro b/a e como $f=64/\text{Rey}$ segue que

$$\frac{f_c}{f} = \frac{1}{2 \left(\frac{v_m}{v_0} \right) \left(\frac{b^2}{a^2} \right)} \quad (2.10)$$

A figura 2.2 mostra as curvas representativas de f_c/f , v_1/v_m e v_2/v_m em função do parâmetro b/a . As velocidades $v_{máx1}$ e $v_{máx2}$ também podem ser analisadas através das curvas $v_{máx1}/v_m$ e $v_{máx2}/v_m$.

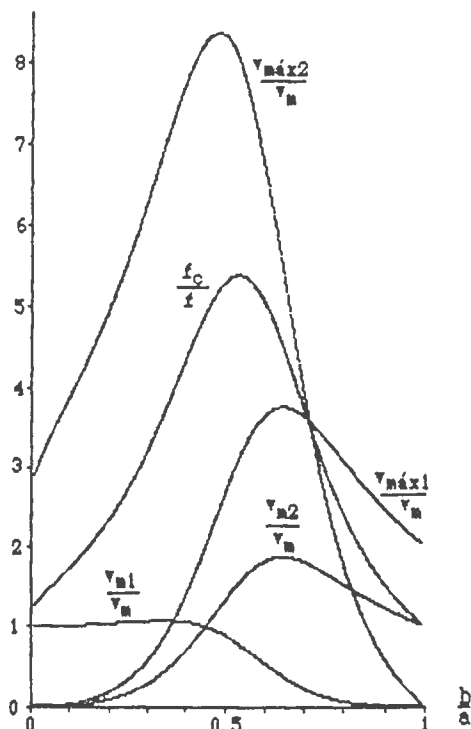


Fig.2.2 Curvas representativas f_c/f v_1/v_m v_2/v_m $v_{máx1}/v_m$ $v_{máx2}/v_m$ em função da razão b/a (escoamento laminar)

Nota-se que a curva f_c/f passa por um máximo no ponto $b/a=0,534$ atingindo o valor $f_c/f=5,391$.

Nesse ponto a velocidade máxima na região anular também é muito elevada, próxima do seu valor máximo $v_{máx2}/v_m=8,436$ que ocorre no ponto $b/a=0,482$.

O mesmo modelo físico pode ser adotado para o escoamento turbulento (fig.2.3) e dessa forma as equações das perdas no trecho composto se transformam em

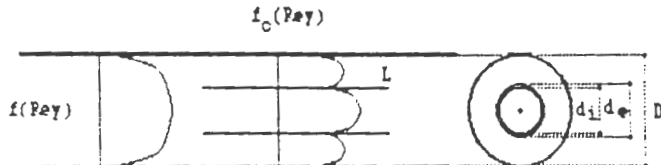


Fig. 2.3 Escoamento turbulento através de uma seção composta formada por 2 segmentos concêntricos

$$\Delta h = f_1 \frac{v_1^2 L}{2g 4Rh_1} \quad (2.11)$$

$$\Delta h = f_2 \frac{v_2^2 L}{2g 4Rh_2} \quad (2.12)$$

e em conjunto com as expressões de Blasius

$$f_1 = \frac{0,3164}{Rey_1^{0,25}} \quad (2.13)$$

$$f_2 = \frac{0,3164}{Rey_2^{0,25}} \quad (2.14)$$

$$Rey_1 = \frac{v 4Rh_1}{\nu} \quad (2.15)$$

$$Rey_2 = \frac{v 4Rh_2}{\nu} \quad (2.16)$$

e com a equação da continuidade

$$vA = v_1 A_1 + v_2 A_2 \quad (2.17)$$

permitem determinar

$$\frac{v_1}{v} = \frac{1}{\frac{A_1}{A} + \frac{A_2}{A} \left(\frac{Rh_2}{Rh_1} \right)^{\frac{5}{7}}} \quad (2.18)$$

e

$$\frac{v_2}{v} = \frac{1}{\frac{A_2}{A} + \frac{A_1}{A} \left(\frac{Rh_1}{Rh_2} \right)^{\frac{5}{7}}} \quad (2.19)$$

e como

$$f = \frac{\Delta h}{\frac{v^2 L}{2g 4Rh}} \quad (2.20)$$

o

$$Rey = \frac{v 4Rh}{\nu} \quad (2.21)$$

que se transforma finalmente em

segue que

$$f_c = \frac{0,3164}{Re_y} \left(\frac{v_1}{v} \right)^{1/4} \left(\frac{Rh_1}{Rh} \right)^{1/4} \quad (2.22)$$

$$\frac{f_c}{f} = \frac{\frac{v_1}{v}}{\frac{Rh_1}{Rh}} \quad (2.23)$$

As curvas representativas v_1/v , v_2/v e f_c/f dependem de A_1/A , A_2/A , Rh_1/Rh_2 e Rh_1/Rh que por sua vez dependem apenas dos parâmetros geométricos d/D e e/D , onde $d = d_1$ e $e = d_2 - d_1$.

Mostra-se que $\frac{A_1}{A} = \frac{d^2}{D^2}$ (2.24)

$$\frac{A_2}{A} = 1 - \frac{d^2}{D^2} \left(1 + \frac{2 \frac{e}{D}}{\frac{d}{D}} \right) \quad (2.25)$$

$$\frac{Rh_1}{Rh} = \frac{d}{D} \quad (2.26)$$

$$\frac{Rh_2}{Rh} = \frac{1 - \frac{d^2}{D^2} \left(1 + \frac{2 \frac{e}{D}}{\frac{d}{D}} \right)}{1 + \frac{d}{D} + \frac{e}{D}} \quad (2.27)$$

expressões que permitem o traçado das curvas da figura 2.4.

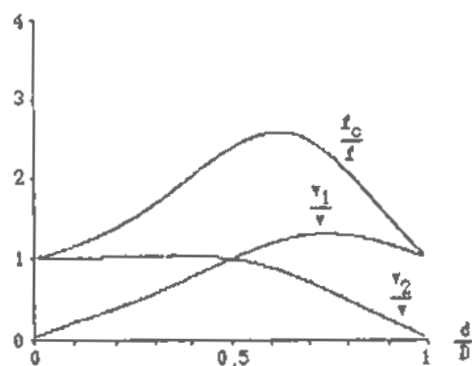


Fig. 2.4 Curvas representativas f_c/f , v_1/v e v_2/v em função de d/D ($e=0$)

Nota-se que, para uma espessura nula ($e=0$), a curva f_c/f admite um máximo no ponto $d/D=0,52$ onde $f_c/f=2,581$ sem causar uma mudança significativa no valor das velocidades.

Para valores crescentes de e/D , a razão f_c/f aumenta consideravelmente sem, a princípio, alterar de forma marcante as velocidades no núcleo e na região anular (fig.2.5).

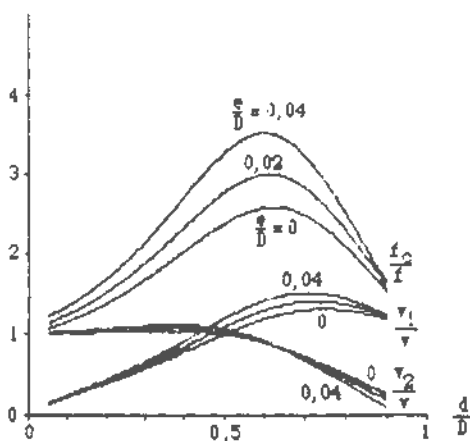


Fig.2.5 Curvas representativas f_c/f v_1/v e v_2/v em função de d/D (espessuras $e/D=0$ 0,02 e 0,04)

O modelo adotado pode ser facilmente estendido para um número maior de canalizações secundárias. A figura 2.5 mostra as curvas características de uma seção composta constituída por uma seção circular e duas seções anulares, obtidas com duas canalizações secundárias.

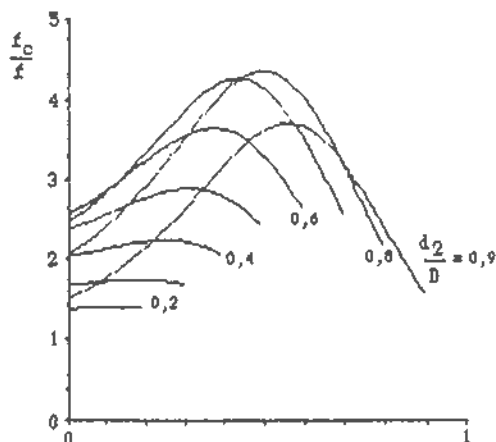


Fig.2.6 Curvas representativas f_c/f em função de d_1/D e d_2/D ($e=0$)

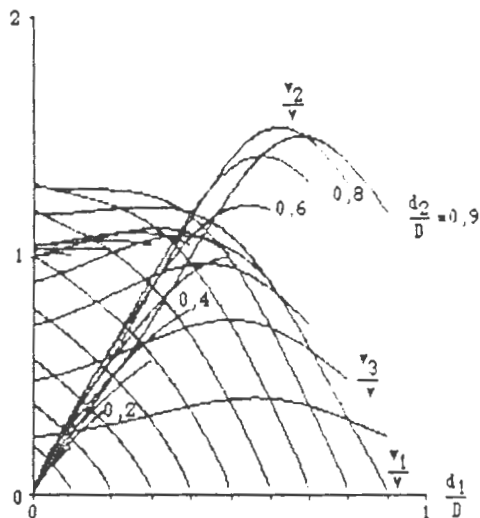


Fig 2.7 Curvas v_1/v , v_2/v e v_3/v em função de d_1/D e d_2/D ($e=0$)

3. Os primeiros resultados experimentais.

A figura 3.1 mostra o esquema do banco de ensaios utilizado. O coeficiente de perdas da canalização principal obedece a

$$f = \frac{\Delta h}{\frac{v^2}{2g} \frac{L}{D}} \quad (3.1)$$

e dessa forma pode ser calculado através das leituras piezométricas h_1 , h_2 e da vazão q ($v=q/A$), pela expressão

$$f = \frac{h_1 - h_2}{\frac{v^2}{2g} \frac{L_{12}}{D}} \quad (3.2)$$

O coeficiente f_c , por sua vez, é calculado por

$$f_c = \frac{h_3 - h_4}{\frac{v^2}{2g} \frac{L_{34}}{D}} \quad (3.3)$$

e o número de Reynolds por

$$Rey = \frac{v 4 R_h}{\nu} \quad (3.4)$$

No regime turbulento o perfil de velocidade segue

$$\frac{v}{v_{\max}} = \left(1 - \frac{r}{R}\right)^{\frac{1}{n}} \quad (3.5)$$

onde n depende do número de Rey .

Mostra-se que a velocidade média correspondente a esse perfil segue

$$\frac{v_m}{v_{\max}} = \frac{2n^2}{(n+1)(2n+1)} \quad (3.6)$$

e dessa forma a velocidade média na saída da seção composta pode ser estimada através da leitura da pressão total no tubo de Pitot, através da resolução do sistema

$$\frac{v_m}{\sqrt{2gh_{\text{pitot}}}} = \frac{2n^2}{(n+1)(2n+1)} \quad (3.7)$$

$$\text{Rey} = \frac{v_m 4Rh}{\nu} \quad (3.8)$$

$$n = F(\text{Rey}) \quad (3.9)$$

onde a função $n(\text{Rey})$ pode ser avaliada pelos dados indicados na bibliografia. Na presente pesquisa adotou-se $n=\text{cte}=7$ o que resulta em $v_m/v_{\max}=0,867$.

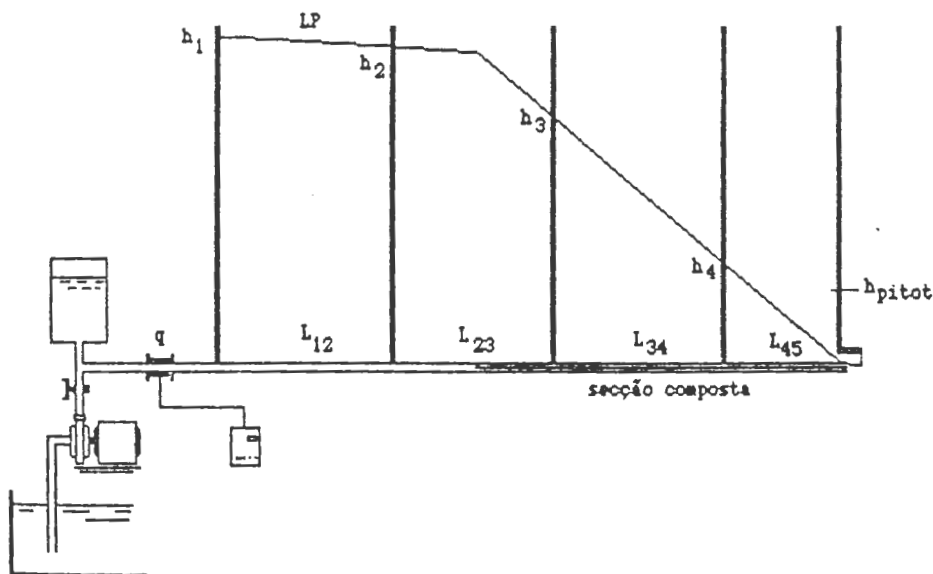


Fig.3.1 Esquema do banco de ensaios

O confronto entre os primeiros resultados experimentais obtidos com os valores correspondentes previstos pelo modelo físico é mostrado nas figuras 3.2 e 3.3 através das curvas v_1/v_{1th} , v_2/v_{2th} e f_c/f_{cth} em função do número de Reynolds.

Nota-se que os desvios se situam entre 18% e -2% nos ensaios realizados com um duto centrado e entre 11% e -5% nos ensaios com 2 dutos centrados. A dispersão é muito pequena e dessa forma as curvas podem ser associadas a retas que mostram que os parâmetros medidos independem de Rey.

Os primeiros resultados são realmente muito animadores e mostram que o modelo físico adotado pode ser ajustado aos valores experimentais sem grandes dificuldades. É claro que esse ajuste necessita de um número maior de ensaios.

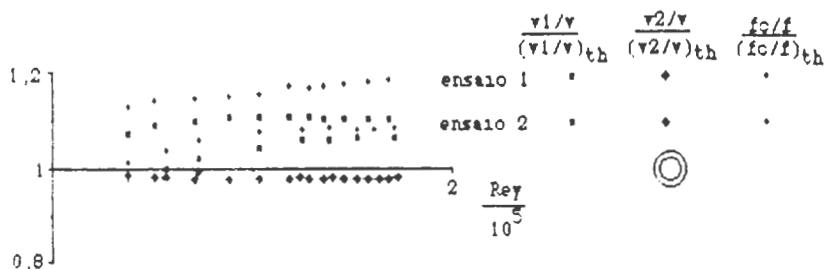


fig 3.2 Os resultados experimentais de dois ensaios (1 duto centrado)
 ensaio 1: D=50,3mm dli=21,6mm dle=25,3mm
 ensaio 2: D=50,3mm dli=27,3mm dle=32,5mm

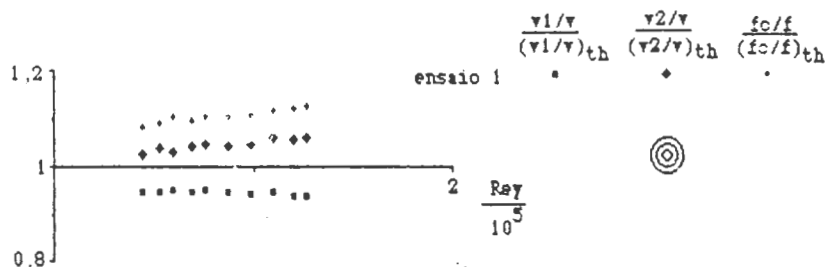


fig 3.3 Os resultados experimentais de um ensaio (2 dutos centrados)
 ensaio 1: D=50,3mm dli=21,6mm dle=25,3mm d2i=37,1mm ; d2e=40,2mm

4. Bibliografia.

- Daily J.W., Harleman D.R.F. Fluid Dynamics, Addison Wesley Publishing Comp., USA.
- Schlichting H. Grenzschicht Theorie, Verlag G.Braun, Karlsruhe, 1982
- Venit S.M., Schleifers S.M. Programming in True Basic, West Publishing Company St.Paul, 1992.
- Wolfram S. Mathematica, Second Edition, Addison Wesley Publishing Company, 1992