

ESTUDOS E DIAGNÓSTICOS PARA A RESTAURAÇÃO DA BARRAGEM DO RIO DAS PEDRAS

Eng^o Roberto Bertolozzi

Eng^o René J. Zalsupin

Eng^o Ikuyo Akamine

Geól. Sohrab Shayani

Eng^o Ivo Assad Ibri

HIDROSERVICE Engenharia Ltda.

RESUMO

O presente trabalho tem por objetivo apresentar o estudo desenvolvido pela HIDROSERVICE, para diagnosticar as condições das estruturas da Barragem do Rio das Pedras, que faz parte do sistema Billings, da ELETROPAULO, construída na década de 1920 e rever as suas condições de segurança.

Neste trabalho a abordagem foi concentrada apenas na área de estruturas, apresentando também as investigações realizadas no campo e suas análises em conjunto com o cálculo estrutural efetuado a partir dos resultados obtidos nos ensaios de testemunhos retirados do corpo de concreto e da fundação.

1. HISTÓRICO

1.1 Introdução

A barragem do Rio das Pedras faz parte do sistema de reversão do Rio Grande (Bacia do Rio Tietê) para a Bacia do Rio Cubatão, obra realizada em inícios de 1900 visando a geração de energia nas usinas de Cubatão.

O reservatório principal deste sistema é o Billings, formado pelo barramento do Rio Grande. A partir deste reservatório e através do Canal Billings, a água destinada à geração é encaminhada ao reservatório de Pedras, onde nascem as tubulações forçadas de Cubatão. Desta forma, o reservatório de Pedras cumpre a função de câmara de carga para a central.

No decorrer dos anos o sistema foi objeto de diversas modificações visando o aumento da geração e abastecimento de água. Assim, foram construídas obras como a usina elevatória de Traição, a reversão do Rio Pinheiros, o desvio d'água do reservatório de Guarapiranga, a instalação de bombas na barragem do Rio Grande, a instalação de estações de captação para abastecimento de água, o barramento do braço do Rio Grande para proteger os mananciais do ABC, etc.

Do ponto de vista do controle de enchentes e proteção das obras, foram previstos diversos extravasores e/ou formas de operar em face das cheias previstas nos diversos pontos da bacia.

1.2 Barragem do Rio das Pedras

A Barragem do Rio das Pedras, com 35 m de altura máxima e 173 m de comprimento de crista foi construída durante os anos de 1926 a 1928, estando localizada junto às escarpas da Serra do Mar e a montante da cidade de Cubatão.

A estrutura consta de um maciço de concreto em arco gravidade com um sistema extravasor composto de três comportas tipo vagão medindo 1,99m x 1,98m, com descarga máxima teórica de 84 m³/s para o nível do reservatório na cota 728,50 m.

Os descarregadores são do tipo orifícios vertedouros de fundo, retangulares, com controle de vazão (comportas deslizantes - "sluices-gates") com soleira de comporta na cota 721,18 m e o topo na cota 723,16 m. A prática atualmente adotada é que sua utilização somente se faça em casos de emergência com o objetivo de proteção das estruturas.

Originalmente a Barragem do Rio das Pedras havia sido projetada como tipo gravidade, curva no plano em razão da topografia e de centro constante. A seção projetada triangular inicialmente com inclinação de 0,70:1 a partir da cota 727,00 m permitia uma base de 18,55m de largura. Posteriormente, na fase de execução, o projeto foi alterado, utilizando-se do efeito arco usando-se a mesma inclinação, porém a partir da cota 723,00m, passando a base a possuir 15,75 m de largura, com uma economia de 40% do volume de concreto.

A complementação da altura da Barragem foi feita com um "corewall" de 2 m de largura.

As comportas instaladas na Barragem do Rio das Pedras foram poucas vezes abertas principalmente em razão dos Sangradouros Pedras-Perequê e Pequeno Perequê, que sempre eram acionadas em caso de necessidade.

A Barragem do Rio das Pedras, com a Barragem do Córrego da Cascata, o Dique do Córrego da Cascata e o Sangradouro Pedras-Perequê, formam o Reservatório do Rio das Pedras, com capacidade total de $50 \times 10^6 \text{ m}^3$ e é alimentado pelo Reservatório Billings. Na cota máxima de operação 728,30 m, forma uma superfície de $7,65 \text{ km}^2$.

Em termos hidráulicos, os problemas não estão restritos a esta única estrutura. Envolve a capacidade de descarga do Reservatório Billings e transporte dessas descargas a jusante.

1.3 Projeto da Barragem do Rio das Pedras

Na época de elaboração do projeto e da construção da Barragem, isto é, 70 anos atrás, não estavam disponíveis o conhecimento e a metodologia hoje empregados rotineiramente na implantação de barragens. Esta falta reflete principalmente nos campos de Mecânica dos Solos, Mecânica das Rochas e de Geologia de Engenharia. Devido a este problema os estudos de fundações e das ombreiras da Barragem não foram acompanhados por testes e ensaios para fornecer os parâmetros geotécnicos e geomecânicos.

As poucas descrições da geologia local e das superfícies de escavações, registradas pelos consultores que visitaram o local, são contraditórias e diferentes conforme a época de execução das várias etapas de serviço.

Embora a história da engenharia contenha um considerável número de exemplos de barragens em arco, nota-se que estas obras foram construídas em gargantas estreitas, com o emprego de alvenaria de pedras.

Um esforço pioneiro, visando a viabilização do emprego de concreto com a imprescindível análise de tensões no corpo da estrutura, data de 1923 sendo da autoria do US Bureau of Reclamation.

Uma vez que a Barragem do Rio das Pedras foi construída nos anos 1926 a 1928, uma menção especial cabe aos engenheiros da LIGHT que na época projetaram esta obra, pelo grau de atualização profissional e pela capacidade analítica de modelagem e solução manual de um elevado número de equações de compatibilidade do tipo que o método "Trial Load" torna extremamente trabalhoso.

O cálculo estrutural da barragem em arco gravidade foi elaborado através da análise de tensões através de um método suíço semelhante ao mais difundido método de "Trial Load".

O método de "Trial Load" consiste em subdividir a estrutura em arcos horizontais e consolos verticais, e estas duas classes de componentes estruturais colaboram na repartição das cargas.

A distribuição da pressão hidrostática entre os arcos e os consolos é feita de maneira a resultar em deslocamentos iguais nos pontos de interseção dos dois elementos e, assim, as tensões em qualquer seção do arco ou do consolo podem ser determinadas.

Na sua forma tradicional, desenvolvida para aplicação manual, a compatibilidade de deslocamentos era conseguida pela sucessiva aplicação de diferentes distribuições de cargas nos arcos e consolos até atingir o ajuste desejado (vindo daí a denominação "Trial Load" ou Tentativa de Carga).

Na implementação do método em computador, pela HIDROSERVICE, adotou-se uma solução direta (não iterativa). Para possibilitar esta nova abordagem, desenvolveu-se um sistema matricial de equações para os arcos e consolos, que inclui a consideração de apoios elásticos. Toda formulação empregada foi desenvolvida com base em integração analítica (evitando-se o recurso de integração numérica), o que representa, acreditamos, um trabalho original, visto não termos encontrado esta formulação em nenhuma bibliografia.

Uma vez montadas as equações de compatibilização de deslocamentos, a solução final restringe-se à resolução do sistema linear para obtenção dos deslocamentos, e, a partir destes, do campo de tensões.

O programa, tal qual foi desenvolvido, possibilitará futuras implementações, visto estar baseado em uma solução mais genérica, além de propiciar considerável economia de tempo de processamento em comparação à resolução com o processo iterativo.

1.4 Análise das Condições de Segurança

A segurança de antigas barragens, que ainda permanecem em serviço, tem merecido, em diversos países, a atenção das autoridades responsáveis por sua manutenção e operação.

De forma genérica, podemos enumerar os seguintes aspectos que podem afetar a segurança de uma barragem:

- Deterioração dos materiais da estrutura.
- Deterioração dos materiais da fundação.
- Alteração das condições de solicitação, como modificações nas condições hidrológicas e/ou alteração na operação do reservatório.

- Deterioração de dispositivos, tais como drenos, filtros de água de percolação, etc.

Na análise destes aspectos, utilizando-se as recomendações nacionais e internacionais referentes a este tipo de problema e os procedimentos internos da HIDROSERVICE, foram realizadas verificações quanto à resistência dos materiais e estabilidade da estrutura e das fundações, à luz de critérios de segurança atualizados.

No caso da Barragem do Rio das Pedras, um aspecto a ser considerado em conjunção com a deterioração dos materiais é a situação geográfica da Barragem. Estando localizada nas escarpas da Serra do Mar, uma região reconhecidamente sujeita a escorregamentos, foram verificadas as encostas na área da Barragem.

2. PROGRAMA DE INVESTIGAÇÃO

Dando início aos estudos para diagnóstico e caracterização de possíveis obras na Barragem do Rio das Pedras e estruturas de jusante, foi executada uma coleta de documentos, fotos, desenhos e outros dados existentes, para obter todas as informações que fossem úteis ao desenvolvimento do estudo em todos os setores envolvidos.

Por se tratar de uma obra muito antiga não foi possível encontrar desenhos e memórias do projeto.

Após o exame dos dados coletados e existentes constatou-se a insuficiência de informações técnicas contidas nos documentos disponíveis, e, por esta razão, foi proposto um programa de investigações, ensaios, testes e levantamentos para dirimir as dúvidas existentes e permitir a determinação dos parâmetros necessários à definição das condições atuais da Barragem do Rio das Pedras.

O programa de investigações da estrutura e da fundação da Barragem consistiu em serviços de campo e de ensaios de laboratório.

- Topografia - para determinação da geometria atual do paramento de jusante da Barragem, localizando as seções onde seriam executadas as sondagens.
- Batimetria a montante da Barragem - para determinação das áreas assoreadas, do formato do paramento de montante e da superfície de contato concreto/rocha, para fornecer subsídios para verificações analíticas e o comportamento estrutural da obra.
- Investigações geológicas - o programa foi elaborado para o reconhecimento das condições reais das fundações, das ombreiras e da própria Barragem do Rio das Pedras, e constou essencialmente da execução de sondagens rotativas, extração de testemunhos de concreto e de rocha e da execução de ensaios de perda d'água para caracterizar a permeabilidade dos trechos atravessados.
- Tecnologia das estruturas de concreto - extração de testemunhos e ensaios para caracterizar os concretos quanto aos aspectos elásticos e de ruptura, e também proporcionar um juízo sobre sua durabilidade e possíveis medidas corretivas a serem adotadas.

Para execução de investigações de campo e ensaios de laboratório foram apresentadas as correspondentes especificações técnicas.

Na área de tecnologia de concreto foram elaboradas especificações técnicas para instalação de aparelhos de instrumentação que constituem o plano de auscultação da estrutura em serviço, abrangendo a medição de deformações específicas através de extensômetros para concreto instalados em diversas cotas de alguns furos de sondagens, piezômetros pneumáticos instalados através daqueles furos nos contatos concreto/rocha, bases para clinômetros de bolha instaladas na crista e no corpo da Barragem e medidores de deslocamentos montante-jusante que utilizam fios de invar associados a relógios comparadores.

3. ANÁLISE PRELIMINAR DA ESTRUTURA

O objetivo do cálculo preliminar da estrutura foi a determinação, em uma análise matemática, do estado de tensões e dos deslocamentos da Barragem.

Quanto às dimensões e medidas utilizadas no cálculo, na ausência de uma geometria confiável da estrutura, foram aproveitados os elementos e dados geométricos constantes nos desenhos existentes.

Para os parâmetros característicos do concreto e da rocha, como módulo de elasticidade, coeficiente de Poisson, etc., desconhecendo-se o valor dos mesmos, foi feita uma avaliação baseada no exame visual dos testemunhos existentes, ensaios geomecânicos dos mesmos, na idade da estrutura e na experiência dos técnicos envolvidos no estudo.

Nesta análise matemática preliminar, utilizando o método dos elementos finitos tridimensional, foram também verificadas as variações dos valores das tensões e dos deslocamentos, devidos a um rebaixamento do nível d'água do reservatório de 6,0 metros.

Estas verificações, ainda que baseadas sobre hipóteses teóricas com relação aos parâmetros característicos do concreto da Barragem, tiveram por objetivo fornecer ao setor da Tecnologia do Concreto da HIDROSER-

VICE, dados necessários para definir o grau de sensibilidade dos aparelhos a serem utilizados nas fases de investigações, de ensaios e de instrumentação no corpo da barragem.

4. ANÁLISE DAS INVESTIGAÇÕES

- Levantamento topobatimétrico

Nos levantamentos topobatimétricos foram obtidos os dados necessários para verificações analíticas do comportamento estrutural da obra, assim como a área de depósito de sedimentos junto à parede de montante. Foram executados também o levantamento cadastral da estrutura da Barragem e o levantamento planialtimétrico da área das ombreiras e da parte de jusante da Barragem.

- Sondagens rotativas e ensaios de perda d'água

Foram executadas sondagens ao longo e a jusante da Barragem e nas duas ombreiras.

Pela análise dos resultados de cada sondagem foi possível caracterizar qualitativamente as condições dos materiais em cada área perfurada e foram elaborados desenhos das seções geológicas mostrando a qualidade do concreto, da rocha e dos contatos.

Estas seções confirmaram, em parte, alguns dados anteriores e também novas posições que não eram conhecidas por falta de desenhos da época da construção da Barragem.

- Investigações geológicas

Após a classificação de amostras de sondagens, foram selecionados trechos representativos dos testemunhos e enviados ao laboratório para execução de uma série de ensaios físico-químicos, petrográficos e de mecânica das rochas.

Após a análise dos resultados de ensaios e a obtenção de médias de valores físicos e geomecânicos, foi possível a revisão dos dados anteriormente estimados para os cálculos de verificação da estabilidade das estruturas, substituindo-se os valores anteriores por outros com maior semelhança com aqueles dos maciços rochosos.

A reconstituição dos ensaios geológicos possibilitou juntamente com os levantamentos topográficos, um conhecimento mais realista da configuração da geometria da estrutura, bem como do nível e da forma dos contatos concreto/rocha das fundações.

- Tecnologia de concreto

Os ensaios de absorção d'água nos testemunhos extraídos do corpo da Barragem evidenciaram valores compreendidos entre 3,4% e 8,6%, média aritmética 5,53% e desvio padrão de 1,20%, com forte correlação com o índice de vazios e massa específica.

A resistência à compressão obtida dos testemunhos apresentou resultados situados entre 14,5 MPa e 50,6 MPa com média aritmética de 28,7 MPa e desvio padrão de 6,9 MPa.

A resistência à tração por compressão diametral oscilou entre 1,9 MPa e 5,7 MPa, apresentando média aritmética de 3,1 MPa e desvio padrão de 0,7 MPa.

De uma vez, o módulo de deformação longitudinal à compressão, variou de 8,3 GPa a 21,7 GPa, com média aritmética de 14,4 GPa e desvio padrão de 3,3 GPa.

Esta amplitude relativamente grande em que se situam os resultados, acompanha a heterogeneidade registrada nos ensaios de absorção e teor de vazios, além da faixa de variação do consumo de cimento de cada concreto oscilando entre 190 kg/m³ e 489 kg/m³ e desvio padrão de 70,3 kg/m³.

Estes resultados dos ensaios tecnológicos realizados nos testemunhos extraídos, associados à inspeção visual da Barragem, confirmam o seu estado geral satisfatório, requerendo somente serviços de manutenção.

5. ANÁLISE ESTRUTURAL DA BARRAGEM

Com base nos dados obtidos através das investigações e dos ensaios no corpo da Barragem foi efetuado um novo cálculo estrutural.

Este cálculo uma vez que utilizava os dados referentes às características físicas dos materiais obtidos pelos ensaios, bem como a configuração geométrica da Barragem definida pelas investigações topobatimétricas, que, no cálculo preliminar, foram estimadas com os dados existentes, retrata melhor as condições de sollicitação na estrutura em serviço.

O cálculo foi efetuado através do método dos elementos finitos tridimensional; pelo fato da Barragem ser em arco gravidade a estrutura trabalha nas três dimensões, não admitindo nenhum tipo de simplificação do modelo estrutural. Além disso, deveria ser levada em consideração a fundação para conhecer a estabilidade da estrutura.

No cálculo foram considerados os carregamentos atuantes na estrutura em serviço, como pressão hidrostática, subpressão e gradiente térmico.

Na discretização do modelo estrutural foi levada em consideração a variação da rocha ao longo da fundação da Barragem e também ao longo da profundidade conforme as características geomecânicas verificadas nas amostras.

6. DIAGNÓSTICO DAS CONDIÇÕES DAS ESTRUTURAS

Na inspeção visual à Barragem, identificou-se a metodologia construtiva em camadas horizontais sucessivas, estando a superfície de jusante impregnada de limo e vegetação, com sinais de vazamentos com lixiviação de cal liberada na hidratação do cimento e locais onde já se efetuaram, anteriormente, reparos.

O programa de ensaios desenvolvidos nos testemunhos extraídos permitiu identificar algumas juntas de concreto horizontais com descontinuidade na aderência entre camadas sucessivas de concretagem; locais com segregação e evidência de lixiviação de cal.

De imediato, os resultados das propriedades mecânicas dos concretos permitiram subsidiar os cálculos estruturais efetuados, além de confirmar valores satisfatórios para o desempenho da estrutura.

Os resultados obtidos dos cálculos estruturais, em termos de tensões na Barragem, estão dentro dos limites admissíveis do concreto, conforme os resultados dos ensaios efetuados.

Em termos de estabilidade, foram observadas algumas tensões de tração na base da Barragem na região do dente a montante, mas de valores baixos e apenas numa pequena região central da Barragem, portanto, dentro das considerações feitas de subpressão e do modelo de cálculo, pode ser considerado satisfatório.

Após a execução das sondagens rotativas notou-se que o contato concreto/rocha, em geral, é de boa qualidade e na maior parte é impermeável.

Verificou-se que as escavações das fundações alcançaram rocha sã, embora fraturada e o concreto foi lançado sobre superfície limpa, proporcionando boa aderência.

No maciço rochoso das fundações, notou-se ocorrência de segmentos isolados de material muito alterado e/ou muito fraturado que seriam causas de caminhos preferenciais de percolação d'água.

7. CONCLUSÕES

No corpo da Barragem, para proteger a superfície de concreto, e conferir longevidade complementar para continuidade de operação da estrutura, cumpre estudar a sua impermeabilização, através de revestimentos e injeções.

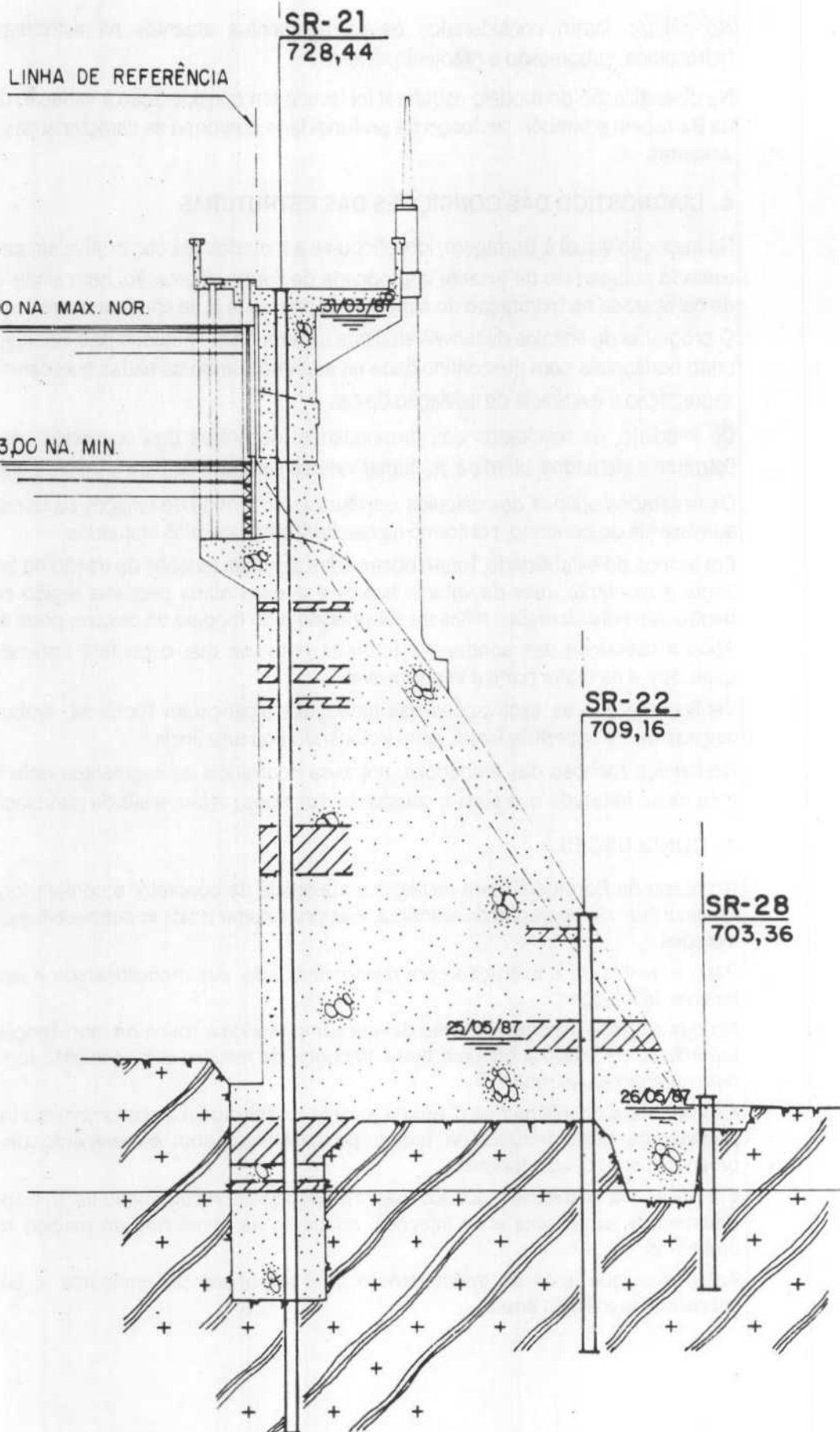
Para as juntas de construção com descontinuidade, sua monoliticidade e estanqueidade serão conferidas através de injeções.

No que respeita à instrumentação deverá ser cumprida a rotina de manutenção conforme as especificações fornecidas, de modo a ter uma boa campanha de leituras que possibilite fornecer as informações sobre o desempenho da estrutura.

As evidências de infiltrações d'água a jusante da Barragem e nas ombreiras indicam indícios de percolação permanente pelas fraturas da rocha, possivelmente com carreamento de algum material argiloso de preenchimento destas fraturas.

Em vista dos resultados obtidos nas investigações, recomendou-se a elaboração de um programa de tratamentos superficiais e de injeções, adaptado às condições do maciço rochoso das fundações e das ombreiras.

Acredita-se que após os tratamentos e com a manutenção periódica, a Barragem possa alcançar uma sobrevida de mais 50 anos.



SEÇÃO GEOLÓGICA TRANSVERSAL

HIDROSERVICE ENGENHARIA DE PROJETOS LTDA

BARRAGEM RIO DAS PEDRAS - CALCULO ESPACIAL

21/ 10/ 91 93 14. 97

DEFORMADA EM CORTE DO CARREGAMENTO 4

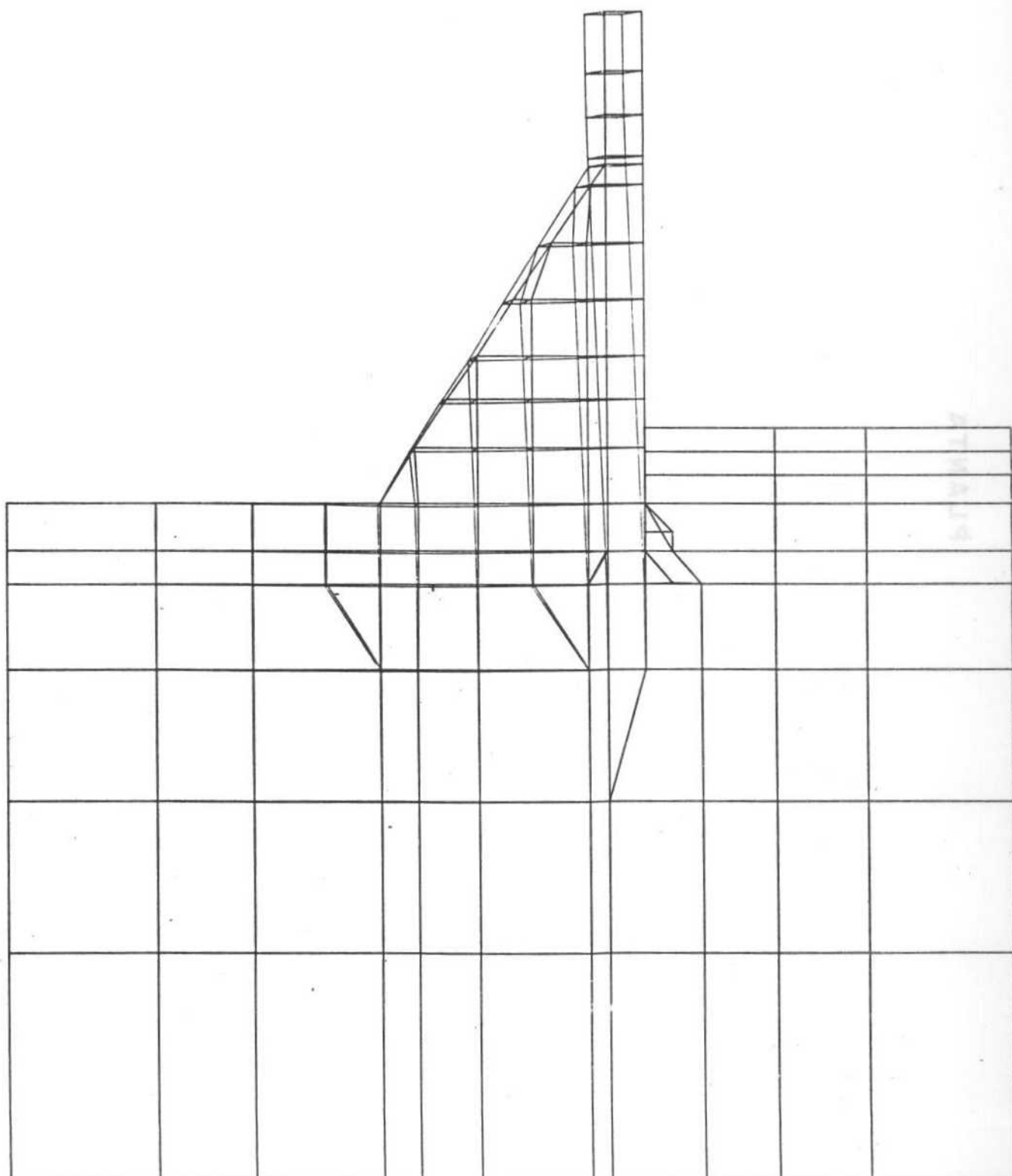
57 g

ESCALA GEOMETRICA

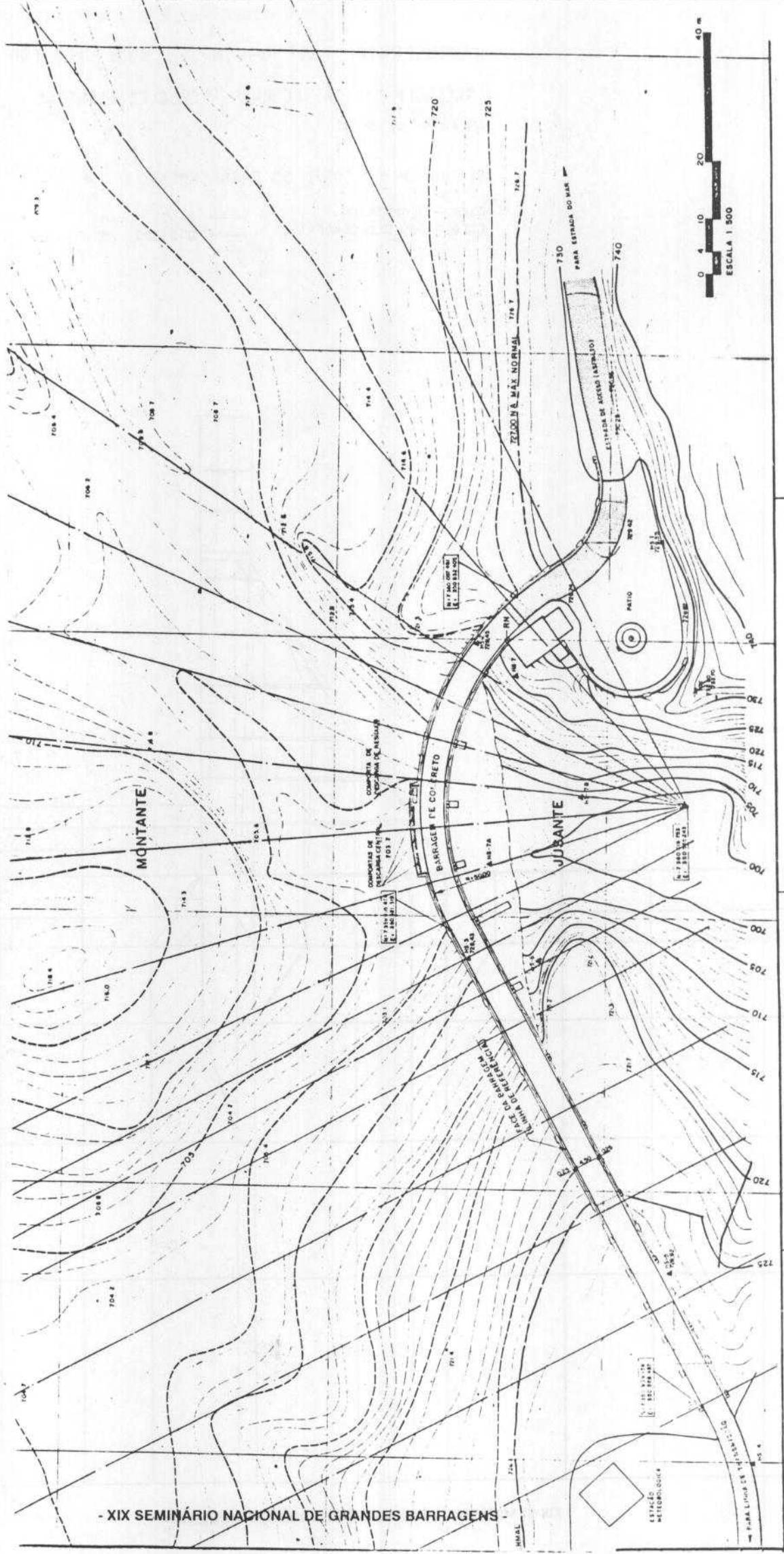
2.000 M

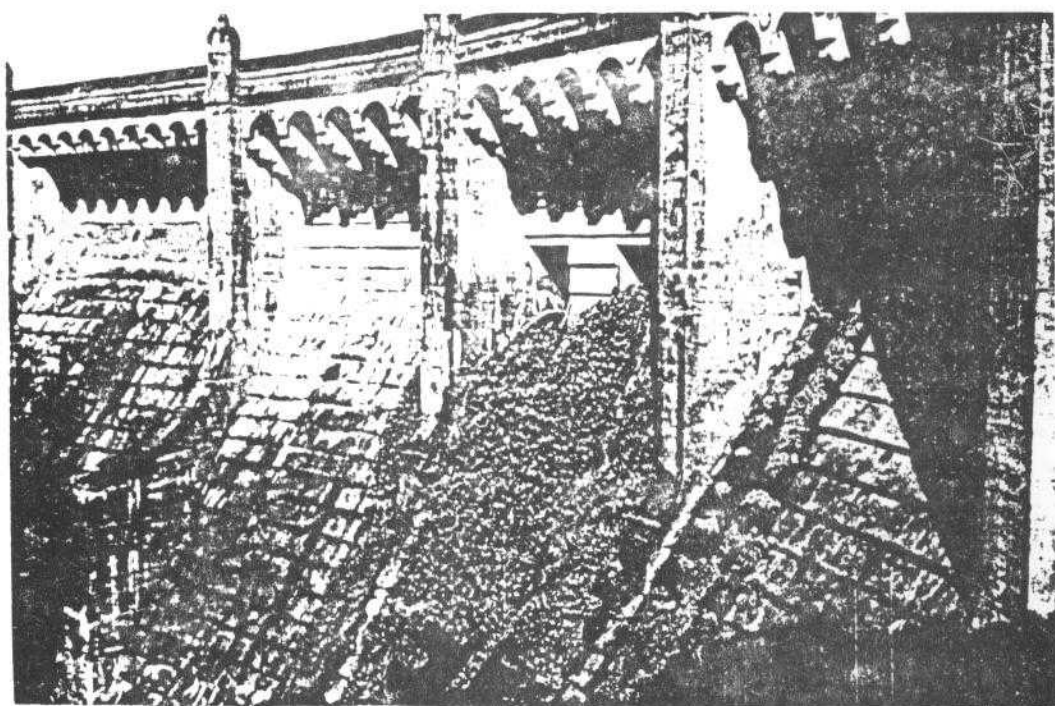
ESCALA DOS DESLOCAMENTOS

0.00200 M

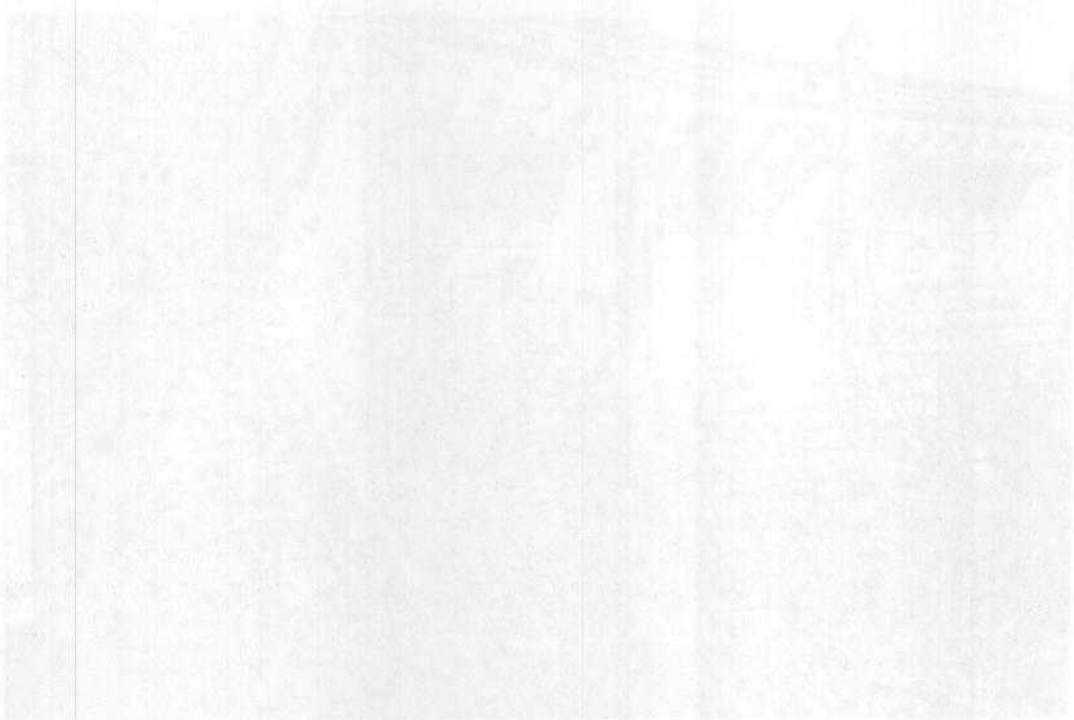


PLANTA





Vista de Jusante da Barragem



Page 10 of 10