

# Diâmetro Hidráulico de Seções Irregulares

## Determinação por Método Ótico

HANS GEORGE ARENS (\*)

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

### INTRODUÇÃO

A presente comunicação resulta dos contatos mantidos entre a Cátedra de Mecânico Geral dos Fluidos da Escola de Engenharia de São Carlos e a COMASP — Companhia Metropolitana de Água de São Paulo — que versaram sobre alguns aspectos do Túnel 2 do Sistema Juquerí na região norte de São Paulo. Trata-se de um sistema que está em fase de construção com a finalidade de abastecer a área da Grande São Paulo, com mais 33 m<sup>3</sup> de água por segundo.

Entre outros, o Túnel mencionado faz parte dessas obras e tem a extensão de 4650 m. Trata-se de túnel escavado na rocha com secção formada geomêtricamente por um retângulo concordado na sua parte superior por um semi-círculo. Possui uma largura de 4,5 m e sua secção perfaz aproximadamente 18 m<sup>2</sup>.

Dada a importância e o vulto da obra, torna-se conveniente um ensaio prévio do túnel para verificar se será realmente obtida a vazão de projeto. Pelo mesmo motivo é oportuno construir-se um modelo reduzido da obra considerada. Como em ambos os casos é necessário conhecer as características da secção do túnel, como a forma, perímetro e área, dadas as dimensões avantajadas da obra, desenvolveu-se um método prático e rápido para fazer o levantamento dos parâmetros procurados.

Os estudos resultaram num método fotográfico, extremamente vantajoso não só sob o ponto de vista prático como também quanto à precisão necessária, e consta, em síntese, da fotografia de uma secção do túnel convenientemente iluminada com um projetor adequado. Esse método, denominado "MÉTODO ÓTICO" é apresentado neste trabalho de uma maneira geral, incluindo alguma indicações sobre a aparelhagem utilizada. Deve-se salientar que encontram-se em fase de estudos alguns aperfeiçoamentos que tornam a presente técnica mais eficaz no que tange à rapidez dos ensaios.

### O MÉTODO

Trata-se de um meio cômodo e rápido para a determinação das áreas e dos perímetros de seções irregulares de túneis ou dutos de uma maneira geral. De fato, uma fonte luminosa colocada entre dois discos concêntricos opacos, afastados entre si por pequena distância, gera praticamente um plano luminoso muito bem determinado, como mostra a figura 1.

---

(\*) Engenheiro Mecânico da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo.

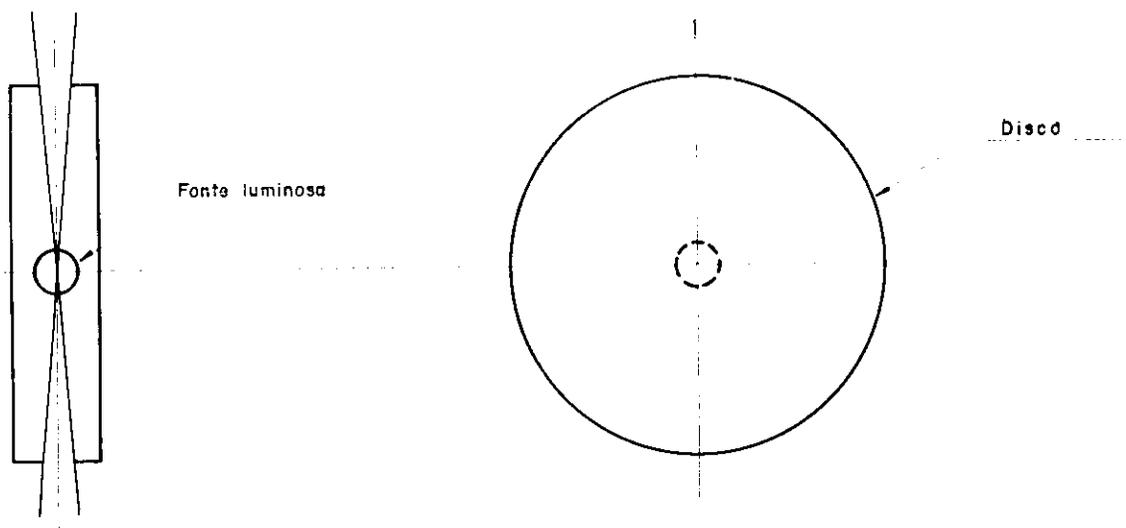


Fig. 1 — Esquema elucidativo do projetor

Esse sistema, uma vez colocado no interior de um duto qualquer fornece o lugar dos pontos nos quais o plano corta o duto. Este lugar se distingue por uma estreita faixa iluminada. Se houver paralelismo entre o eixo dos discos e o eixo do duto, a faixa luminosa assim obtida reproduzirá fielmente a secção normal do duto considerado. Esta secção fotografada, lançando mão de um equipamento fotográfico adequado, pode ser reproduzida em escala conveniente, efetuando-se a seguir as medições da área e do perímetro por meio de dispositivos específicos. Com esses parâmetros determina-se imediatamente o raio hidráulico da secção considerada.

## A APARELHAGEM

O equipamento necessário para a aplicação do "método ótico" é bastante simples e de custo relativamente reduzido. Dada a versatilidade da aparelhagem fotográfica não se deve considerar esta última como parte integrante no custo global, mas apenas os acessórios adicionais indispensáveis.

O projetor luminoso usado nas experiências realizadas na cátedra de Mecânica Geral dos Fluidos da Escola de Engenharia de São Carlos é mostrado na fotografia abaixo.

Consta de dois discos de alumínio com cerca de 400 mm de diâmetro, afastados entre si de tal forma a produzir uma fresta de 3 mm. A fonte luminosa é composta de 10 lâmpadas de 40 W 12 V ligadas em série, alimentadas com a rede usual de AC 110 V. Um ventilador adequado evita o aquecimento demasiado do projetor.

O equipamento fotográfico utilizado constou de uma câmara "Linhof" 9 x 12, equipada com uma objetiva Schneider-Kreuznach Angulon 1 : 6,8 — 90 mm. Os negativos foram obtidos com o uso da película Ilford FP3 125 ASA, revelado com o revelador D 76. Para as cópias que constam no presente trabalho, foi empregado o papel Kodabromide F3 com secagem natural para evitar ao máximo possíveis distorções.

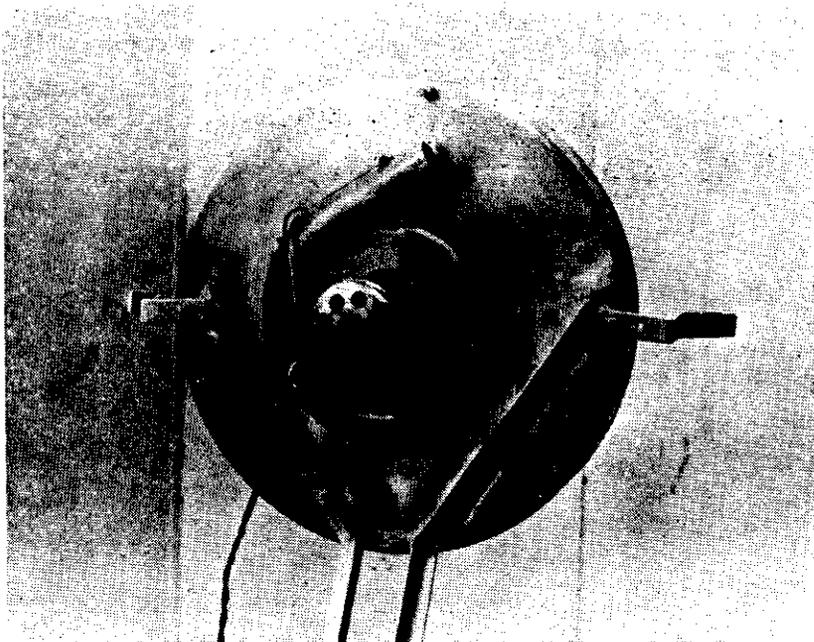


Fig. 2 — Fotografia do projetor luminoso mostrando o ventilador.

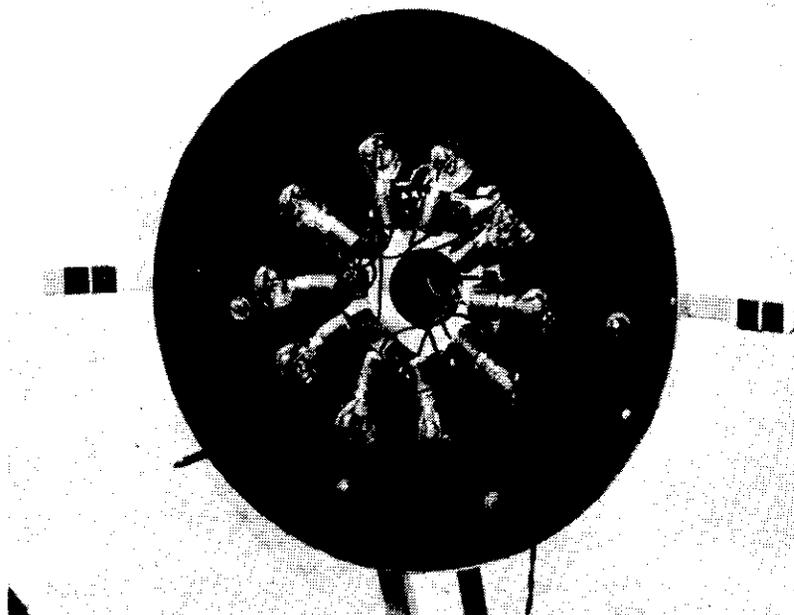


Fig. 3 — Fotografia do projetor luminoso desmontado.

### O ENSAIO REALIZADO FAZENDO USO DO “MÉTOD0 ÓTICO”

Com o objetivo de verificar as possibilidades do método exposto, realizou-se um ensaio usando como objeto de pesquisa um modelo reduzido de um túnel com secção semelhante à do túnel 2 do sistema Juquerí (COMASP). Este modelo de 1,5 m de largura e 1,5 m de altura, foi construído de maneira a simular inclusive as irregularidades de superfície, características de túneis escavados em rocha sem revestimento de concreto. Fêz-se o levantamento da área e do perímetro de três secções normais distintas — A, B e C.

Devido ao maior interesse, apresenta-se a seguir o resultado da secção C de maior irregularidade superficial.

A Secção C foi fotografada de uma distância de cerca de 2,5 m. Solidários ao projetor, dois braços forneciam a distância padrão de 0,5 m para efeito de escala.

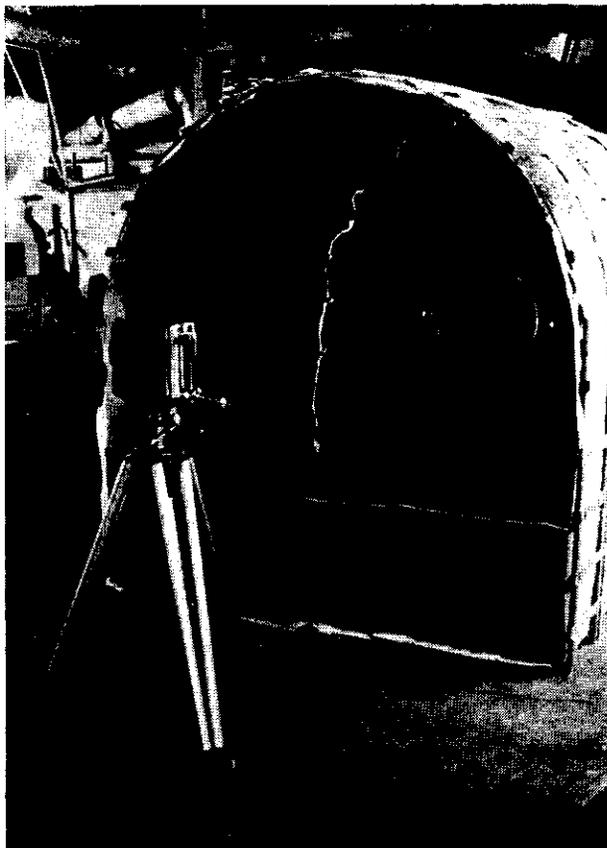


Fig. 4 — Levantamento fotográfico da secção C no modelo reduzido.

A distância padrão nas fotografias obtidas, devidamente ampliadas, acusou o valor de 66,5 mm. A área medida com um planímetro Amsler e o perímetro com um dispositivo semelhante, da marca Minerva, acusaram respectivamente:

$$\begin{aligned} \text{Área } S &= 1,90 \text{ m}^2 \\ \text{Perímetro } l &= 5,67 \text{ m} \end{aligned}$$

#### A MEDIÇÃO COM O TEODOLITO

Um outro levantamento da mesma secção (C) com o emprêgo de um teodolito, foi executado marcando na secção considerada 66 pontos sôbre a faixa iluminada, obtendo-se assim uma poligonal fechada. Com a determinação das deflexões horizontais e verticais de cada ponto e, conhecendo-se a distância entre o centro ótico do instrumento e o plano da secção estudada, pode-se calcular analiticamente a área e o perímetro da poligonal obtida. É óbvio que se o número de pontos fôr suficientemente grande, os valores encontrados expressarão com grande aproximação a área e o perímetro da secção analisada.

Realmente, se

$\alpha$  = deflexão horizontal

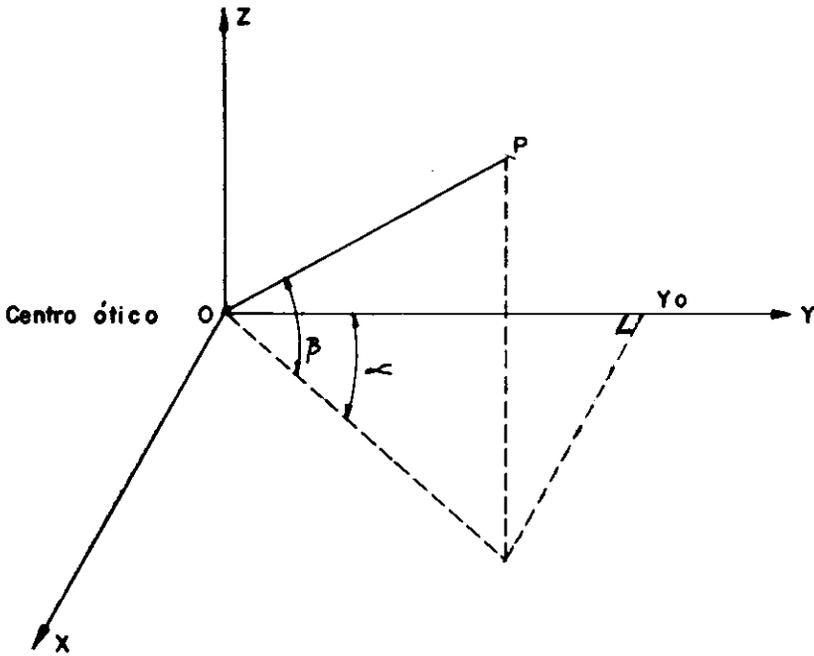
$\beta$  = deflexão vertical

$y_0$  = distância entre o centro ótico e a secção

e se a poligonal fôr definida pelos pontos  $P_1, P_2, \dots, P_n$  um ponto  $P_i$  qualquer com coordenadas  $x_i$  e  $z_i$  será dado por

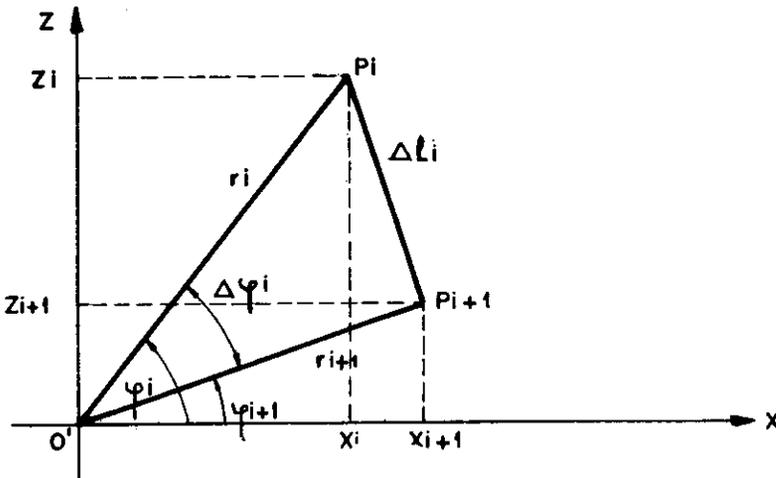
$$x_i = y_o \cdot \text{tg } \alpha_i$$

$$z_i = \sqrt{x_i^2 + y_o^2} \cdot \text{tg } \beta_i = y_o \cdot \sqrt{1 + \text{tg}^2 \alpha_i} \cdot \text{tg } \beta_i$$



Analisando dois pontos consecutivos  $P_i$  e  $P_{i+1}$  da poligonal, temos

$$\Delta l_i = \sqrt{(x_i - x_{i+1})^2 + (z_i - z_{i+1})^2}$$



logo, para o perímetro, tem-se:

$$l = \sqrt{(x_n - x_1)^2 + (z_n - z_1)^2} + \sum_{i=1}^{n-1} \Delta l_i$$

An logamente para a área, teremos

$$\Delta S_i = \frac{(r + r_i)}{2} \cdot \frac{(r + r_i)}{2} \cdot \frac{|\Delta \phi_i|}{2} = \frac{(r + r_i)^2 \cdot |\Delta \phi_i|}{8}$$

onde  $\Delta\varphi_i = \varphi_i - \varphi_{i+1}$

sendo  $\varphi_i = \arctg \frac{z_i}{x_i}$

Com a análise dos sinais de  $x_i$  e  $z_i$  obtêm-se os valores corretos dos ângulos  $\varphi_i$ .

A área será dada por

$$S = \frac{(r_n + r_1)^2 |\varphi_1 - \varphi_n|}{8} + \sum_{i=1}^{n-1} \Delta S_i$$

Os valores de  $l$  e  $S$  foram calculados com o uso de um computador digital IBM 1130 e acusaram respectivamente:

$$l = 5,472 \text{ m}$$

$$S = 1,878 \text{ m}^2$$

Evidentemente, os resultados obtidos com o levantamento feito com o teodolito não devem ser encarados como absolutos, ou seja, a área e o perímetro calculados não servem como padrão para efeito de comparação entre os dois métodos usados. De qualquer forma, dado o pequeno afastamento entre os pontos da poligonal estudada (Fig. 5) é lícito admitir os resultados obtidos com o teodolito mais próximos dos valores reais.

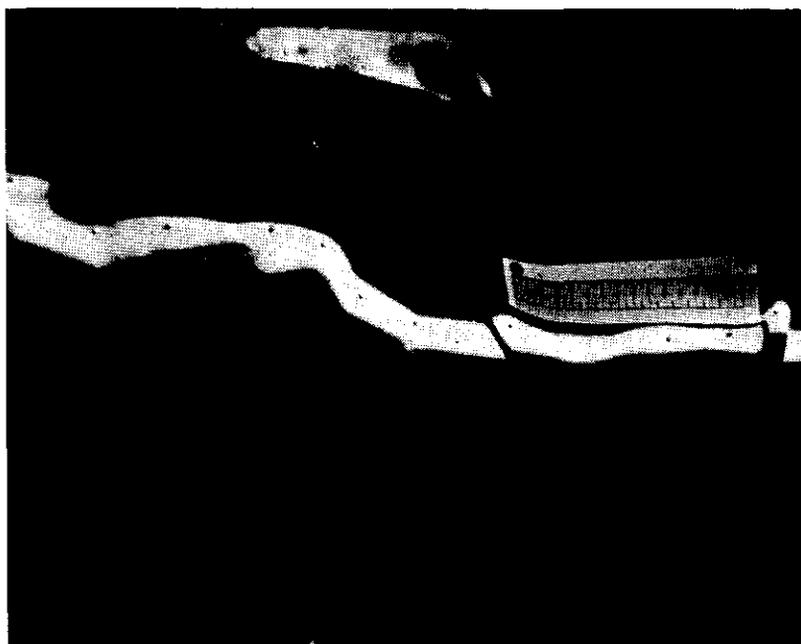


Fig. 5 — Detalhe mostrando o afastamento dos pontos da poligonal.

## COMENTÁRIOS

Uma análise dos parâmetros determinados com os dois métodos expostos mostra a eficiência do "método ótico". A diferença de 3,8% no perímetro e 1,6% na área, possivelmente pode ser diminuída, fazendo-se alguns aperfeiçoamentos na aparelhagem. A fotografia abaixo mostra a secção C levantada de modelo reduzido.

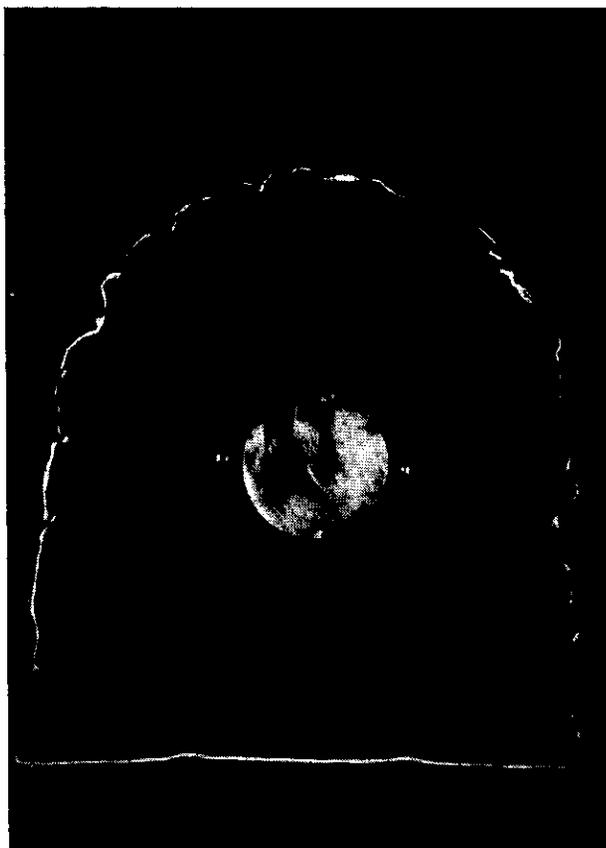


Fig. 6 — Secção C do modelo reduzido.

As regiões não definidas da secção podem ser obtidas fazendo-se uso de outra câmara fotográfica trabalhando em posição oposta à primeira. Por superposição obtém-se a secção totalmente definida. Uma outra possibilidade é o uso de uma objetiva "Superangulon".

Evidentemente deve haver perpendicularidade entre o eixo da máquina fotográfica e o plano da secção a estudar. De qualquer maneira, pequenos desvios na perpendicularidade podem ser corrigidos com artifícios fotográficos desde que se use na aparelhagem, distâncias padrão segundo duas direções ortogonais. Deve-se salientar que a condição de perpendicularidade é fundamental no método com o teodolito; inclusive as expressões analíticas apresentadas só são válidas se essa hipótese for satisfeita. Qualquer desvio havido acarreta quase sempre a necessidade de um novo levantamento muitas vezes demorado e oneroso.

No que tange à rapidez e à facilidade de trabalho, é nítida a vantagem do "método ótico". De fato, depois de posicionado o equipamento (igual demora para os dois métodos), o intervalo de tempo de dois minutos é suficiente para o levantamento da secção considerada. Com o uso de um "flash" eletrônico, esse tempo é reduzido para frações de segundo, inclusive tornando fácil a parte operacional.

Com as considerações acima, verifica-se a vantagem do uso do "método ótico" pois o eventual prejuízo na precisão dos resultados é desprezível na maioria dos casos que se apresentam na prática.