

OS MÉTODOS DA COMASP PARA O ESTUDO DAS PERDAS DE CARGA HIDRÁULICA EM TÚNEIS POR CIRCULAÇÃO DE AR

Eng^o Milton Gonçalves Sanchez *

RESUMO

Tendo sido escavado inicialmente para aduzir 22m³/s, o túnel n.º 2 do Sistema Cantareira teve que ser rebaixado para permitir a passagem de 33m³/s.

Para determinar a extensão necessária desse rebaixamento da soleira, foi medida a perda de carga obtida pela circulação forçada de ar, através do túnel e a partir desses dados, calculada a perda de carga hidráulica, no trecho da experiência.

Sabendo-se qual a perda de carga hidráulica total máxima, para que o túnel aduzisse 33m³/s, foi determinada qual a extensão que deveria

ainda ter a soleira rebaixada.

As paredes do túnel são brutas não tendo revestimento e por isso o seu perímetro foi visualizado através da fotografia de secções, iluminados por um feixe de luz estreito, projetado num plano perpendicular ao eixo do túnel.

A medida da vazão de ar foi conseguida através de um diafragma colocado dentro do túnel e calibrado por modelo reduzido construído na Escola de Engenharia de São Carlos.

Os resultados obtidos mostraram que era desnecessário rebaixar 1100 metros do túnel, o que representou economia de tempo e custo.

1. INTRODUÇÃO

1.1. O Túnel n.º 2 e o Sistema Cantareira

O túnel n.º 2 faz parte do Sistema Cantareira de Produção de Água para a região da Grande São Paulo; tem 4.826 m de extensão com secções de diâmetro hidráulico de 4, 5 m a 5,5 m e faz a ligação Reservatório de Aguas Claras

— Estação de Tratamento de Água do Guaraú. Numa primeira etapa o túnel n.º 2 foi projetado e construído para uma vazão de 22m³/s; posteriormente a vazão do Sistema Cantareira foi ampliada para 33m³/s prevendo-se um alargamento do túnel n.º 2 para atender essa vazão.

1.2. Necessidade do ensaio do túnel n.º 2

O túnel n.º 2 é uma galeria bruta de grandes proporções e como tal deve ser bem dimensionada técnica e economicamente. O dimensionamento de galerias escavadas em rocha baseia-se no cálculo da perda de carga h_f quando circula a vazão Q ; para este cálculo, as fórmulas clássicas da 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, enquanto 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 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 jogo.

Pelo exposto realizou-se um ensaio de perda de carga com circulação de ar no túnel n.º 2, cujos fundamentos teóricos constam do capítulo 2, para verificar se suas novas secções projetadas estavam corretamente dimensionadas. O ensaio visou determinar se a escavação deveria ser interrompida em algum ponto, concluída, ou se o túnel deveria ser ainda mais alargado do que o previsto no projeto para atender à vazão de 33m³/s.

* Engenheiro do Departamento Técnico da Superintendência de Engenharia — COMASP.

1.3 O problema do desemboque

O antigo projeto da Estação de Tratamento de Água do Guaraú previa um grande reservatório de água tratada no seu pavimento térreo ficando a Estação de Tratamento própria dita sobre o reservatório. Isto exigia que a cota do piso do túnel n.º 2 no desemboque fôsse 842,40; e assim foi escavado o túnel com uma secção projetada para aduzir 22m³/s.

Posteriormente o projeto da Estação de Tratamento foi modificado, passando ela a ocupar a posição anteriormente destinada ao reservatório de água tratada. Como o túnel já estava escavado, resultou um grande desnível entre seu desemboque e a entrada da Estação de Tratamento. Atualmente o nível d'água na bacia de tranquilização à entrada da Estação de

Tratamento de Água do Guaraú é 836,60; por outro lado, o túnel n.º 2 deve trabalhar em carga e ficou estipulado que a carga piezométrica no desemboque para N.A. mínimo em Águas Claras e vazão de 33m³/s seria 847,40, 1 metro acima da cota da abóbada nessa secção (846,40) — Vide Linha Piezométrica Previsão na fig. 1. Portanto há uma diferença mínima de 847,40 — 836,60 = 10,80 m que deve ser dissipada até se atingir a bacia de tranquilização.

Vejam os seguintes fundamentos teóricos e a evolução do ensaio de perda de carga por circulação de ar, e que solução foi dada ao problema de dissipação de energia no desemboque do túnel n.º 2.

2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

O método de determinação das perdas hidráulicas por circulação de ar 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 (água ou ar considerado incompressível) que escoar em regime permanente, para um mesmo valor do número de Reynolds.

[Na expressão da perda de carga (fórmula 1), tem-se:

- 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
- $R = \frac{V \cdot D_H}{\nu}$ e da rugosidade relativa $\frac{D_H}{K}$ da parede da canalização.
- $$f = f\left(R; \frac{D_H}{K}\right) \quad (2)$$

As pesquisas sobre perda de carga se prendem à determinação da função (2). Destacam-se neste sentido os trabalhos de NIKURADSE e COLEBROOK. É de uso bastante difundido o ábaco de MOODY-ROUSE para condutos comerciais.

Nas condições em que se processa o ensaio, o ar é considerado incompressível devido às baixas velocidades de escoamento (aproximadamente 2m/s.)

A realização estrita da igualdade dos números de Reynolds exigiria para o escoamento de ar uma velocidade cerca de 13 vezes superior àquela do escoamento de água, pois a relação entre as viscosidades cinemáticas do ar e da água é aproximadamente igual a 13:

$$\left. \begin{array}{l} \text{para o ar: } \nu = 14,7 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s} \\ \text{para a água: } \nu = 1,1 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s} \end{array} \right\} \text{ a } 15^\circ\text{C}$$

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 realizar um escoamento de ar com número de Reynolds superior a um certo valor crítico R_{Cr} para se obter a igualdade de f .

Esta nova condição permite realizar o ensaio com um sistema de ventilação de porte mais modesto do que aquele que seria necessário se fôsse observada a igualdade dos números de Reynolds, tornando mais baixo o custo do ensaio. De fato, o valor do número de Reynolds crítico R_{Cr} pode ser calculado pela fórmula proposta por MOODY:

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

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

Resulta: $R_{Cr} \approx 7070 \frac{D_H}{K}$

No caso de galerias revestidas podemos adotar $K \approx 0,001\text{m}$ e $f \approx 0,12$.

resulta: $R_{Cr} \approx 1.820.000 \frac{D_H}{K}$

Assim, com um sistema de ventilação de pequeno porte superamos facilmente o R_{Cr} , para galerias brutas.

Como consequência do que foi exposto, concluímos que a perda de carga h_f (expressa em altura do fluido escoando) entre dois pontos de uma galeria bruta percorrida por um fluido incompressível em regime permanente é, para a

mesma vazão e para número de Reynolds superior a R_{Cr} , independente da natureza do fluido escoante. Isto significa que a perda de carga expressa em altura de ar no escoamento de ar é igual à perda de carga expressa em altura no escoamento de água para a mesma vazão.

3 — O ENSAIO

A iniciativa da execução do ensaio do túnel n.º 2 por circulação de ar foi tomada pelo Prof. Tufi Mamed Assy, Consultor para Estudos Especiais da COMASP.

A execução do ensaio esteve a cargo da equipe da Cadeira de Mecânica Geral dos Fluidos da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo sob a direção do prof. Rui Carlos de Camargo Vieira. Para o desenvolvimento do ensaio foram necessários os seguintes equipamentos:

a. Equipamento para a determinação da área e do perímetro das secções ao longo do túnel (3).

Para obter essas características das secções do túnel foi utilizado um método ótico, que consiste em: projetar um anel luminoso nas paredes da secção que se deseja estudar, e fotografar esse anel com uma câmara provida de objetiva grande angular.

O anel luminoso é obtido por meio de um flash eletrônico colocado entre dois discos paralelos próximos. Os discos são dispostos de tal forma que geram um plano luminoso normal ao eixo do túnel; assim o anel luminoso é formado pela intersecção desse plano luminoso com as paredes do túnel.

A partir das fotografias determinam-se a área das secções e seus respectivos perímetros.

Efetuaram-se provas para se determinar a precisão do método ótico. Construiu-se um modelo de um túnel com as características do túnel n.º 2. Mediu-se a área e o perímetro de uma secção conforme o método ótico descrito e também com o auxílio de teodolito. As medidas diferiram por 3,8% no perímetro e 1,6% na área.

Quanto à rapidez e simplicidade de trabalho o método ótico é vantajoso em relação a qualquer outro método de levantamento de secções, e considerando-se também que é relativamente preciso foi adotado para o levantamento das secções do túnel n.º 2.

b. Equipamento para a circulação do ar

Foram utilizados três ventiladores axiais perfazendo um total de 75 HP instalados. Os ventiladores foram instalados na bôca de jusante, funcionando como exaustores do túnel.

c. Equipamento para medida de vazão (4)

A medida precisa da vazão de ar através do túnel é indispensável para o estabelecimento das condições de semelhança necessárias à

previsão da perda de carga no escoamento de água.

No caso particular do túnel n.º 2 foi considerada como solução mais viável a medida da vazão com orifício calibrado, no caso diafragma. Foi construído um modelo reduzido do diafragma e dos trechos do túnel a montante e a jusante do mesmo, o qual foi ensaiado nos laboratórios da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo.

No primeiro dia do ensaio de campo, procedeu-se à verificação da calibração do diafragma, mediante a obtenção da vazão por integração das velocidades medidas ao longo de dois diâmetros do orifício, e sua comparação com o valor obtido através do coeficiente de vazão do modelo reduzido. As velocidades foram medidas através de uma bateria de tubos de Prandtl. O afastamento entre o valor da vazão medida pelo diafragma e o valor da vazão média obtida pela bateria de tubos de Prandtl foi de 2,7%. Como a precisão da medida de vazão mediante o diafragma havia sido prevista em $\pm 1,73\%$ e a precisão da medida de vazão com a bateria de tubos de Prandtl foi de $\pm 2,15\%$, decidiu-se considerar satisfatórias as medidas de vazão por meio do diafragma e não mais se utilizou a bateria de tubos de Prandtl.

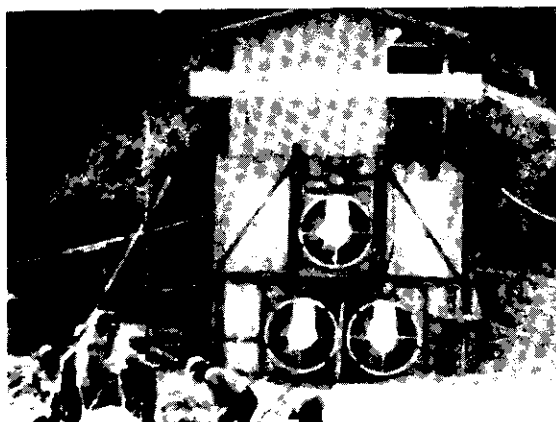


Foto 1 — Ventiladores

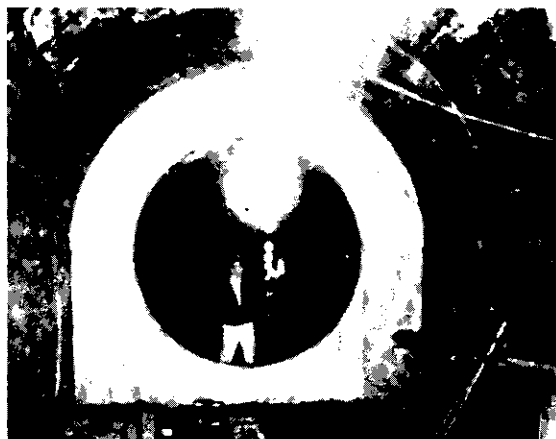


Foto 2 — Diafragma instalado no túnel

Assim, a curva de calibração do diafragma permitiu obter diretamente as vazões por meio de simples leituras de diferença de pressão num manômetro ótico tipo Betz e do conhecimento das condições do ar escoando: pressão barométrica, temperatura e grau higrométrico.



Foto 3 — Ensaio do modelo reduzido do diafragma

d. Equipamento para a medida da pressão estática ao longo do túnel

A medida da pressão estática ao longo do túnel n.º 2 foi feita por meio de 11 tubos tipo Prandtl com obstrução dos orifícios de tomada de pressão total. Esses tubos foram distribuídos ao longo do túnel n.º 2 e se conectavam através de registros a 4 micromanômetros inclinados.

e. Equipamento para a determinação das condições do ar escoando

A pressão barométrica foi medida por meio de 2 barômetros de mercúrio, um em cada extremidade do túnel n.º 2.

A umidade do ar foi medida por psicrômetros rotativos.

As medidas feitas durante o ensaio foram colhidas em 4 estações medidoras indicadas na fig. 1 como estações 0, 1, 2 e 3. Nessas estações se dispunha de tôdas as facilidades para o bom andamento dos trabalhos, inclusive 2 sistemas de telefonia para manter contato entre as estações.

O ensaio prôpriamente dito desenvolveu-se no período de 28.7.69 a 30.7.69, desde a verificação da calibração do diafragma até a última medida de vazão e de perda de carga.

4. RESULTADOS OBTIDOS

A fig. 2 mostra a linha pizométrica obtida para a vazão de 33m³/s. Os pontos A, B, C, D, E e F indicam as posições onde se encontravam os tubos de Pitot.

Observa-se que a perda de carga total para a vazão de água de 33 m³/s seria de 20,15 m.c.a. Como a perda de carga total deve ser igual à diferença entre o nível mínimo de Águas Claras (857,10 m) e a cota piezométrica no desemboque (847,40 m), isto é, 9,70 m, concluiu-se que no estado em que se encontrava o túnel por ocasião não seria possível a adução dos 33 m³/s previstos.

Calculou-se então qual o comprimento do túnel que deveria ser ainda escavado. Chegou-se à conclusão que mais 1732 m da bancada central deveriam ser rebaixados. Assim, conseguiu-se evitar a escavação de cêrca de 1100 m do túnel n.º 2 com sensível economia em tempo de entrega e custo da obra.

Os resultados acima previsto serão confirmados posteriormente mediante novo ensaio quando o túnel estiver pronto.

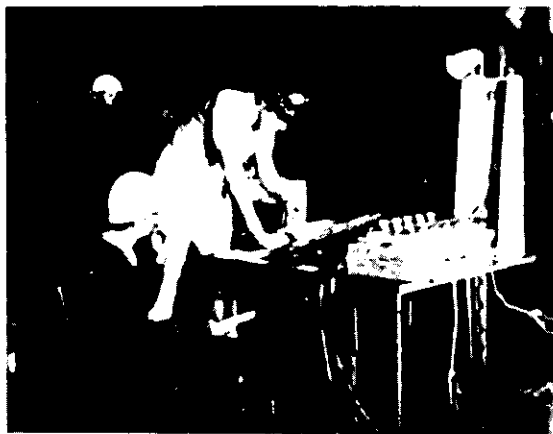


Foto 4 — Estação de medidas

5. O PROJETO DO DESEMBOQUE

5.1. Solução dada ao problema

Inicialmente pensou-se em aproveitar o desnível entre o desemboque e a bácia de tranquilização para a geração de energia elétrica numa pequena usina de aproximadamente 3.300 kw. Entretanto o aproveitamento hidroelétrico revelou-se antieconômico. Assim, pensou-se na forma de dissipar essa energia disponível no desemboque do túnel n.º 2 e o antigo Depto. de Estudos e Viabilidade chegou à conclusão que a melhor solução seria o uso de válvulas dissipadoras do tipo Howell-Bunger funcionando também como órgãos reguladores da vazão aduzida à Estação de Tratamento de Água do Guaraú. As válvulas, em número de três, seriam instaladas nas extremidades de condutos forçados de aço; entretanto verificou-se posteriormente que a substituição dos condutos forçados por câmaras de concreto como indicado nas figs. 3 e 4 forneceria uma solução mais prática e de menor tempo de execução.

5.2 Ensaios em modelo reduzido

Foram realizados ensaios em modelo reduzido para determinar a melhor configuração das câmaras de dissipação dos jatos das válvulas e das estruturas imediatamente a jusante das câmaras.

Também realizou-se um modelo reduzido da bacia de tranquilização a fim de se determinar sua melhor configuração para encaminhar as águas até a tomada d'água da Estação de Tratamento.

Todos os ensaios em modelo reduzido foram realizados no Laboratório do Departamento de Hidráulica da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo.

6 — CONCLUSÕES

Do exposto concluiu-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. Também vemos que o problema do desemboque do túnel n.º 2 teve uma solução relativamente simples com grande praticidade do ponto de vista da regulagem da vazão aduzida à Estação de Tratamento de Água do Guarau.

BIBLIOGRAFIA

1. G. REMENIÉRAS 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. MANOEL COLLAÇO VERAS, MILTON G. SANCHEZ e OTÁVIO DE MATTOS SILVARES
"Determinação de Perda de Carga Hidráulica por Circulação de Ar".
V Congresso de Engenharia Sanitária — Recife — 1969
3. HANS GEORGE ARENS
"Diâmetro Hidráulico de secções Irregulares. Determinação por Método Ótico".
V Congresso de Engenharia Sanitária — Recife — 1969
4. DANTE CONTIN NETO, MARCIUS F. GIORGETTI e REYNALDO GAVA
"Determinação da Vazão de Água em Túnel por Circulação de Ar. Dimensionamento de Diafragma e seu Modelo Reduzido".
V Congresso de Engenharia Sanitária — Recife — 1969.

ESQUEMA DO TÚNEL 2
PERFIL LONGITUDINAL

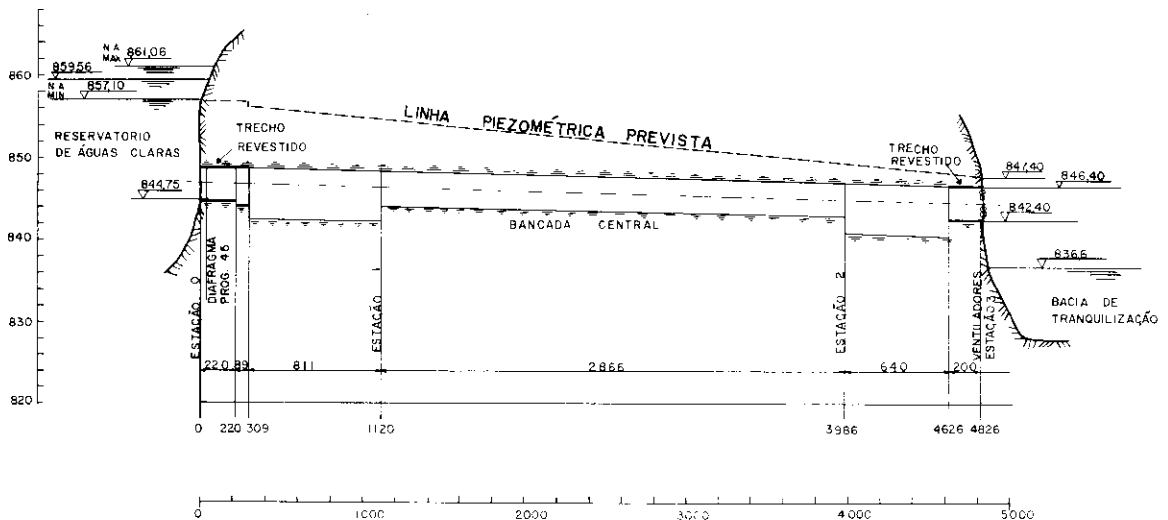


FIG. 1

LINHA PIEZOMÉTRICA

$$Q = 33 \text{ m}^3/\text{s}$$

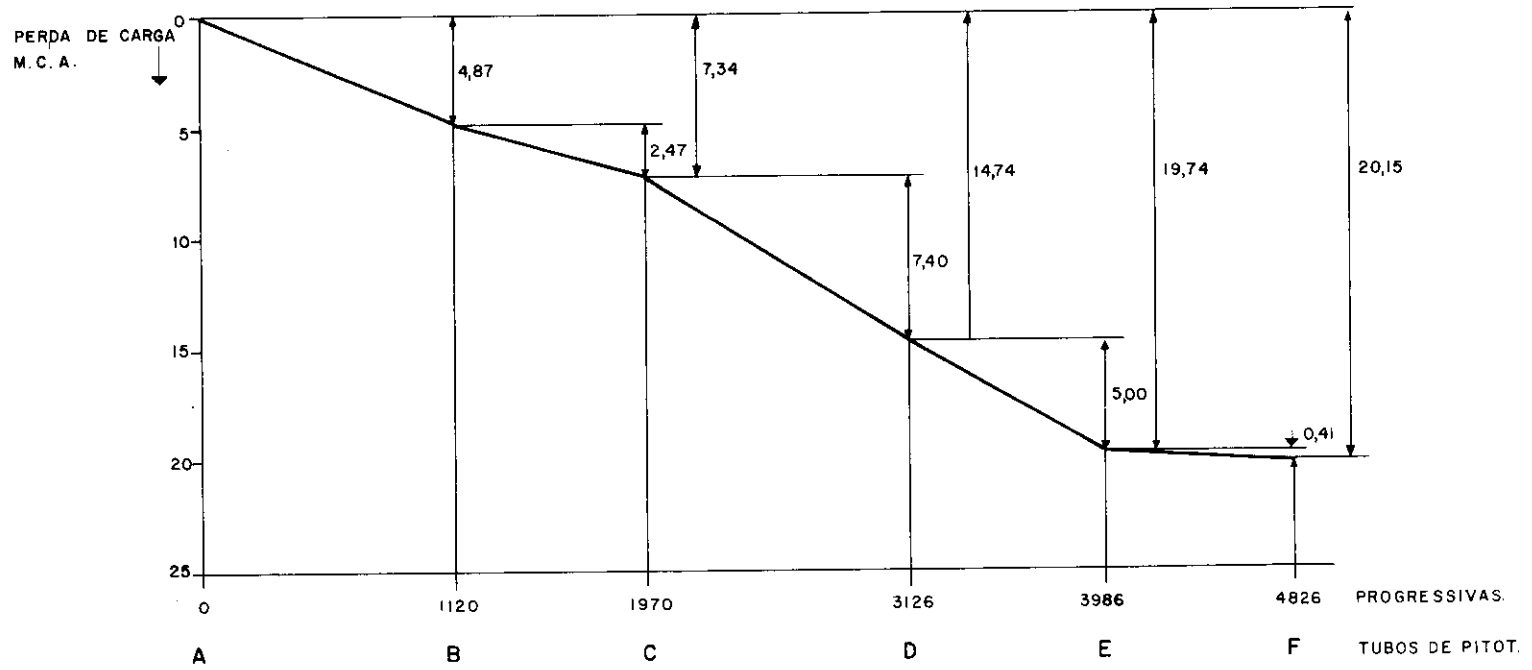
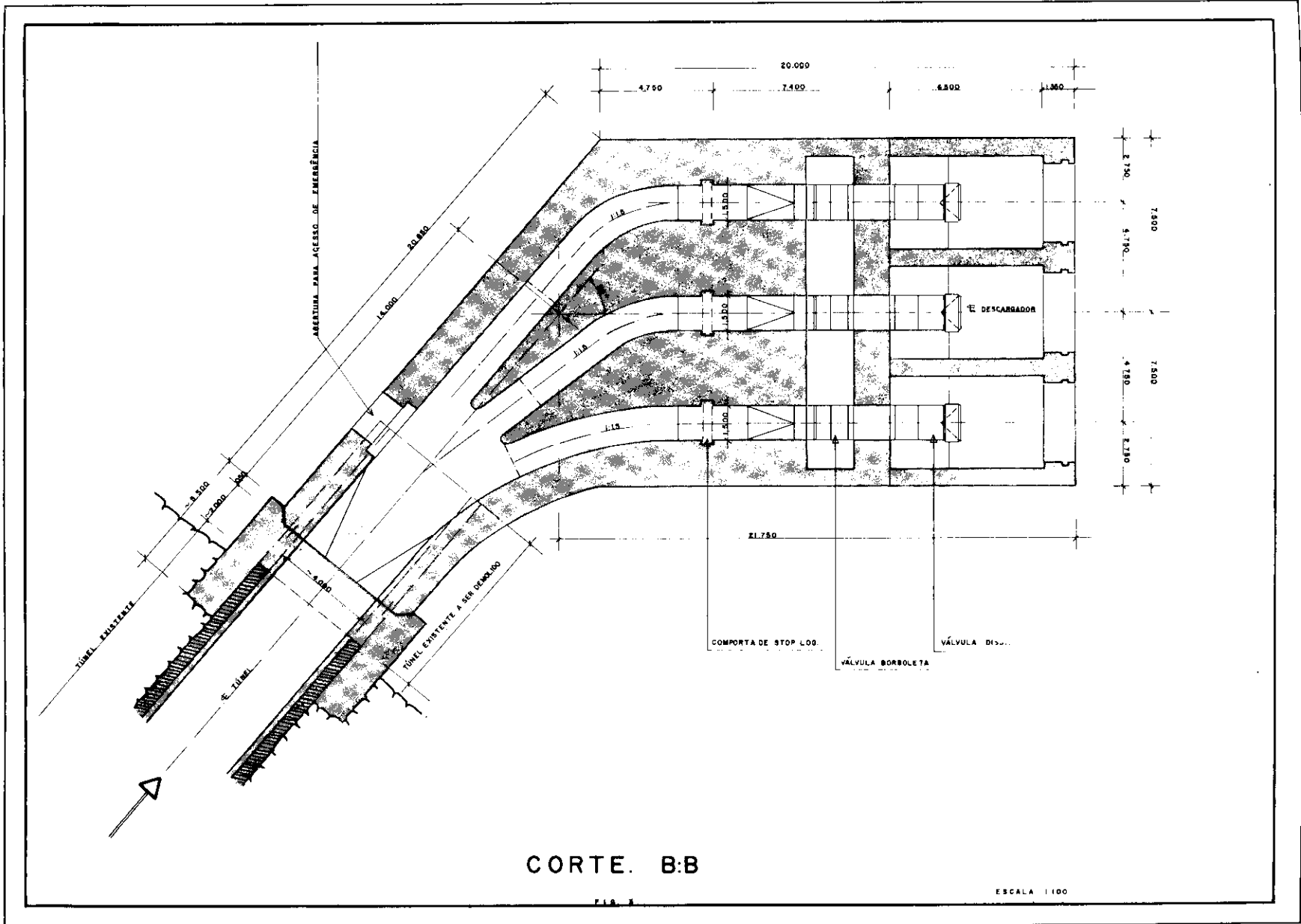
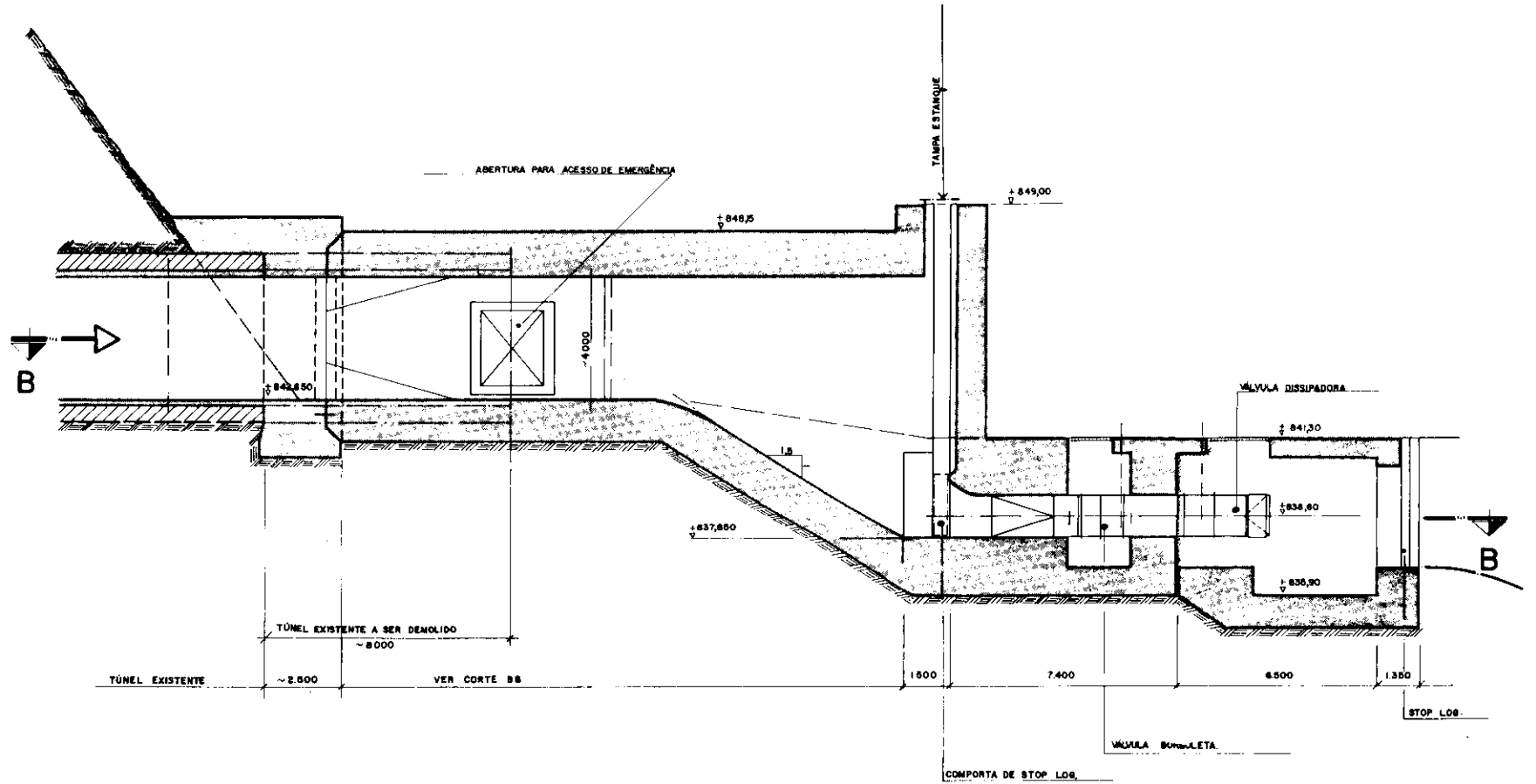


FIG - 2





CORTE LONGITUDINAL
(ESC: 1:100)

FIG. 4