

ARENS, H. G. A determinação do coeficiente de perda de carga em um escoamento não permanente.

In: Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 8, Foz do Iguaçu, 1989. **Anais.** São Paulo, ABRH, 1989. P. 285-291.

A DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE DE PERDA DE CARGA
EM UM ESCOAMENTO NÃO PERMANENTE

POR

Hans George Arens¹ e Teófilo Carlos do Nascimento Monteiro²

RESUMO -- Um escoamento não permanente é obtido pela descarga de um reservatório a nível variável; o coeficiente de perda de carga do escoamento na canalização de saída, é colocado em função do número de aceleração, considerando-se apenas a fase acelerada.

INTRODUÇÃO

O uso dos modernos métodos numéricos, na solução dos sistemas de equações diferenciais que tratam dos escoamentos não permanentes, permite que o coeficiente de perda de carga f em regime não permanente, seja definido por uma função mais geral $f = f(f_s, \alpha)$, onde f_s é o coeficiente de perda de carga em regime permanente e α o número de aceleração.

Daily et al. (1956) e Carstens e Roller (1959) admitiram a proporcionalidade entre o desvio $(f - f_s)$, sofrido pelo coeficiente de perda de carga f em relação ao seu valor f_s em condições permanentes, e o número de aceleração, obtendo

$$f - f_s = c \alpha \quad c = \text{cte} \quad (1)$$

onde α é definido por $\alpha = (2d/v^2) \cdot dv/dt$, sendo c uma constante a ser determinada experimentalmente.

A expressão (1), colocada sob a forma

$$\frac{f}{f_s} = 1 + c \cdot \frac{\alpha}{f_s} \quad (2)$$

mostra que a proporcionalidade entre o desvio $(f - f_s)$ e o número de aceleração α , implica em admitir o comportamento linear entre as variáveis f/f_s e α/f_s , tendo c como parâmetro.

Muitos foram os pesquisadores que se preocuparam em determinar a constante c , principalmente para trechos retilíneos de canalização, usando diferentes escoamentos. Destacam-se os escoamentos incompressíveis unidirecionais, os escoamentos oscilatórios e os pulsantes, tanto laminares como turbulentos.

A comparação entre os resultados obtidos por estes pesquisadores, mostram que os valores experimentais de c são muito dispersos, e até conflitantes entre si, fato que motiva a continuidade das pesquisas sobre o assunto em questão.

¹ Professor Doutor do Departamento de Hidráulica e Saneamento da Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo

² Engenheiro da Fundação Osvaldo Cruz - Rio de Janeiro

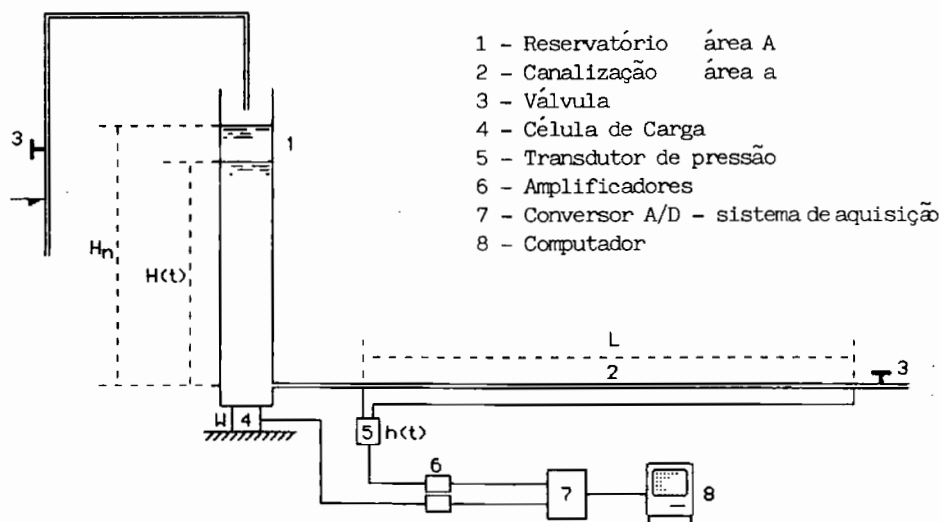
Daily et al. (1956) obteve $c^+ = 0,01$ para escoamentos acelerados ($dv/dt > 0$) e $c^- = 0,62$ para escoamentos em desaceleração ($dv/dt < 0$). Hirose e Oka (1969) obtiveram $c^+ = -0,23$ e $c^- = -0,137$ e recentemente (1986), Kurokawa e Morikawa (1986) mostraram que $c^+ = -0,27$ e $c^- = -0,22$.

A presente pesquisa, bem como outras já em andamento no Laboratório de Hidráulica do Departamento de Hidráulica e Saneamento da Escola de Engenharia de São Carlos - USP (SHS-EESC-USP), trata basicamente da determinação do coeficiente c para escoamentos incompressíveis unidimensionais, em trechos retilíneos de canalizações, e o seu confronto com os valores obtidos por outros pesquisadores.

A princípio tratou-se apenas dos escoamentos na fase de aceleração ($dv/dt > 0$), caracterizados pela constante c^+ , deixando os escoamentos em desaceleração para outra fase.

O MODELO FÍSICO

O equipamento usado nesta pesquisa consistiu de um tubo vertical (PVC/d = 76 mm/L = 5 m) atuando como reservatório de água, e de uma canalização de saída (PVC/d = 26,4 mm/L = 12 m), provida de uma válvula de esfera, como mostra a Figura 1.



"Figura 1. Esquema do Reservatório e da Canalização de Descarga"

Este equipamento permite gerar um escoamento não permanente, quando se faz a descarga do reservatório a nível variável, e possibilita que a velocidade e a aceleração do escoamento na canalização de descarga, sejam avaliadas com certa simplicidade, medindo-se a taxa de variação sofrida pelo peso do reservatório carregado.

A alimentação do reservatório, feita através de uma canalização auxiliar, em montagem coaxial com o tubo vertical, foi controlada por um registro adequado. Um outro registro do tipo guilhotina permitia um eventual corte brusco na alimentação.

O escoamento permanente, obtido com a válvula aberta e a alimentação liga-

da, foi escolhido para caracterizar as condições nominais $H = H_n$ e $v = v_n$. O ensaio preliminar nestas condições, mostrou que o coeficiente de perda de carga da canalização, em regime permanente (f_s), obedece muito bem a formulação proposta por Blasius, $f_s = 0,3164/Re^{0,25}$.

O interesse recaiu particularmente sobre dois escoamentos:

1. Descarga do reservatório através da abertura da válvula esférica (alimentação desligada).

Neste caso as condições iniciais foram definidas pelo nível inicial $H = H_n$ e pela velocidade nula $v = 0$. O escoamento se inicia com a abertura da válvula (brusca ou gradativa), caracterizando-se por uma fase de aceleração seguida por outra de desaceleração.

2. Descarga do reservatório a partir das condições permanentes H_n e v_n .

Este escoamento, obtido pelo corte brusco da vazão de alimentação, a partir das condições nominais, gera um escoamento em desaceleração, e será usado em uma fase posterior, para a determinação da constante c .

O MODELO ANALÍTICO

A diferença de pressão $h(t)$, em metros de coluna de água, que se estabelece em cada instante entre as seções 1 e 2 na canalização de saída, durante a descarga do reservatório, pode ser expressa por

$$h = f \cdot \frac{v^2}{2g} \cdot \frac{L}{d} + \frac{L}{g} \cdot \frac{dv}{dt} \quad (3)$$

onde f é o coeficiente de perda de carga em regime não permanente. Neste instante, caso o regime fosse permanente, f assumiria o valor f_s , com

$$f_s = \frac{64}{Re} \quad (\text{escoamento laminar}) \quad (4)$$

$$f_s = \frac{0,3164}{Re^{0,25}} \quad (\text{escoamento turbulento}) \quad (5)$$

O registro de $v(t)$ e $h(t)$, permite então em cada instante, determinar os coeficientes de perda f e f_s , bem como o número de aceleração α , e obter a correspondência entre f/f_s e α/f_s .

A curva $f/f_s \times \alpha/f_s$ permite finalmente a determinação da constante c , fazendo-se sua comparação com a reta

$$\frac{f}{f_s} = 1 + c \cdot \frac{\alpha}{f_s}$$

proposta por Daily et al. (1956) e Carstens et al. (1959).

O PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

A parte experimental consistiu basicamente, no registro em cada instante, da diferença de pressão $h(t)$ entre duas seções de ensaio predeterminadas na canalização, e do peso $W(t)$ do reservatório durante a sua descarga.

A determinação das grandezas $h(t)$ e $W(t)$, foi realizada fazendo-se uso de

um transdutor de pressão diferencial (indutivo), instalado entre as duas seções de ensaio, e de uma célula de carga (resistiva), colocada sob o reservatório.

A descarga em peso na canalização, segue a expressão

$$v \cdot a \cdot \gamma = \frac{-dW}{dt} = -\gamma A_c \frac{dH}{dt}$$

e os valores da velocidade $v(t)$ e da aceleração dv/dt ficam determinados por

$$v = \frac{-A}{a} \cdot \frac{dH}{dt} \quad (6)$$

$$e \quad \frac{dv}{dt} = \frac{-A}{a} \cdot \frac{d^2H}{dt^2} \quad (7)$$

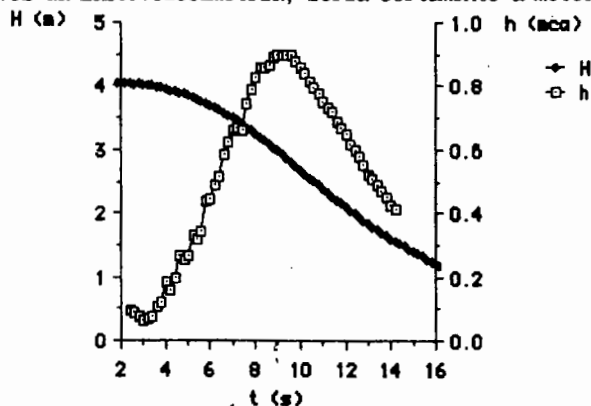
O transdutor de pressão e a célula de carga, foram ligados a um sistema de aquisição de dados (conversor A/D, 12 bits, 16 canais), e este ligado a um computador. Este equipamento, permite o registro de até 256 amostras de cada grandeza, efetuado segundo um intervalo de tempo prefixado.

Nos ensaios realizados, optou-se pelo registro a cada intervalo de 0,1 s, possibilitando o registro h e W durante o período útil de 25,6 s.

OS RESULTADOS EXPERIMENTAIS

A Figura 2 mostra as curvas características do nível d'água no reservatório $H(t)$, e da diferença de pressão $h(t)$ entre duas seções de ensaio ($L=4m$), para uma descarga referente a uma abertura lenta e gradual da válvula esférica.

Uma boa blindagem do sistema de aquisição de dados, possibilitou a obtenção de curvas $H = H(t)$ e $h = h(t)$ livres de oscilações e ruídos indesejáveis. Apesar da boa definição da curva $H = H(t)$, a determinação das derivadas dH/dt e d^2H/dt^2 , necessárias para o cálculo da velocidade e da aceleração do escoamento, introduz erros acentuados que afetam consideravelmente os valores de f/f_s e a/f_s . Dessa forma, a medida direta da velocidade, por meio de medidores eletromagnéticos ou através da Laser velocimetria, seria certamente a metodologia mais indicada.

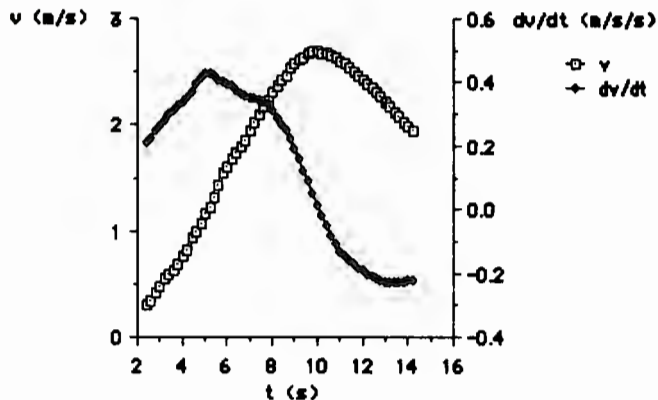


"Figura 2. Curvas Características $H = H(t)$ e $h = h(t)$ referentes a uma Descarga Obtida por uma Abertura Lenta"

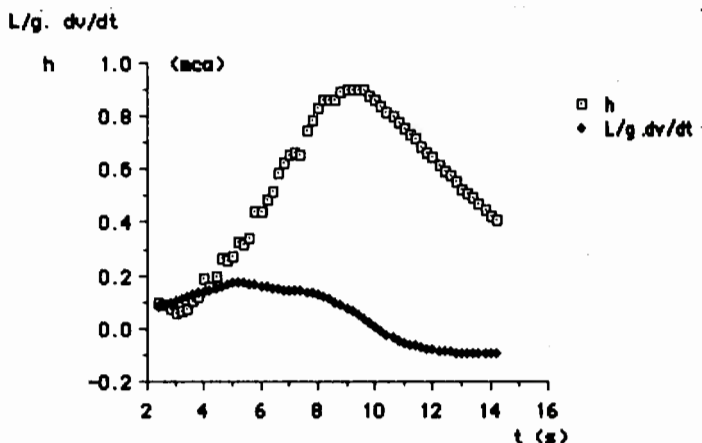
A Figura 3 apresenta as curvas que descrevem a velocidade $v = v(t)$ e a aceleração dv/dt , na canalização de descarga.

A curva $v = v(t)$ foi obtida pela expressão (7) a partir da curva $H = H(t)$, através da derivada em cada ponto, de uma parábola de ajuste. A parábola referente a cada ponto, foi gerada, tomando-se os 6 pontos imediatamente anteriores, e os 6 pontos imediatamente posteriores ao ponto considerado.

A mesma metodologia foi empregada para a determinação da curva da aceleração, calculada a partir da curva $v = v(t)$.



"Figura 3. A Velocidade $v=v(t)$ e a Aceleração dv/dt Obtidas a partir de $H=H(t)$ "

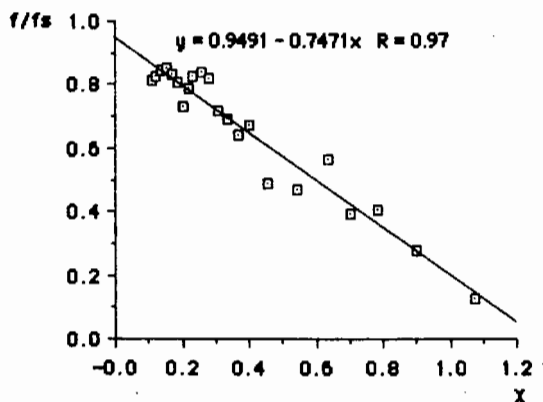


"Figura 4. A Diferença de Pressão $h(t)$ em Comparação com o Valor $L/g \cdot dv/dt$, Causado pela Aceleração"

Os pontos experimentais de f/f_s e α/f_s apresentaram uma grande dispersão, como nas pesquisas de Daily et al. (1956) e Carstens et al. (1959).

A nuvem de pontos, bastante dispersa, evidencia entretanto a clara tendência de gerar valores f/f_s menores do que a unidade, para valores positivos de α/f_s .

A dispersão pode ser atribuída ao inevitável erro experimental, em conjunto com um eventual efeito histórico. Neste caso f/f_s não depende apenas de α/f_s , mas também da forma do perfil de velocidade em cada instante, este último sendo consequência do escoamento em tempos anteriores.



"Figura 5. A Nuvem de Pontos f/f_s e α/f_s "

OBSERVAÇÕES FINAIS

A acentuada dispersão verificada nos valores de f/f_s e α/f_s , impede no momento, uma avaliação realmente precisa do coeficiente c^+ . Entretanto, a regressão linear obtida com os pontos experimentais da Figura 5, fornece preliminarmente para c^+ o valor $-0,74$, diferente do valor $c^+ = -0,23$ obtido por Hirose e Oka, e $c^+ = -0,27$ obtido por Kurokawa e Morikawa (1986).

Todavia, os ensaios evidenciaram que c^+ é de fato negativo ($c^+ < 0$), contrariando os resultados de Daily et al. (1956) e Carstens et al. (1959), que obtiveram respectivamente $c^+ = 0,01$ e $c^+ = 0,449$.

É necessário frisar, que a estimativa de c^+ , feita através da regressão linear (Figura 5), está afetada de um erro experimental bastante acentuado, proveniente principalmente da determinação da 1ª e 2ª derivadas em cada ponto da curva experimental $H = H(t)$, que afetam de maneira sensível, tanto os valores de f/f_s , como também os de α/f_s .

O desenvolvimento de uma melhor metodologia para a determinação da velocidade e da aceleração em cada instante, bem como, o uso de velocidades acima de 1 m/s e acelerações acima de 0,3 m/s², são medidas necessárias para a obtenção de valores mais precisos do coeficiente c^+ .

AGRADECIMENTOS

Os autores tem a satisfação de agradecer a valiosa cooperação do CNPq, em aprovar e financiar a presente pesquisa.

Os agradecimentos também são dirigidos a Kratos Dinamômetros Ltda., pela doação da célula de carga usada na presente pesquisa, que apresentou um ótimo desempenho, e será com certeza, muito útil em pesquisas futuras.

REFERÊNCIAS

- DAILY, J.W., HANKEY, W.L., OLIVE, R.W., JORDAAN, J.M. (1956), "Resistance Coefficients for Accelerated and Decelerated Flows Through Smooth Tubes and Orifices", Transactions, American Society of Mechanical Engineers, 78,5, pp. 1071-1077.
- CARSTENS, M.R. e ROLLER, J.E. (1959), "Boundary-Shear Stress in Unsteady Turbulent Pipe Flow", Journal of the Hydraulics Division, Proc ASCE, 85, HY2, pp. 67-81 - february.
- HIROSE, K. e OKA, T. (1969), "The Friction Factors of Unsteady Pipe Flows", Memoirs of the School of Engineering Okayama University, vol. 4, nº 1, pp. 9-12.
- KUROKAWA, J. e MORIKAWA, M. (1986), "Accelerated and Decelerated Flows in Circular Pipe", Bulletin JSME, vol. 29, nº 249.