

Determinação de Perda de Carga Hidráulica por Circulação de Ar

MANOEL COLLAÇO VERAS (*)

MILTON GONÇALVES SANCHEZ (**)

OTÁVIO DE MATTOS SILVARES (***)

Setor de Planejamento Técnico da Companhia Metropolitana
de Água de São Paulo — COMASP

O presente estudo aborda um método para pré-determinar a perda de carga em uma canalização percorrida por água a partir dos resultados de um ensaio dessa canalização com circulação de ar.

I — APRESENTAÇÃO

As bases teóricas deste método foram propostas em 1941 pelo francês G. Remeniéras e o primeiro ensaio de campo foi levado a efeito em 1948 por P. Bourguignon na galeria da usina hidroelétrica de Pont-Escoffier na França. Os fundamentos teóricos e os resultados do ensaio foram apresentados pelos referidos autores em setembro de 1949 no 3.º Congresso da Associação Internacional de Pesquisas para Obras Hidráulicas, em Grenoble.

Após o primeiro ensaio de P. Bourguignon, a Divisão de Ensaio de Campo da "Électricité de France" aplicou este método a várias galerias adutoras em fase de construção. Entre nós, o Setor de Planejamento Técnico da COMASP — Companhia Metropolitana de Água de São Paulo propôs a aplicação deste tipo de ensaio ao túnel n.º 2 do Sistema Juqueri de abastecimento de água do Grande São Paulo; este túnel liga o Reservatório Intermediário de Águas Claras à Estação de Tratamento de Água do Guaraú, na Serra da Cantareira, e tem cerca de 4.650 m de extensão com secções de diâmetro hidráulico de 4,5 a 5,5 m.

II — INTERESSE DA PRÉ-DETERMINAÇÃO DA PERDA DE CARGA

Visa o método proposto obter conclusões sobre os diâmetros e tipos de revestimento das galerias de adução. O problema é particularmente interessante quando o terreno atravessado é estável e impermeável, caso em que uma galeria bruta seria recomendável.

De fato, as fórmulas clássicas de perda de carga permitem determinar com boa aproximação a perda de carga se se conhece o valor da rugosidade relativa $\frac{D_H}{K}$ da parede da galeria. Para galerias revestidas $\frac{D_H}{K}$ é bem determinado en-

(*) Engenheiro Naval pela Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

(**) Engenheiro Mecânico pela Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

(***) Instrutor da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

quanto que para galerias brutas ou parcialmente revestidas este valor é praticamente indeterminado; pode-se apenas obter uma estimativa de $\frac{D_H}{K}$, o que não garante precisão nos cálculos da perda de carga e portanto no dimensionamento da galeria.

Assim, a tendência dos projetistas é adotar freqüentemente como solução uma galeria revestida, de dimensionamento seguro; e quando é adotada a solução de galeria bruta há sempre um superdimensionamento oneroso devido aos coeficientes de segurança em jôgo.

Para permitir um dimensionamento preciso de uma galeria bruta, o ideal seria construir um trecho do túnel projetado e ensaiar esse trecho com circulação de ar. A partir dos resultados desse ensaio seria possível obter a solução ótima (alargamento, revestimento ou mesmo estreitamento da secção) e estendê-la ao restante da galeria. Entretanto esta é uma situação incomum e a pré-determinação da perda de carga tem maior interesse prático num caso como o seguinte: Uma longa galeria é projetada com revestimento em determinados trechos e sem revestimento no restante, onde atravessa rocha sã. Pergunta-se: Qual a segurança no dimensionamento dessa galeria? Deve-se revestir os trechos brutos?

O ensaio a ar da galeria permite definir soluções: revestimento parcial do trecho bruto, revestimento total, alargamento, etc. A solução a ser adotada deve levar em conta também os aspectos econômicos do problema.

Os ensaios com circulação de ar aplicam-se também a outros problemas como:

- perda de carga em dutos de secção especial, por exemplo, parcialmente revestidos.
- perdas singulares em anéis de reforço de galerias brutas.
- perdas singulares em válvulas, bifurcações, etc. de grandes adutoras de água.
- controle de acabamento do revestimento de adutoras (tubos metálicos revestidos ou de concreto).

III — FUNDAMENTOS TEÓRICOS

O método baseia-se no fato de que, dada uma canalização, o coeficiente de perda de carga (f) que comparece na fórmula universal da perda de carga

$$h_f = f \frac{L}{D_H} \frac{V^2}{2g} \quad (1)$$

independe da natureza do fluido incompressível que escoar em regime permanente (água ou ar quando considerado incompressível), para um mesmo número de Reynolds do escoamento.

Isto significa que a perda de carga h_f (expressa em altura do fluido escoando) entre dois pontos de uma canalização qualquer percorrida em regime permanente por um fluido incompressível é, para um mesmo valor do número de Reynolds e para a mesma vazão, independente da natureza do fluido escoante.

Nas condições do ensaio, o ar é considerado incompressível devido às baixas velocidades do escoamento (aproximadamente 2m/s).

Na expressão da perda de carga temos:

L — comprimento da canalização

D_H — diâmetro hidráulico da canalização

V — velocidade média do escoamento

g — aceleração da gravidade

f — Coeficiente de perda de carga, função do número de Reynolds do escoamento

$$R = \frac{VD_H}{\nu} \text{ e da rugosidade relativa } \frac{D_H}{K} \text{ da parede}$$

$$f = \varphi \left(R, \frac{D_H}{K} \right) \quad (2)$$

Tôdas as pesquisas sôbre a perda de carga se reduzem à determinação da função (2). Destacam-se nesse sentido os trabalhos de NIKURADSE no estudo da perda de carga em canalizações com rugosidade uniforme e os trabalhos de Colebrook e White para uma distribuição não uniforme da rugosidade da parede. É de uso bastante difundido o ábaco de MOODY e ROUSE para condutos comerciais.

Vimos que o coeficiente de perda de carga f independe do fluido escoando se, e sômente se, o número de Reynolds fôr o mesmo para os dois escoamentos. A realização estrita dessa igualdade dos números de Reynolds exigiria para o escoamento de ar uma velocidade cêrca de 15 vêzes superior àquela prevista para o escoamento de água, pois a relação entre as viscosidades cinemáticas do ar e da água é aproximadamente igual a 15.

$$\text{para o ar: } \nu = 14,7 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s} \quad \text{a } 15^\circ\text{C}$$

$$\text{para a água: } \nu = 1,1 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$$

Porém, como no caso de galerias brutas o escoamento de água se dá no regime hidráulicamente rugoso, isto é, na região do ábaco de MOODY-ROUSE onde o coeficiente de perda de carga f só depende da rugosidade relativa $\frac{D_H}{K}$, é suficiente, para se obter a igualdade de f, realizar um escoamento de ar com número de Reynolds superior a um certo valor crítico R_{cr} .

Esta nova condição permite realizar o ensaio com um sistema de ventilação de porte mais modesto do que aquêle que seria necessário se fôsse observada a igualdade dos números de Reynolds, tornando portanto mais baixo o custo do ensaio.

O valor do número de Reynolds crítico R_{cr} pode ser calculado pela fórmula proposta por Moody:

$$R_{cr} = \frac{200}{\sqrt{f}} \frac{D_H}{K}$$

No caso de galerias brutas podemos adotar $K \approx 0,10 \text{ m}$ e $f \approx 0,08$. Resulta

$$R_{cr} \approx 7060 D_H$$

No caso de galerias revestidas podemos adotar $K \approx 0,001 \text{ m}$ e $f \approx 0,012$. Resulta:

$$R_{cr} \approx 1.818.000 D_H$$

Sendo o R_{cr} para galerias revestidas bem maior que para galerias brutas, podemos ter, para as galerias revestidas, um escoamento de ar com número de Reynolds menor que o crítico e o valor de f obtido difere do valor de f para o escoamento de água; mas com o coeficiente f obtido no ensaio a ar podemos

determinar o verdadeiro valor de f no escoamento de água por extrapolação através do diagrama de Colebrook ou de Moody-Rouse.

IV — APLICAÇÃO DO MÉTODO

Faremos a seguir uma exposição sobre o ensaio a ar a ser realizado no citado túnel n.º 2 da COMASP.

Para tal ensaio o equipamento necessário será:

- a) Equipamento para a determinação do diâmetro hidráulico e do perímetro molhado das secções ao longo do túnel.
- b) Conjunto de ventiladores axiais.
- c) Estação medidora de vazão.
- d) Medidores de pressão estática ao longo do túnel.
- e) Equipamento para determinação das condições do ar escoando (pressão barométrica, temperatura e grau higrométrico).
- f) Sistema de comunicação no longo do túnel.

Observação: Uma descrição pormenorizada destes equipamentos constará de outros trabalhos a serem apresentados neste mesmo Congresso (2) (3).

- a) Equipamento para a determinação do diâmetro hidráulico e do perímetro molhado das secções ao longo do túnel.

Será utilizado um método óptico que consiste em projetar um anel luminoso nas paredes da secção cujo diâmetro hidráulico se deseja obter e fotografar esse anel com uma câmara provida de objetiva grande angular. A partir dessas fotografias determinam-se o diâmetro hidráulico e o perímetro molhado da secção.

- b) Conjunto de ventiladores axiais.

Os ventiladores devem ser do tipo axial porque as perdas da carga são relativamente pequenas e devemos obter no ensaio grandes vazões. A máxima vazão do ensaio será de aproximadamente $55 \text{ m}^3/\text{s}$ com uma perda de carga total de 40 mm. c. a. Isto corresponde a uma potência instalada de 75 H. P.

Como o túnel é bruto em quase toda sua extensão, a condição $R > R_{cr}$ é facilmente satisfeita. De fato, no caso

$$R_{cr} = 38.800$$

e o número de Reynolds na secção de maior diâmetro hidráulico é

$$R \approx 6 \times 10^5$$

Note-se que para $R > R_{cr}$ a perda de carga h_f em altura de ar, no escoamento de ar, é igual à perda de carga h_f em altura de água, no escoamento de água, para a mesma vazão. Além disso, como o coeficiente de perda de carga f se mantém constante para $R > R_{cr}$, existe a seguinte relação entre as perdas de carga e as vazões:

$$\frac{h_f}{Q^2} = \text{constante}$$

Assim, medindo-se vários valores de h_f em correspondência com valores da vazão Q , levantamos uma reta média no gráfico $h_f = h_f(Q^2)$ e podemos obter a perda de carga no escoamento de água para qualquer vazão Q .

Evidentemente a construção do referido gráfico $h_f = h_f(Q^2)$ deve ser feita variando-se a vazão entre os limites extremos compatíveis com o sistema de ven-

tilação e com o equipamento de medida da perda de carga, incluindo de preferência a vazão nominal do túnel que no caso é de 33 m³/s.

A variação da vazão pode ser feita por recirculação de ar através de janelas ajustáveis no painel de suporte dos ventiladores.

c) Estação medidora de vazão.

A medida precisa da vazão de ar através do túnel é indispensável para o estabelecimento das condições de semelhança necessárias para a previsão da perda de carga no escoamento de água.

No caso do túnel n.º 2 da COMASP, foi considerada como solução mais viável a medida da vazão com orifício calibrado (no caso diafragma).

De fato, será construído um modelo em escala reduzida do trecho do túnel onde deverá ser inserido o diafragma calibrado; este trecho é de secção transversal regular, com aspecto de "capela". No modelo reduzido as vazões serão medidas com anemômetros de fio quente. As curvas de calibração permitirão obter "in loco" as vazões por meio de uma simples leitura de diferença de pressão num manômetro ótico tipo BETZ.

d) Medidores de pressão estática ao longo do túnel.

Serão medidas perdas de carga ao longo de trechos do túnel com comprimento suficiente para produzir uma perda de carga mínima de 10 mm c. a. necessária para se estimar a perda de carga com precisão de 1%.

A medida da pressão estática será feita por tubos tipo Prandtl com obstrução do orifício de tomada de pressão total. Os tubos Prandtl se conectam a micromanômetros inclinados de 50 mm de coluna d'água e precisão de 0,1 mm.

Serão utilizados 4 destes micromanômetros.

e) Equipamento para a determinação das condições do ar escoando (pressão barométrica, temperatura e grau higrométrico).

As medidas da pressão barométrica, temperatura e grau higrométrico são necessárias para a determinação precisa do peso específico do ar escoando a fim de exprimir a perda de carga em altura de ar. Será utilizado um equipamento convencional para estas medidas.

f) Sistema de Comunicação ao longo do túnel.

O sistema de telecomunicações é indispensável para o comando das diversas operações de medida. Pode ser usado um sistema de telefonia para esse fim.

V — ANÁLISE DOS RESULTADOS

Quanto às perdas de carga, elas são obtidas diretamente das medidas efetuadas nos micromanômetros, conhecido também o peso específico do ar nas condições do ensaio.

No caso de galerias brutas, é interessante conhecer-se o valor médio do coeficiente de perda de carga f que convém ser adotado para cada trecho de secção igual à dos trechos de medida. Para isto devemos medir também a área da secção e o perímetro molhado ao longo do túnel.

De fato, com

$$dh_f = f \frac{dx}{D_H} \frac{V^2}{2g}, \quad V = \frac{Q}{S}, \quad D_H = 4 \frac{S}{\sigma}$$

resulta:

$$h_f = \frac{f}{8g} Q^2 \int_0^L \frac{\sigma}{S^3} dx = \frac{f}{8g} Q^2 L \left(\frac{\sigma}{S^3} \right) \text{ médio}$$

onde:

σ é o perímetro da secção

S é a área da secção

D_H é o diâmetro hidráulico da secção.

Assim o valor médio de f será dado por

$$f = \frac{8g}{L} \frac{h_i}{Q^2} \frac{1}{\left(\frac{\sigma}{S^3}\right)_{\text{médio}}}$$

em que $\left(\frac{\sigma}{S^3}\right)_{\text{médio}}$ é obtido a partir do levantamento de um grande número de perfis ao longo dos trechos de medida.

A determinação direta de $\frac{D_H}{K}$ é difícil devido à indeterminação na definição de K e de D_H para galerias brutas. Por isso é preferível obter $\frac{D_H}{K}$, e daí K, a partir do diagrama de Moody-Rouse conhecido o valor do coeficiente de perda de carga f .

VI --- CONCLUSÃO

Do exposto conclui-se que o ensaio de uma canalização de água por circulação de ar é de execução relativamente simples sendo seus resultados de grande valia no dimensionamento seguro e na construção econômica de grandes túneis de adução de água.

BIBLIOGRAFIA

- 1 — G. REMENIERAS e P. BOURGUIGNON — "Prédétermination des pertes de charge d'une canalisation d'eau par circulation d'air".
Le Génie Civil — Tome CXXX — N.º 6, 7, 8, 9 — 1953.
- 2 — HANS GEORGE ARENS — Escola de Engenharia de São Carlos — "Diâmetro Hidráulico de Seções Irregulares. Determinação por Método Ótico" — 1969.
- 3 — DANTE CONTIN NETO, MARCIUS F. GIORGETTI e REYNALDO GAVA — Escola de Engenharia de São Carlos — "Determinação da Vazão de Água em Túnel por Circulação de Ar. Dimensionamento de Diafragma e seu Modelo Reduzido" — 1969.