# A ESTABILIZAÇÃO DE TALUDES NO APROVEITAMENTO HIDROELÉCTRICO DO FUNIL

## Slope Stability in Funil Hydroelectric Project

por
CARLOS EDUARDO DE MORAES FERNANDES*

RESUMO – Assegurar a estabilidade dos taludes criados pelos trabalhos de escavação nas áreas destinadas à construção dos Vertedouros e do Canal de Fuga da barragem do Funil – integrante do sistema energético da Furnas – Centrais Elétricas S. A. (Eletrobras) – constituia uma tarefa prioritária na continuação das obras.

As contenções realizadas empregaram na maioria dos casos cortinas delgadas de concreto armado, ancoradas profundamente no maciço por meio de tirantes protendidos.

Os exemplos mais importantes são apresentados, como também o método de cálculo de estabilidade, desenvolvido por nossa organização, em carácter pioneiro, por volta de 1957.

SYNOPSIS – To insure slope stability in the escavated construction sites for the Spillways and the Discharge Channel, at Funil Dam – a part of the electric supply network of Furnas – Centrais Elétricas S. A. (Eletrobrás) – was a priority item to maintain work continuity in these areas.

In most cases slope stabilization was achieved through the use of thin reinforced concrete walls, deeply anchored in the subsoil by means of prestressed tie-backs.

Some of the local more outstanding projects are shown and the special design method, originally developed by our organization in 1957, is described.

## 1 – INTRODUÇÃO

Os trabalhos de escavação do terreno para preparo e início da execução das obras auxiliares à barragem Funil, como Vertedouro e Canal de Fuga, cortaram profunda e extensivamente a topografia original.

---

* Eng.º de Tecnosolo S. A.
– Professor do Instituto de Geociências da U.F.R.J.

Assegurar a estabilidade dos taludes que assim surgiam eram uma tarefa prioritária, tanto para o andamento das construções, como para a protecção, mais tarde, das obras acabadas.

Na escolha do tipo de contenção a executar para os taludes que, pela avaliação prévia de seu grau de estabilidade ou por evidências de campo, dela não prescindiam, intervieram, além dos factores básicos como tempo e custo, outros ligados à própria frente de trabalho de construção.

Era mister que a obra de contenção pròpriamente dita não representasse um volume adicional que interferisse no da obra hidráulica em construção; que pudesse, em alguns casos acompanhar o trabalho de escavação retido em seu andamento por instabilidade da superfície já escavada e, finalmente que não implicasse num aumento ou retomada dos serviços executados.

Por estas razões foi decidido o emprego, em várias locais, de cortinas delgadas de concreto armado, ancoradas profundamente no maciço por meio de tirantes protendidos.

O Aproveitamento Hidroeléctrico do Funil foi construído para Furnas – Centrais Elétricas S. A., que exercia a administração do canteiro de obras e a fiscalização técnica dos serviços.

O projecto da Barragem, dos Vertedouros e do Canal de Fuga foi preparado pela COBA – Consultores de Barragens e Aproveitamentos Hidráulicos S. A.

A construção da Barragem, do Canal de Fuga, da estrutura de entrada do Vertedouro da Margem Direita e da porção montante do Vertedouro da Margem Esquerda coube à firma Christiani-Nielsen – Engenheiros e Construtores S. A.; a ampliação da estrutura de saída do VMD, a modificação de sua secção de escoamento em túnel, as porções média e jusante do túnel do VME e a respectiva estrutura de saída, foram construídas pela firma Construtora Stenobras S. A.

Nossa organização exercia, no Aproveitamento, a Consultoria Geral de Geologia e Geotécnica; coube-nos preparar os projectos de contenção e os respectivos cálculos de estabilidade de taludes, excepção feita das cortinas do Canal de Fuga, onde o projecto final, baseado em ante-projecto de nossa autoria, foi preparado pela COBA, por envolver obra ligada ao regime hidráulico do rio.

## 2 – APRESENTAÇÃO GERAL DO PROBLEMA

A barragem do Funil e seus Vertedouros estão assentes sobre rocha sã, composta essencialmente por biotita-gnaisse fracturado.

Esta rocha é recoberta pelo seu próprio manto de alteração, que chega a atingir muitas dezenas de metros de espessura e cuja superfície exibe acidentada topografia local.

Não há uma interface nítida de separação entre o manto e a rocha matriz subjacente, e sim uma faixa de espessura variável onde está impressa a textura da rocha original, na que se nota uma consistência terrosa, quase friável.

Matacões de gnaisse ocorrem, preferencialmente, na base desta zona de transição.

Assim, do ponto de vista geotécnico, é possível reconhecer 3 (três) horizontes distintos: a rocha fracturada, a zona de transição e o manto.

Como os trabalhos de escavação promoveram, nas superfícies de corte, a exposição desses horizontes, os cálculos de estabilização de taludes realizados tomaram em consideração a natureza de cada um.

Um apoio decisivo para os cálculos foi fornecido pelo mapeamento geológico de superfície, que permitia determinar a estrutura rochosa, isto é, a geometria, o grau e o tipo de fracturamento incidente.

O programa de sondagens mistas, originalmente destinado à previsão dos volumes de escavação, foi aproveitado e em alguns casos ampliado, para um mapeamento geológico de sub-superfície, que capacitava avaliar antecipadamente os comprimentos dos tirantes, pela determinação da profundidade e forma do topo do núcleo de rocha competente.

Destacamos para apresentação neste trabalho, as contenções executadas para o Canal de Fuga, para o talude da ombreira direita adjacente à entrada do Vertedouro e para o emboque e desemboque do Vertedouro da Margem Esquerda.

## 3 – MÉTODO DE CÁLCULO UTILIZADO

Em todas as contenções realizadas foi utilizado o método de cálculo desenvolvido por nossa organização, em caracter pioneiro, por volta de 1957.

Podem-se dividir os processos de cálculo existentes em:

a) método de estabilidade externa

b) método de estabilidade interna

conforme a ruptura do conjunto cortina – solo – ancoragem se dê monolìticamente por deslizamento ao longo de uma superfície contínua (estabilidade externa, Fig. 1).

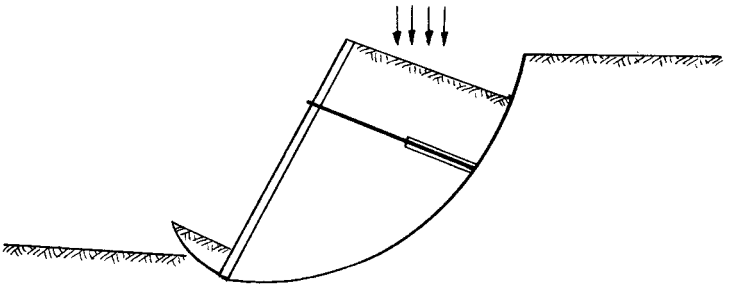


*Fig. 1*

ou por meio de uma rotação da cortina em torno do próprio pé, consequente do surgimento de uma superfície de ruptura entre o pé da cortina e a ancoragem, comportando-se, o solo acima, no estado plástico limite (estabilidade interna, Fig. 2).

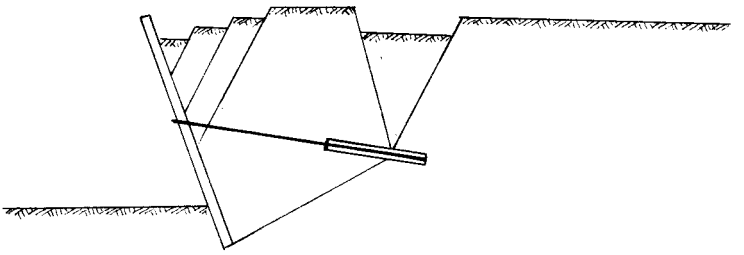


*Fig. 2*

As contenções devem òbviamente ser estáveis para ambas as hipóteses de ruptura.

Nossa organização adopta método de cálculo pertencendo à categoria a – comportamento monolítico do sistema – localizando-se o trecho de ancoragem dos tirantes além da superfície de escorregamento, imposta pelas características geotécnicas do material de talude e pelo coeficiente de segurança adoptado, da ordem de 1,5, verificando-se ainda a estabilidade interna.

Em síntese, a estabilidade do talude é aumentada pela introdução de uma força T, mobilizável, em conjunto com a resistência ao cizalhamento do material do talude, S, para o combate à força F de deslizamento ao longo da superfície K (Fig. 3), de comprimento

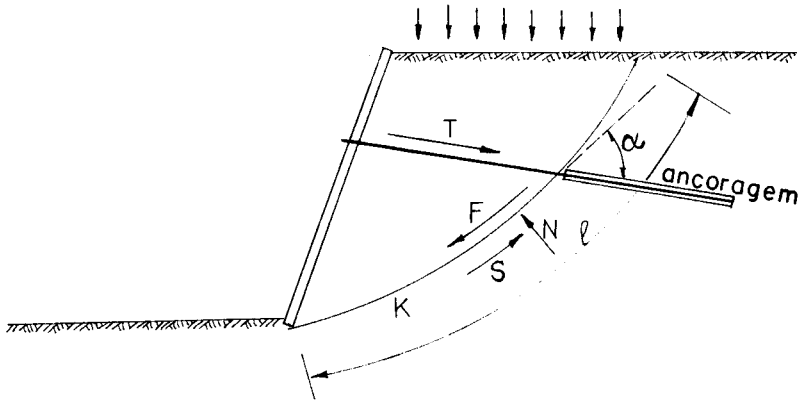



*Fig. 3*

Chamando o coeficiente de segurança inicial (sem ancoragem) de $\lambda_o$,

$$\lambda_o = \frac{S}{F} = \frac{N \operatorname{tg} \Phi + cl}{F}$$

onde $\Phi$ = ângulo de atrito interno

$c$ = coesão do material

e fixando o factor de segurança definitivo em $\lambda$, de expressão

$$\lambda_1 = \frac{S}{F - T \cos \alpha}$$

na qual se desprezou qualquer aumento em N, devido à presença do esforço T, teremos

$$T = \frac{F}{\cos \alpha} \left( \frac{\lambda_1 - \lambda_o}{\lambda_1} \right)$$

A ancoragem dos tirantes é obtida por meio de um chumbamento com aguada de cimento.

Para que se possa contar com força máxima disponível em T – em cada tirante o produto do $\sigma$ admissível do aço pela área de sua secção transversal – é necessário um comprimento adequado no trecho chumbado.

Este comprimento, chamado comprimento de ancoragem, é dimensionado pela NB-1, artigo 45, para a aderência barra/pasta de cimento; há que dimensioná-lo, também, para a aderência pasta/material de talude. Toma-se para valor de projecto o maior dos comprimentos calculados.

Como segurança adicional, tendo em vista a deformação lenta do material de talude, os tirantes são protendidos até um valor máximo 2T e em seguida aliviados até T, o que, embora represente uma protensão residual do material, não participa do cálculo de estabilidade. Essa protensão até 2T serve primordialmente como ensaio da boa qualidade das ancoragens.

O emprego de cortinas delgadas é comumente o mais indicado para taludes instáveis, criados por escavações recentes e onde se procura diminuir os volumes adicionais ocupados pelas obras auxiliares de construção.

## 4 – CORTINAS DO CANAL DE FUGA

Tratava-se, para este problema, de reproduzir *in situ* a forma da secção de escoamento do modelo hidráulico.

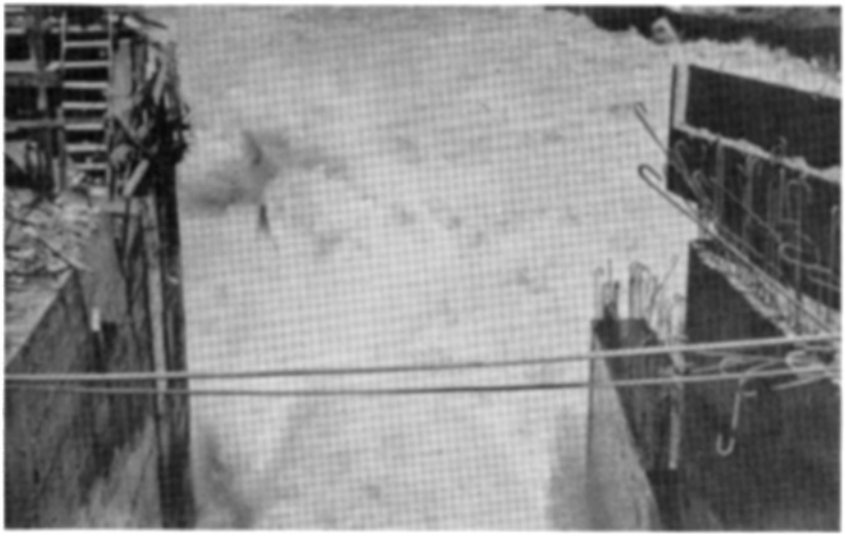
A escavação desta secção aprofundou e alargou o vale original do rio, influindo, como era inevitável, na estabilidade das vias de acesso que margeavam o Canal de Fuga, para as condições de esvaziamento rápido no canal (Foto 1).

*Foto 1*
*Outubro de 1968*

ESCAVAÇÃO DO CANAL DE FUGA
LARGURA: 40 m
EXTENSÃO: 200 m (aproximadamente)

Estas condições, que controlaram o cálculo de estabilidade das cortinas, prevaleceram severamente durante largo período, devido às alternâncias de fechamento e abertura da descarga de fundo da barragem (Fotos 2-A e 2-B).

A



B

*Fotos 2-A e 2-B*
*Junho de 1969*

CANAL DE FUGA
CORTINAS DURANTE ABERTURA DA DESCARGA DE FUNDO

Por serem delgadas, a espessura adicional representada pelas cortinas, muito pouco diminuia a largura de projecto, não havendo necessidade, portanto, de retomar o trabalho de escavação da rocha (Fotos 3 e 4).

*Foto 3*
*Dezembro de 1968*

CANAL DE FUGA
CORTINA DELGADA DA MARGEM DIREITA (em construção)
ESPESSURA: 25 cm

*Foto 4*
*Setembro de 1969*

CANAL DE FUGA
CORTINA DELGADA DA MARGEM DIREITA (acabada)

O topo da rocha sã (interface de separação entre a rocha e o leito de matacões, base da zona de transição) corresponde à superfície de escorregamento adoptada no cálculo.

Os tirantes foram, portanto neste caso, ancorados em rocha.

## 5 – VERTEDOURO DA MARGEM ESQUERDA

### EMBOQUE

O problema principal era assegurar a estabilidade da escavação do emboque do túnel em rocha sã fissurada, uma vez que o mapeamento geológico de superfície evidenciou a presença de uma família de diaclases sub-verticais de direcção ortogonal ao eixo do túnel e interseptada por outra, também sub-vertical, e cuja direcção formava com a anterior um ângulo de 60°

Era como se uma série de prismas de rocha compusesse a estrutura geológica na região do emboque.

O projecto aprovado, que garantiria a estabilidade da secção de escavação, consistiu num agrupamento de tirantes protendidos, de direcção próxima à do eixo do túnel e distribuidos em toda a orla de contorno da abóbada.

Uma placa delgada de concreto armado, cujo bordo inferior acompanhava o arco da abóbada a ser escavada, promovia a interligação entre as cabeças dos tirantes (Fotos 5, 6 e 7).

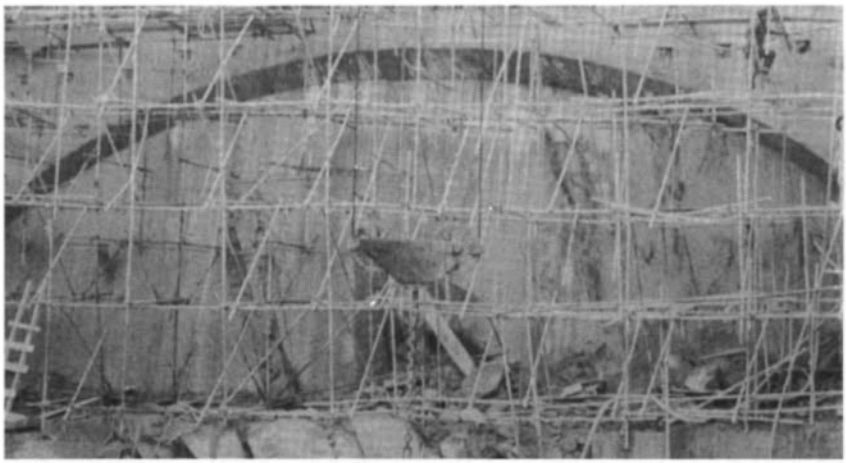


*Foto 5*
*Agosto de 1969*

VERTEDOURO DA M.E.
EMBOQUE
BORDA INFERIOR DA PLACA PROTENDIDA
ESPAÇAMENTO ENTRE TIRANTES: aproximadamente 1,00 m
COMPRIMENTO DOS TIRANTES: 12 metros em média

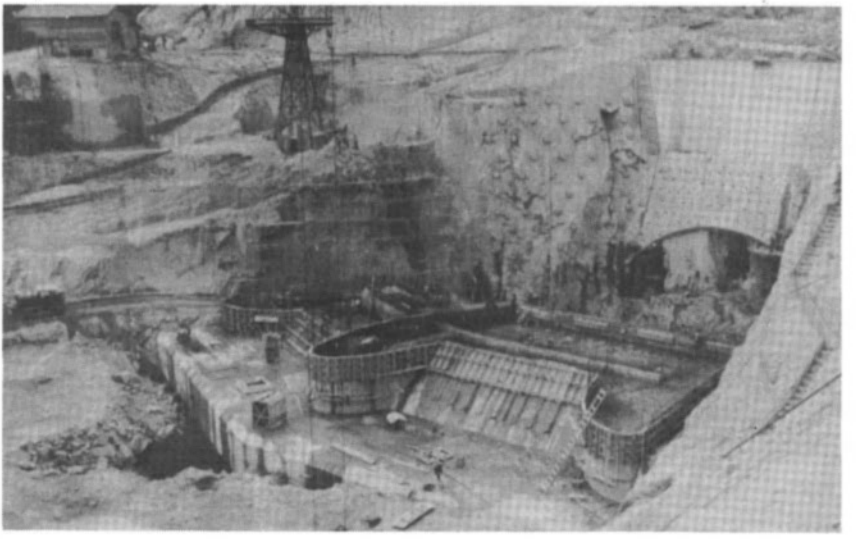


*Foto 6*
*Setembro de 1969*

VERTEDOURO DA M.E.
EMBOQUE
INÍCIO DA ESCAVAÇÃO DO TÚNEL GARANTIDA PELA ESTABILIZAÇÃO REALIZADA

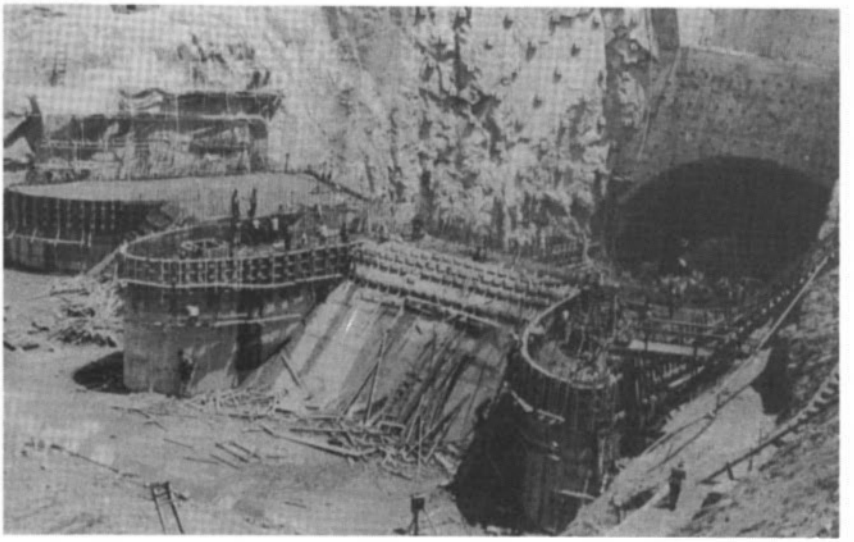


*Foto 7*
*Outubro de 1969*

VERTEDOURO DA M.E.
EMBOQUE
TÉRMINO DA ESCAVAÇÃO DO EMBOQUE (Notar, em comparação com Foto 6, progresso na concretagem da estrutura da entrada do Vertedouro, não perturbado pelos trabalhos de escavação)

Uma tentativa de embocar com a escavação, sem a execução da contenção aqui descrita, mostrou a necessidade de manter o projecto.

DESEMBOQUE

Durante a escavação do talude da margem direita, próximo à saída do túnel, houve ruptura de um volume de rocha e evidências de ruptura incipiente nos trechos adjacentes (Foto 8).

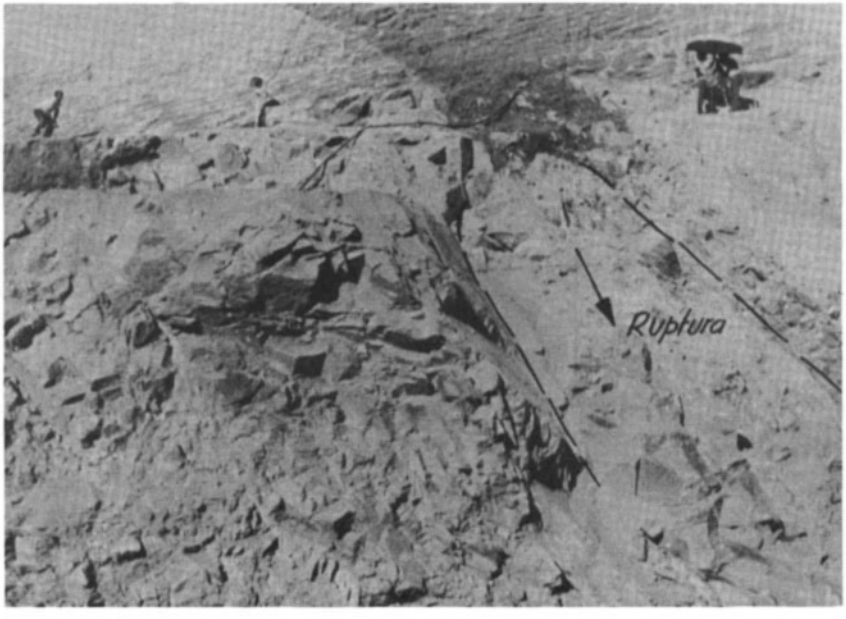



*Foto 8*
*Maio de 1969*

VERTEDOURO DA M.E.
DESEMBOQUE
RUPTURA DA MARGEM DIREITA DURANTE A ESCAVAÇÃO DO CANAL DE JUSANTE

Como a escavação devia prosseguir, afim de colocar a soleira na cota definitiva de projecto (restavam ainda, à época, 15 metros de rebaixo) exigia-se um tipo de contenção que pudesse acompanhar «pari-passu» a escavação, isto é, para cada estágio de rebaixo deveria estar assegurada a estabilidade do trecho sobrejacente (Foto 9).

É claro que o cálculo de estabilidade foi realizado para o talude total, correspondente à soleira na cota final, tendo em vista a preservação do próprio canal.

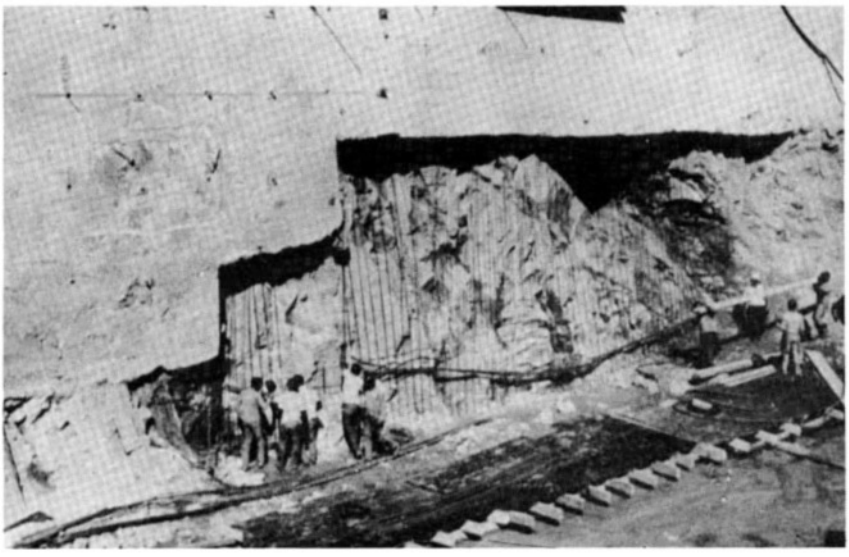


*Foto 9*
*Julho de 1969*

VERTEDOURO DA M.E.
DESEMBOQUE
PROSSEGUE O REBAIXO DA SOLEIRA DO CANAL APÓS ASSEGURADA A ESTABILIDADE DO TRECHO DE TALUDE SOBREJACENTE

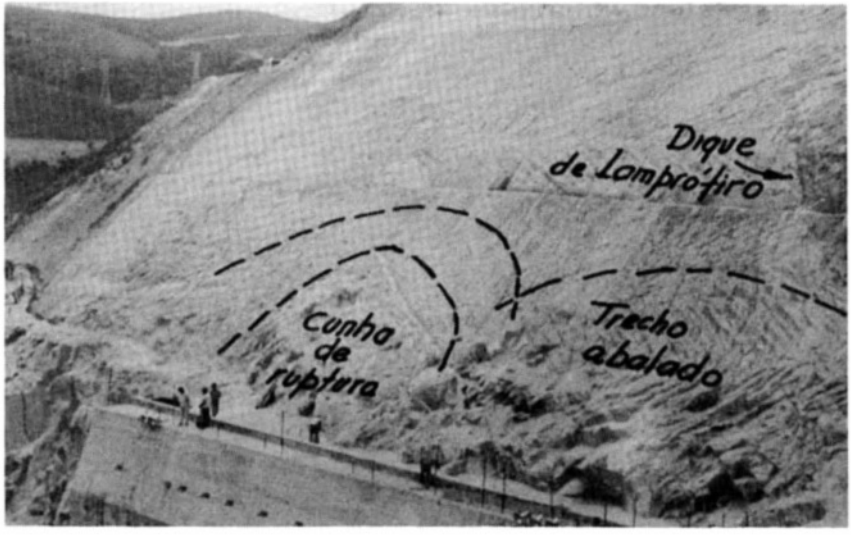



*Foto 10*
*Junho de 1969*

VERTEDOURO DA M.E.
DESEMBOQUE
CUNHA DE RUPTURA E TRECHO ABALADO TERMINAM NO CONTACTO GNAISSE/LAMPROFIRO

O exame geológico de superfície, após a ruptura havida, revelou que um volume de rocha fracturada, muito maior que o correspondente à cunha teórica de deslizamento, fora mobilizado e que o limite da zona abalada se estendia até à superfície de contacto do gnaisse com um dique de lamprófiro (Foto 10)

Como o lamprófiro não participava do fissuramento do gnaisse, o plano que lhe correspondia (o dique era quase vertical e de espessura da ordem de 2,00 metros) foi tomado como plano de escorregamento para as secções mais elevadas da cortina de contenção, que se executava por estágios descendentes.

## 6 – VERTEDOURO DA MARGEM DIREITA (OMBREIRA DIREITA)

Tratava-se do problema de proteger permanentemente a entrada do Vertedouro da Margem Direita, contra a possibilidade de ruptura do talude da ombreira, que épocas anteriores mostrara, por duas vezes, evidências de instabilidade.

O cálculo da sobrepressão resultante de um esvaziamento do reservatório, mais rápido que a capacidade auto-drenante do material do talude, mostrou a necessidade de contenção.

Sobre este assunto foi apresentado um trabalho pelos Eng.os Marnio Everton Camacho e Samuel Hugo de Resende, sob o título «ESTABIIZAÇÃO DO TALUDE DA OMBREIRA DIREITA DA BARRAGEM DO FUNIL» para o V Simpósio de Grandes Barragens em 1969, revelando a preocupação que sempre causou essa encosta.

A modificação do projecto do Vertedouro e a possiblidade de empregar tirantes de maior capacidade que a dos existentes na época do trabalho retromencionado, provocaram uma retomada do problema.

Determinada a posição do topo da rocha sã, conclui-se que a direcção do deslizamento provável seria para montante (dedução consentânea com as rupturas incipientes anteriormente observadas).

De uma comparação de custos foi decidida que a contenção, fosse realizada empregando-se cortinas delgadas de concreto armado, ancoradas em rocha sã por meio de tirantes protendidos e orientados segundo a direcção do deslizamento provável (a 45° com a direcção de inclinação do talude escavado). (Fotos 11, 12, 13 e 14).

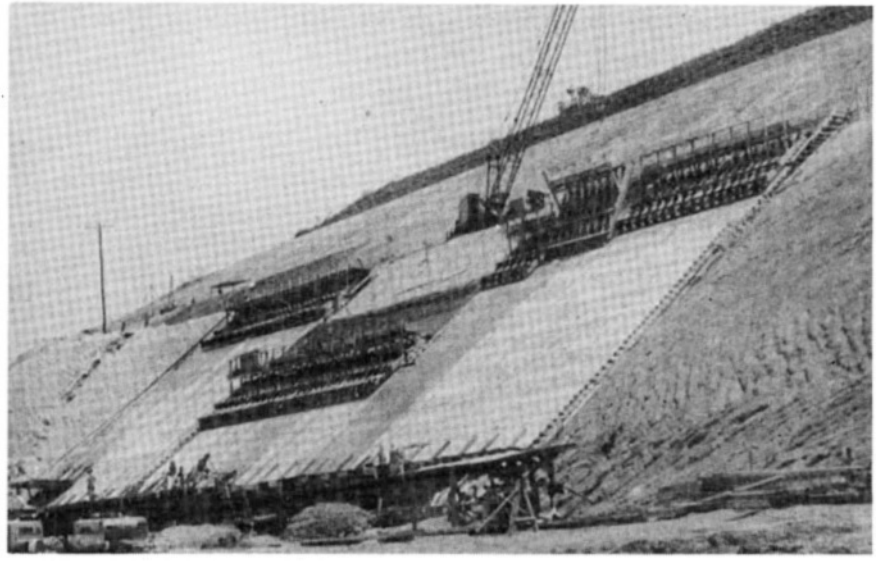


*Foto 11*
*Outubro de 1969*

VERTEDOURO DA M.D.
OMBREIRA DIREITA
CONSTRUÇÃO DA CORTINA DELGADA, DESPREZANDO FORMAS DESLIZANTES (Construtora: Stenobras, S. A.)

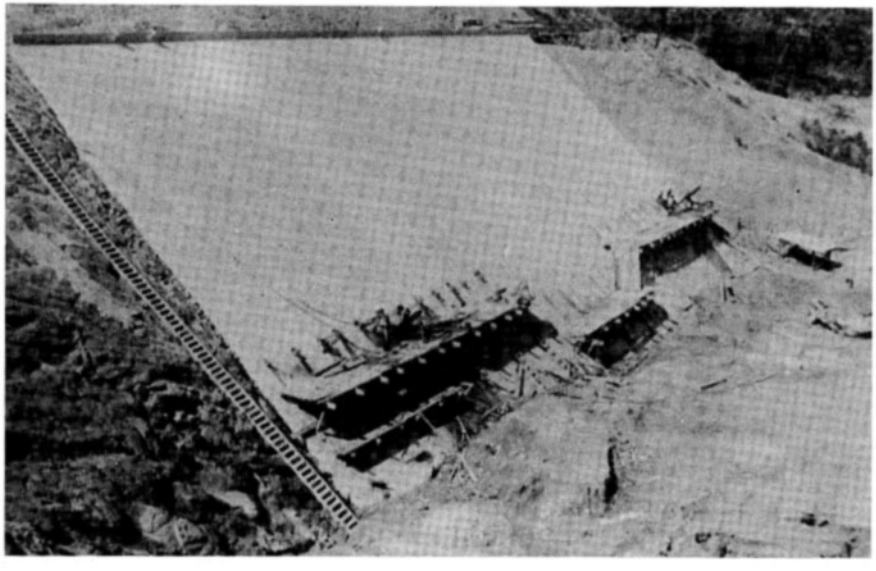


*Foto 12*
*Novembro de 1969*

VERTEDOURO DA M.D.
OMBREIRA DIREITA
INÍCIO DA PERFURAÇÃO PARA DISCORAGENS DOS TIRANTES

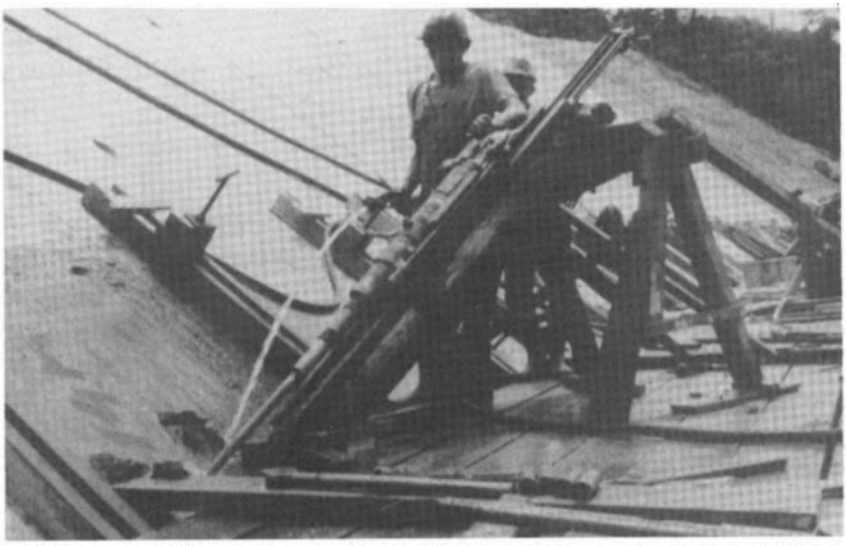


*Foto 13*
*Dezembro de 1969*

VERTEDOURO DA M.D.
OMBREIRA DIREITA
PERFURATRIZ A PERCUSSÃO EM POSICIONAMENTO
NOTAR DIRECÇÃO DE PERFURAÇÃO EM RELAÇÃO À DA INCLINAÇÃO DA CORTINA

*Foto 14*
*Dezembro de 1969*

BARRAGEM DO FUNIL E VERTEDOURO DE M.D.
CORTINA PROTEGE ENTRADA DO VERTEDOURO

## 7 – AGRADECIMENTOS

O autor dirige os seus agradecimentos ao Eng.º A. J. da Costa Nunes pelas sugestões incluidas neste trabalho.

Como membro da equipe de Consultoria Geral de Geologia e Geotécnica da Barragem do Funil, nossos agradecimentos são dirigidos à Furnas-Centrais Elétricas, S. A., concessionária do Aproveitamento, e cujo corpo técnico orientou, colaborou e apoiou os estudos de estabilidade de taludes realizados.

Somos ainda gratos à COBA pelo amparo técnico aos projectos elaborados, e às firmas construtoras Christiani-Nielsen e Stenobras pelas sugestões e ajuda recebidas.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CAMACHO, Marnio E. de A. e REZENDE, Samuel H. – Estabilização da Ombreira Direita da Barragem do Funil. V Seminário Nacional de Grandes Barragens. Brasil, 1968.

COSTA NUNES, A. J. e VELLOSO, Dirceu Alencar – Estabilização de Taludes em Capas Residuais de Origem Granito-Gnáissica. II Congresso Pan-Americano de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações. Brasil, 1963.

RANKE, Arnun e OSTERMEYER, Helmuth – Contribuição sobre a pesquisa de Estabilidade de Cortinas de Contenção de Cavas com Ancoragens Múltiplas. Trad. de A. J. da Costa Nunes. 1968.

SERAFIM, J. Laginha e COSTA NUNES, A. J. – Studies of dam foundations under a residual cover. I Congresso de Lisboa. Lisboa, 1966.