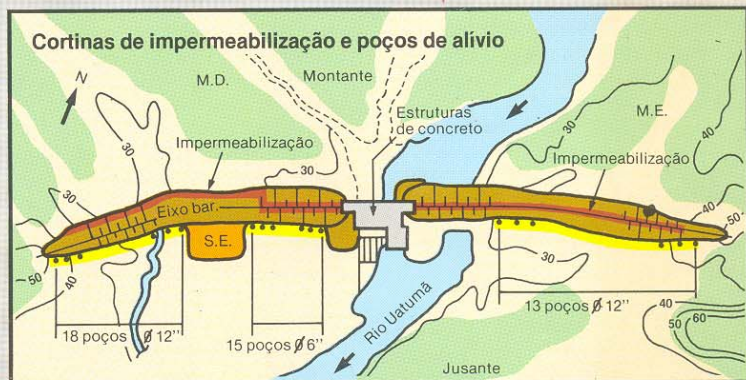


*A. de Mello*

Balbina

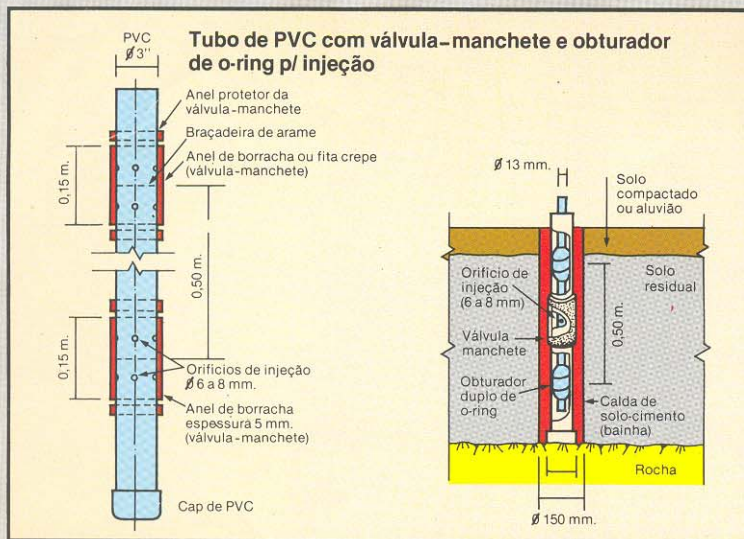
## Técnica usada na injeção reduz a permeabilidade do solo residual\*



**A presença de pontos localizados de alta permeabilidade nas fundações da barragem de terra de Balbina gerou a necessidade de investigações especiais de subsolo, as quais identificaram a presença de séries de famílias de cavidades tubulares abertas - canaliculos. O tratamento dos canaliculos pelo fraturamento hidráulico do terreno e seu preenchimento com calda de cimento-argila foram realizados com sucesso, a partir de metodologia desenvolvida durante os próprios serviços. A perfuração da malha de poços de alívio à jusante da seção da barragem foi executada com equipamento desenvolvido na obra.**

\* Texto baseado no trabalho "O tratamento de solos residuais condicionados por canaliculos: um caso de obra", de autoria de Luiz Guilherme F. S. de Mello, de Victor F. B. de Mello & Associados, Cláudio Herkenhoff, da Eletronorte, e Joaquim Monteiro M. Franco Filho e Carlos Alvise, da Andrade Gutierrez. Este trabalho foi publicado na Conferência Ibero-Americana de Aproveitamentos Hidráulicos, em Lisboa, Portugal, junho de 1987.





A Usina Hidrelétrica de Balbina situa-se no rio Uatumã, afluente da margem esquerda do rio Amazonas, a aproximadamente 170 km a nordeste de Manaus, Estado do Amazonas. A potência instalada será de 250 MW. A obra compõe-se de barragem de terra de 2,9 km de extensão e volume da ordem de 5.000.000 m<sup>3</sup> compactados e de estrutura de concreto com 335 m de comprimento e volume de 350.000 m<sup>3</sup>. A altura média da barragem é de 30 m. A fundação das estruturas de concreto consiste de rocha vulcânica representada por diversos tipos litológicos e designada,

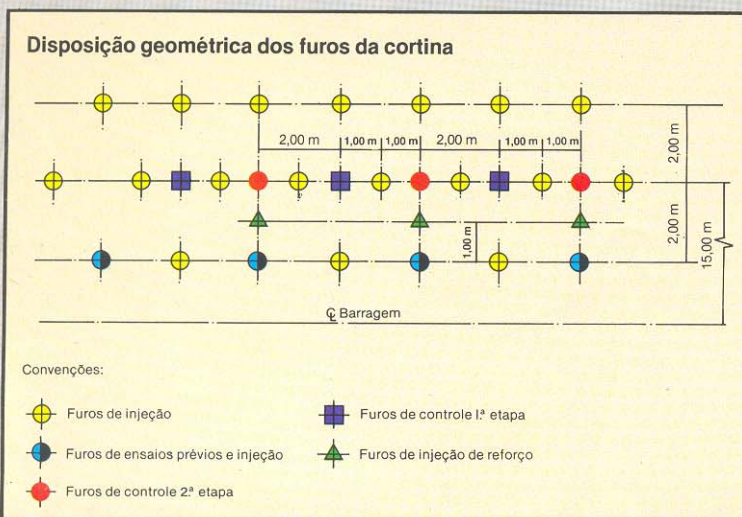
simplificadamente, de vulcanito. As barragens de terra estão assentadas em vários trechos sobre solos residuais de vulcanito, silte-argilosos com presença de areia fina, resultantes da alteração da rocha - matriz. Dentre os condicionantes geológico-geotécnicos envolvidos na elaboração do projeto executivo, destaca-se a ocorrência de vários pontos de alta permeabilidade (superior a 10<sup>-3</sup>cm/seg), encontrados no solo de fundação da barragem de terra. Investigações através da abertura de poços e trincheiras de inspeção permitiram associar aqueles pontos de alta permeabilidade à presença

de famílias de cavidades tubulares, com diâmetros micrométricos a centimétricos, intercomunicantes e desenvolvidos em direções erráticas. Estas cavidades receberam a denominação genérica de canalículos.

#### Origem dos canalículos

Campanhas de investigações nos terrenos de fundação de barragens na Região Amazônica brasileira têm permitido a identificação de canalículos em diversos sítios. Há várias teorias que tentam explicar a sua origem:

- ação de raízes: hipótese levantada por biólogos posicionando que a ação escavadora de raízes de pequeno diâmetro seria a causadora dos canalículos da região da UHE Tucuruí, Estado do Pará. Em escavações de até 25 metros de profundidade no local citado foram mapeadas raízes;
- erosão pedo-kárstica: como contribuição trazida por geomorfólogos, levantou-se a hipótese de os canalículos serem originados pela erosão do solo residual, a partir de seu contato com areias, cascalhos e fraturas da rocha. Tal processo seria agravado pela alta pluviosidade local e pela alta porosidade das areias e cascalhos;
- lixiviação ligada à laterização: a combinação do processo de laterização com o de lixiviação dos elementos alcalinos, alcalino-terrosos e sílica seria responsável pelo surgimento de canalículos no solo, posteriormente alargados por erosão e carreamento dos finos, através das fraturas do maciço rochoso;
- ação de térmitas: com base em inspeções feitas em três locais de barramentos na Amazônia brasileira e exames microscópicos realizados em amostras indeformadas de solo com canalículos, os entomólogos levantaram a hipótese, aceita como predominantemente válida em Balbina, da origem dos canalículos por ação de térmitas. Os vestígios encontrados (pelotas fecais ou bucais) são unidades fundamentais de todas construções termíticas. Tal atividade seria fóssil, vinculada ao último período glacial quaternário, quando o clima reinante na Região Amazônica era





seco, com vegetação de cerrado. A cada flutuação climática do quaternário, a atividade termítica se intensificava, resultando numa sucessão complexa e cumulativa. Quanto ao diâmetro dos canaliculos considerados representativos da ação termítica, varia entre 0,1 e 1,5 cm. As inspeções realizadas detectaram a presença de canaliculos fora desta faixa de diâmetro. Sua interpretação seria a de que os canaliculos de grande diâmetro seriam primariamente originados por raízes; já os canaliculos submilimétricos seriam gerados por radículas.

#### Conceituação do tratamento

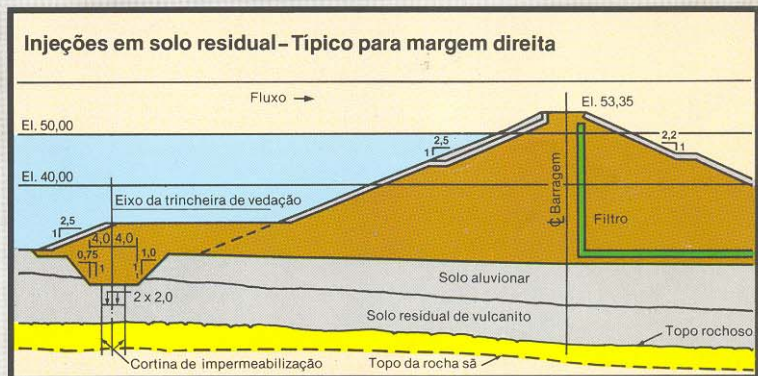
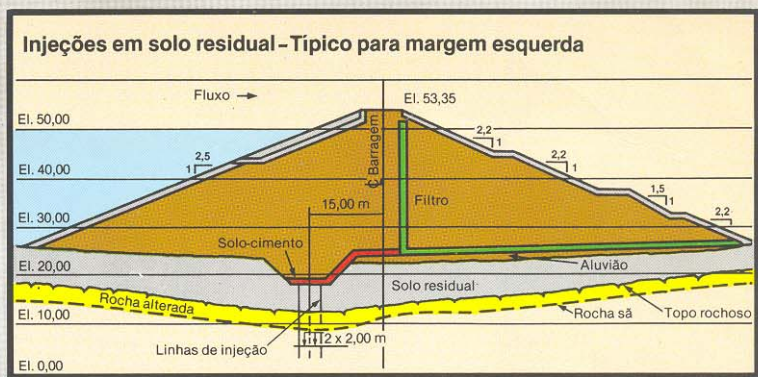
A conceituação básica do tratamento proposto para a fundação da barragem originou-se na preocupação de que fluxos concentrados nos canaliculos pudessem gerar vazões localizadas incontroláveis, com potencial carreamento de material. Assim sendo, o tratamento deveria garantir a segurança estrutural da obra. Várias alternativas foram estudadas para o tratamento da fundação, a saber:

- trincheira de vedação até a base do solo residual e injeção da rocha alterada;
- trincheira de vedação até a rocha sã;
- parede-diafragma de concreto até a base do solo residual e injeção da rocha alterada;
- trincheira de vedação ao longo da camada superficial de aluvião e injeção localizada no solo residual e rocha alterada subjacente, associada a poços de alívio à jusante.

Estudos de custos, associados às vantagens e desvantagens de cada alternativa a ser executada em plena Região Amazônica (com suas peculiaridades climáticas e logísticas), levaram à adoção da última alternativa de solução.

O tratamento por injeção do solo residual visa criar uma zona na qual se elimina a existência de valores localizados elevados de permeabilidade, homogeneizando a região tratada, que poderá passar a ser analisada em termos de valores médios.

Ao se injetar localizadamente o solo residual através de tubos com válvulas-manchete e pressões



suficientemente altas para provocar seu fraturamento hidráulico (clacagem), objetiva-se a penetração de calda e obturação dos canaliculos e vazios interceptados pelos planos de clacagem. O preenchimento dos canaliculos, associado aos planos impermeáveis de calda, gerados pela clacagem do solo, criaria as condições pretendidas de homogeneidade de permeabilidade da fundação. As principais vantagens da solução escolhida seriam:

- o processo de se tratar por injeções a rocha alterada subjacente ao solo residual possibilita a utilização dos mesmos furos de tratamento;
- a injeção pode ser especificada de maneira tal, que seja intensificada nos locais onde se demonstrar necessário;
- é atividade que pode ser desenvolvida durante todo o ano, independentemente de condições climáticas;
- o emprego de equipamentos convencionais.

Como desvantagens no processo escolhido, levanta-se o pioneirismo do tratamento, requerendo um

acompanhamento rigoroso e intenso dos serviços.

#### Metodologia do tratamento

A metodologia utilizada no tratamento resultou da experiência dos profissionais envolvidos, tendo sido otimizada em diversas oportunidades em função dos resultados obtidos.

A sistemática vigente durante grande parte do tratamento pode ser assim sintetizada:

- em sondagens prévias, foram realizados ensaios de perda d'água no solo residual. Boa parte dos ensaios foi iniciada pela aplicação de pressão de coluna de água, prosseguindo com a adição de pressões de 0,2; 0,4; 0,7; 1,0; 1,5 kg/cm<sup>2</sup> ... no manômetro situado na boca do furo, até o fraturamento hidráulico do solo no trecho ensaiado. Os ensaios prévios permitiram a determinação do coeficiente nominal de permeabilidade da fundação, antes do tratamento, e indicações de relevância nas pressões a serem utilizadas nas injeções de tratamento. Cuidados especiais foram tomados para garantir a



obturação contra a parede do furo e impedir eventuais fluxos preferenciais verticais ao longo do mesmo;

b) para criar a zona tratada pretendida, foram previstas e executadas três linhas longitudinais de tratamento, iniciando-se as injeções por montante e jusante para possibilitar um confinamento por ocasião da injeção da linha central. As linhas de tratamento eram espaçadas entre si de 2 m, formadas por furos também espaçados de 2 m, sendo que na linha central foi imposta uma defasagem de 1 m, tendo os furos profundidade tal, que atingissem o topo da rocha alterada;

c) a perfuração para injeção foi efetuada com equipamento roto-percussivo com diâmetro de 5" ou 6". Nos furos foram instalados tubos de PVC rígido com diâmetro de 3". Estes tubos eram providos de válvulas-manchete espaçadas a cada 0,5 m. A composição de injeção utilizou obturadores duplos desenvolvidos na própria obra para permitir a injeção localizada através das válvulas-manchete. O espaço existente entre o tubo de PVC e a parede do furo propriamente dito foi preenchido com calda de solo-cimento injetada a partir da válvula inferior e designado bainha de injeção;

d) as caldas utilizadas no tratamento foram diferenciadas, quando aplicadas na execução da bainha e na injeção do terreno de fundação. Ambas foram estudadas de maneira a otimizar o uso de solo argiloso local na mistura, de maneira a minimizar os custos (reduzindo os teores de cimento) e atender aos requisitos do projeto referentes à pressão necessária para fraturar a bainha. Para a execução da bainha, especificou-se como critério de aceitação um traço de solo-cimento de resistência à compressão simples de 3 kg/cm<sup>2</sup> aos 28 dias. A calda de solo-cimento de injeção da fundação deveria atender aos seguintes requisitos:

- resistência à compressão simples aos 28 dias de 1,5 kg/cm<sup>2</sup>;
- viscosidade 50 cP;
- fator de sedimentação 5%;
- fluidez de 40 a 45 segundos no cone Marsh;

e) o preparo das caldas que atendessem aos requisitos acima

foi objeto de metodologia desenvolvida na obra.

Foram utilizados solos de empréstimos argilosos locais, devidamente homogêneos e hidratados, gerando uma lama com densidade média de 1,23 g/cm<sup>3</sup>.

A esta lama era adicionado cimento em dosagem tal, que viesse a constituir a calda pretendida.

A calda utilizada com maior frequência tinha uma razão em volume argila/água de 1:3 com 75 kg de cimento por m<sup>3</sup> de lama; f) após a cura da bainha, o tratamento da fundação era realizado de baixo para cima, em uma só fase de 300 l de calda injetada por válvula-manchete, em pressões compatíveis com a pressão de clacagem do solo identificada nos ensaios de perda d'água;

g) a injeção foi dada por concluída, quando injetado o volume preconizado ou quando, durante 10 minutos da aplicação da pressão máxima, o volume absorvido era nulo. Este critério gerou discussões no período de execução das injeções, mas foi adotado pela projetista por analogia com injeções em solos, segundo as porosidades e volumes a tratar;

h) furos para execução de ensaios de perda d'água de controle do benefício atingido pelo tratamento foram executados dentro dos mesmos procedimentos utilizados nos furos prévios, limitando-se a pressão máxima aplicada a 1 kg/cm<sup>2</sup>, de maneira a impedir

novas clacagens do solo residual. Os resultados obtidos nos ensaios de perda d'água mostraram que conseguiu-se realizar a obturação de canalículos na região tratada, reduzindo-se a permeabilidade da fundação da barragem aos limites admissíveis do projeto.

#### Barragem - Execução de poços de alívio com diâmetros de 6" e 12"

O tratamento de fundação, como mencionado, era associado à execução de poços de alívio à jusante.

Como a perfuração dos poços de alívio exigia furos de grande diâmetro, os equipamentos para sua execução eram a grande dificuldade nos serviços. A solução foi encontrada pela equipe da obra, que adaptou uma perfuratriz Roc. 601, utilizando "bits" com diâmetros de 8", 10", 14" e 16", todos projetados e fabricados em Balbina. Após a perfuração, os furos deveriam ser revestidos com um tubo de aço sem costura "Schedule 80", com diâmetro de até 12". Para a descida do revestimento dentro do furo, utilizou-se o mesmo Roc. 601, que também foi adaptado para este serviço. Em seguida à descida do revestimento até a rocha, foi executada uma limpeza rigorosa, de modo a permitir a descida livre do tubo de PVC corrugado envolvido por Bidim, e o espaço entre a parede do revestimento e o Bidim foi preenchido com areia lavada do rio, formando com isto um pré-filtro que concluía a execução do poço de alívio.

#### Histogramas de permeabilidade antes e depois do tratamento

