

MÉTODOS PARA RESTRINGIR O FLUXO D'ÁGUA SOB BARRAGENS ASSENTES EM ESPESSOS ALUVIÕES PERMEÁVEIS

* Walmir Fernando Duarte Jardim

No presente artigo são apresentados os métodos construtivos, que vem sendo desenvolvidos para resolução do problema de perda d'água pela fundação de barragens, projetadas sobre espessas camadas aluvionares de alta permeabilidade.

INTRODUÇÃO

A história da construção de obras com a finalidade de barrar cursos d'água para criação de reservatórios, mostra que foram sendo escolhidos os sítios "ótimos", sob o aspecto topográfico e geológico, em detrimento dos que apresentavam algum tipo de dificuldade técnica e econômica. A preferência, em geral, era para boqueirões estreitos, tipo "V", com pequena cobertura aluvionar sobre o embasamento rochoso.

Para barrar o fluxo d'água pelas camadas de solos permeáveis, a técnica da construção de trincheiras reaterradas com materiais argilosos compactados, prosperou e tomou-se prática corrente na engenharia de barragens.

No entanto, após o aproveitamento dos locais "ótimos", houve necessidade de se utilizar boqueirões que apresentavam desafios a técnica usualmente empregada e, dentre eles, os que possuem espesso manto aluvionar permeável sobrejacente à rocha de fundação.

Para barragens com pequena lâmina d'água, sobre terrenos com permeabilidade não exagerada (digamos: $K \leq 10^{-3}$ cm/s), e sendo admissível uma perda d'água pela fundação, foram desenvolvidos e empregados processos, baseados em métodos de drenagem para controle da vazão percolante, que via de regra mostram-se, sob a ótica da economia, mais interes-

santes. Entre esses processos difundiram o emprego de tapete drenante de jusante associado a um tapete impermeável a montante, os poços de alívio e as valas drenantes. Tais processos tem por objetivo o convívio com um fluxo d'água pelas fundações porém, com gradientes hidráulicos bastante inferiores ao crítico, evitando o surgimento do fenômeno da erosão regressiva ou da levitação de jusante.

Para barragens com maiores pressões hidráulicas sobre a fundação ou assentes sobre solos de alta permeabilidade (digamos: $K > 10^{-2}$ cm/s) ou, ainda, onde não se permite perdas de líquido acumulado (p. exemplo: barragens de dejetos industriais), foram criados, e estão em desenvolvimento, alguns processos para obstrução da percolação pela fundação; sendo os mais usuais:

- Trincheira de lama ("Slurry Trench")
- Parede Diafragma
- Cortina de injeção

A seguir são emitidos alguns comentários a respeito de cada um desses processos que visam reduzir o fluxo sob os aterros das barragens.

TRINCHEIRAS DE LAMA

As trincheiras de lama ("slurry trenches") são elementos estanqueadores não estruturais, abertos pela escavação contínua de uma vala de largura de 2 a 3,0m (a experiência americana tem permitido a abertura de valas de 0,60 a 1,50m de largura), utilizando-se uma draga tipo "drag-line" (mais em-

*M.Sc. UFRJ - Prof. do Departamento de Engenharia Civil da UNIFOR

pregada nacionalmente) ou tipo "Clamshell" (Figura 1). A cava deve atingir um horizonte impermeável ou o embasamento rochoso.

Para evitar o fechamento a escavação é realizada com a vala preenchida, todo o tempo, com uma lama estabilizante constituída de bentonita (montmorilonita de sódio), que apresenta propriedades tixotrópicas, ou seja, tem um comportamento fluido quando agitada e torna-se um gel quando em repouso.

A lama atua criando uma película impermeável nas paredes da escavação devida a penetração nos vazios do solo, impossibilitando a formação de uma rede hidrodinâmica desfavorável. Ela ainda oferece um grande empuxo estabilizador como consequência da sua alta densidade, cerca de $1,2t/m^3$. A prática tem mostrado que para assegurar a estabilidade da cava a lama deve ser mantida de 0,30 a 1,0m abaixo do topo da escavação e vários decímetros acima do lençol freático.

A Federation of Piling Specialists recomenda as seguintes características para a lama bentonítica a ser usada durante a escavação:

- Peso Específico - menor que $1,1g/ml$
- Viscosidade - 30 a 90s no ensaio de cone Marsh
- Resistência ao cisalhamento do gel de 10 minutos - $1,4$ a $10N/m^2$ no Ensaio "Sherameter"
- pH - 9,5 a 12,0

As principais vantagens das técnicas de trincheiras de lama são:

- não necessitar rebaixamento do lençol freático, através de ponteiros drenantes ou poços profundo, durante a construção.
- não apresenta desmoronamento das paredes mesmo com o equipamento trabalhando próximo da cava.
- continuidade do elemento estanqueador, pois não tem juntas que constituem planos vulneráveis a percolação.
- não exigir equipamentos sofisticados.
- capacidade de acompanhar os recalques sem sofrer fraturas.

Os inconvenientes principais apresentados pelas cortinas de lama são:

- impossibilidade de engaste no substrato rochoso
- resistência do material do reaterro normalmente inferior a dos materiais aluvionares substituídos.
- limitação da profundidade alcançada pelo equipamento; máxima já realizada de 25,0m.

Dois tipos de trincheiras de lama são mais empregados atualmente; as que usam uma mistura de solo e bentonita para o reaterro da cava (tipo SB) e as que empregam uma combinação de cimento e bentonita (tipo CB).

As trincheiras do tipo SB utilizam para a expulsão da lama bentonítica da cava, um aterro lançado composto de uma mistura de solo selecionado e bentonita. O solo a ser usado na mistura poderá ser o próprio solo da escavação ou solo importado (caso o proveniente da escavação seja inadequado),

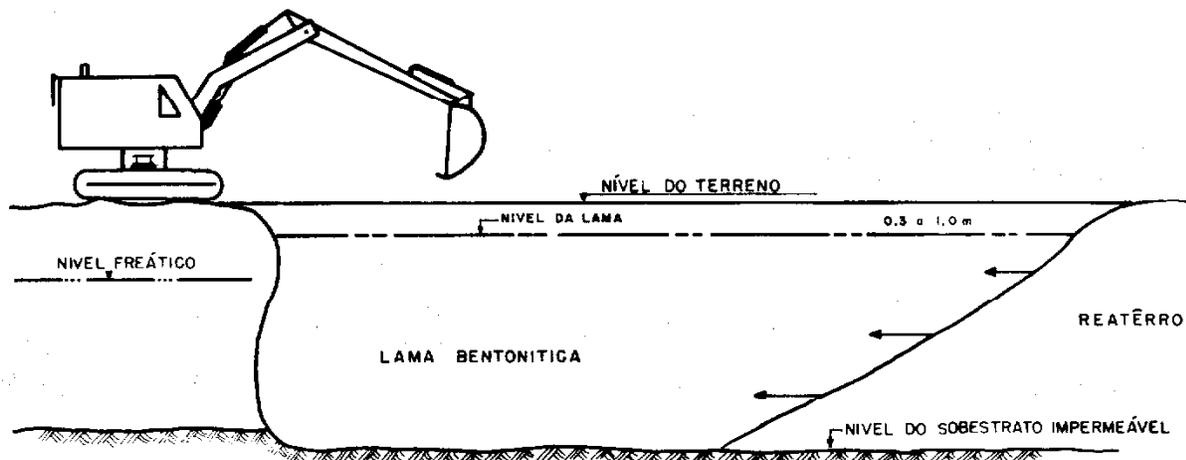


Fig. 1 - Esquema de Construção de uma Trincheira de Lama Tipo SB

Incluindo areias médias ou finas, areias siltsosas e, algumas vezes, solos argilosos. A bentonita deverá constituir-se em mais de 1% do peso seco. A mistura a ser usada para o reaterro deverá, idealmente, possuir uma percentagem de finos, preferencialmente plásticos, entre 20% e 40%.

D'Appolonia (1980) observou que misturas para reaterro com finos plásticos, tem permeabilidade entre 5×10^{-8} a 10^{-7} cm/s quando a fração passante na peneira n.º 200 varia de 60% a 15% e permeabilidade de 10^{-7} a 5×10^{-9} cm/s quando os finos não plásticos variam de 55% a 5% (ver figura 2).

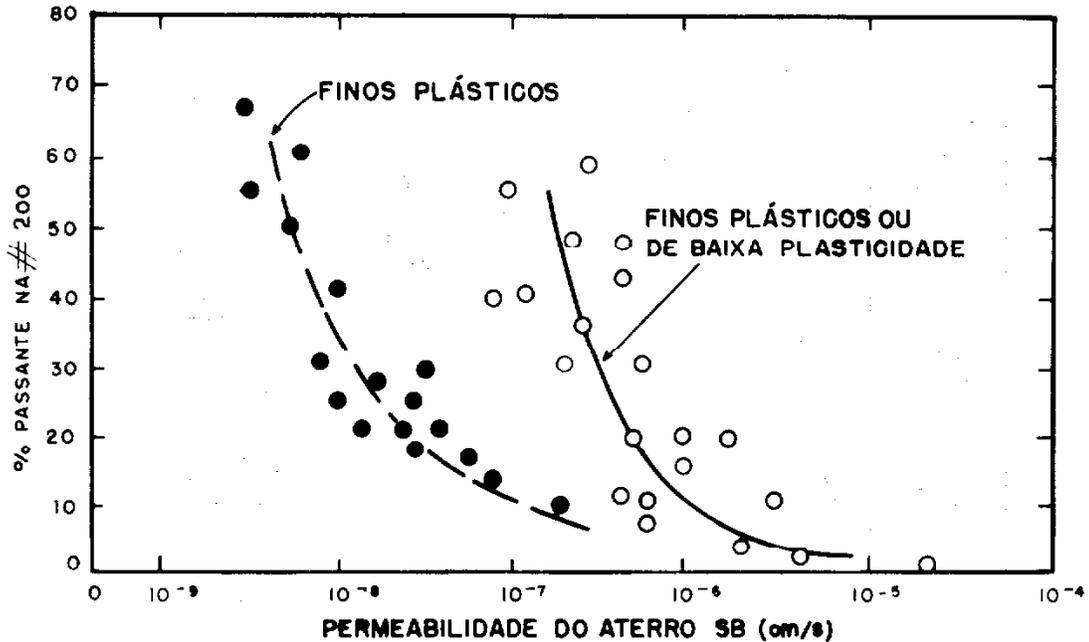


Fig. 2 – Permeabilidade do Reaterro Solo – Bentonita em Relação a Percentagem de Finos

As trincheiras do tipo CB, de uso recente em obras permanentes (cerca de 20 anos), empregam para fluido de estabilização da cava uma mistura em meio aquoso de bentonita (cerca de 5 a 7% do peso da água) e cimento (15 a 20% do peso da água) que endurece em 24 a 36 horas. Essa mistura é utilizada também para o preenchimento da cava, dispensando a importação ou manuseio de solos.

As trincheiras CB são construídas em painéis, de cerca de 5,0m de extensão, numa seqüência de primário – secundário de fechamento; os de fechamento são construído entre um primário e um secundário, assim que tenha ocorrido o início da “pega” reescavando as partes do primário e do secundário que ficarão em contacto com esse novo painel. A figura 3 mostra a seqüência de escavação.

O aproveitamento da mistura cimento – bentonita para elemento de preenchimento definitivo da cava, deverá ser procedido de um controle rigoroso para evitar o aprisionamento de bolsões de solo escavado no interior da argamassa.

As trincheiras CB poderão apresentar algumas vantagens sobre as SB tais como independência da qualidade do solo escavado para seu reaterro e empregar uma técnica de construção mais adequada para obras com dificuldades de acesso ou onde a praça

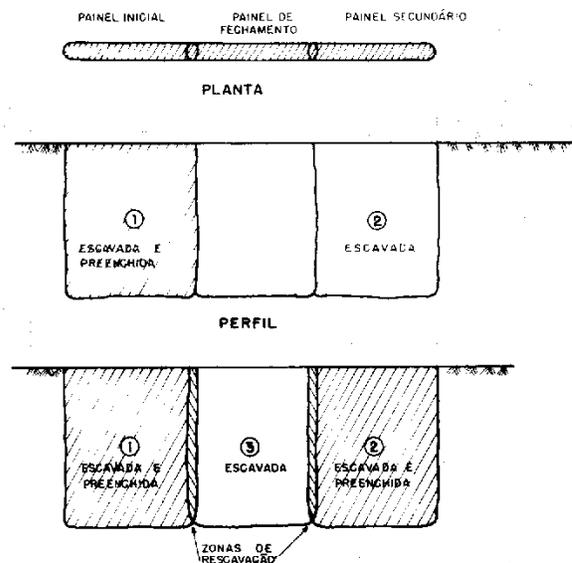


Fig. 3 – Sequência de Construção de uma Trincheira de Lama Tipo CB

de trabalho for apertada. No entanto tem, geralmente, custo mais elevado e apresentam um grau de estanqueidade menor que as trincheiras SB.

Na construção da 2ª Barragem de Joanes (Camacari-Ba) utilizou-se, para redução da percolação através do aluvião, uma trincheira escavada com emprego de lama bentonítica e preenchida com uma argamassa plástica de solo argiloso, cimento e água.

Devido as dificuldades para inspeção da homogeneidade do preenchimento da trincheira foram constatados diversos problemas que afetaram de alguma forma a qualidade do produto acabado, entre eles:

- ascensão desuniforme da argamassa na cava, aprisionando bolsões da lama bentonítica.
- mistura da argamassa com detritos em sedimentação devido ao pequeno contraste de densidade.
- descontinuidade no ritmo de lançamento da argamassa o que levou ao aparecimento de inúmeros planos de cisalhamento na argamassa ("Slickensides").

PAREDE DIAFRAGMA

São elementos estanqueadores estruturais, escavados com emprego de equipamentos especiais, tais como uma escavadeira "Clamshell" montada em barra "Kelly", e com uso de uma lama bentonítica para assegurar a estabilidade da cava.

O enchimento da cava se faz com a colocação de uma mistura de concreto através de bombas ou tremonha.

O produto final é uma fina parede (de 0,50 a 1,50m de espessura), dividida em painéis não superiores a 7,0m de comprimento, com grande profundidade, em alguns casos superiores a 100 metros.

O posicionamento de um elemento rígido na fundação de uma barragem deve ser estudado cuidadosamente tendo em vista as solicitações transmitidas. Os recalques dos solos vizinhos despertarão um "atrito negativo" na cortina rígida podendo leva-la a ruptura por compressão. Os deslocamentos horizontais provocarão flexões no elemento rígido de considerável grandeza.

Uma cortina rígida posicionada no eixo do maciço estará sujeita a deslocamentos horizontais quase nulos porém, o atrito negativo será máximo devido os recalques serem maiores na região sob o coroamento. Na região próxima ao pé do talude de montante os recalques serão menores porém os deslocamentos horizontais atingirão valores máximos.

A barragem de Bov Hanifia (Argélia), de 50m de altura, teve sua cortina rígida, construída junto ao pé de montante, rompida devido aos deslocamentos horizontais. Diversas outras barragens, que não chegaram a extremos como a de Bov Hanifia, apresentaram fissuras nas cortinas que diminuirão sensivelmente a eficiência destas como elementos de vedação.

Barragens com núcleo impermeável delgado, sujeitas a recalques apreciáveis, com sistema rígido de vedação das fundações conectado com o embasamento rochoso, poderão sofrer um punçãoamento na

região do núcleo em contacto com a cortina, dando surgimento a fissuras no solo que facilitarão a passagem d'água.

CORTINA DE INJEÇÃO

Cortina de injeções em solos aluvionares é uma técnica relativamente nova, tendo sido aplicada pela primeira vez na França nos meados de 1950 para impermeabilização de uma camada, de cerca de 90m de profundidade, composta de aluviões permeáveis (K entre 6×10^{-2} a 10^{-1} cm/s), existente nas fundações da Barragem de Serre-Ponçon.

O processo de injeção em aluvião consiste basicamente em três fases: 1) abertura de furos de injeção, 2) preparo da calda que será injetada e 3) bombeamento da calda de injeção no solo aluvionar através dos furos. Vários métodos foram desenvolvidos para executar essas fases e, devem ser analisados, diante das características da fundação que se deseja impermeabilizar, qual o mais conveniente técnica e economicamente para alcançar os objetivos almejados.

Na atualidade dois métodos são mais extensamente utilizados: - os que empregam tubos com a base livre por onde é bombeada a calda - os que empregam tubos perfurados lateralmente para disseminação da calda impermeabilizante.

Nos métodos que utilizam tubos de base livre esses são instalados num furo de injeção e então bombea-se a calda até que certo volume seja absorvido pelo solo ou até que certa pressão de injeção seja alcançada. Suspende-se o tubo de 0,30 a 1,0m e o processo de injeção é recommçado. O objetivo é formar uma coluna de solo aglomerado ao redor de cada tubo (Ver figura 4).

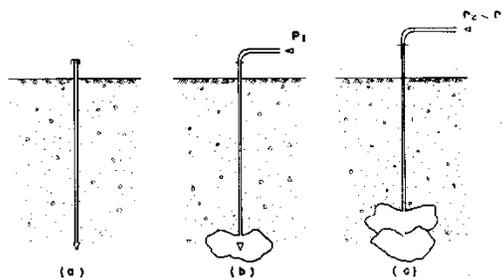


Fig. 4 — Injeção em Tubo de Base Aberta

- (a) COLOCAÇÃO DO TUBO ATÉ A PROFUNDIDADE DESEJADA
- (b) PRIMEIRA INJEÇÃO
- (c) ERGUIMENTO DO TUBO (cerca de 30cm) E NOVA INJEÇÃO

Uma variável promissora desse método é o sistema CCP (Chemical Churning Pilony), surgido no Japão em 1970, que consiste na perfuração através de um tubo equipado com coroa de furos laterais. Atingida a profundidade desejada a injeção é bombeada por meio de elevadíssimas pressões, através dos furos da coroa, enquanto o tubo é girado e retirado lentamente. Dessa maneira a calda injetada sob altas

pressões desfaz a estrutura do solo vizinho e constrói um elemento solo-calda no entorno do tubo. Repetindo esse procedimento cria-se uma série de colunas de solo-calda interligadas e contínuas (ver figura 5). Nas obras de desvio da Barragem de Porto Primavera (CESP) essa técnica foi utilizada com sucesso porém, seu custo ainda é elevado para obras de pequeno e médio porte (cerca de US\$ 200,00/m² para $\theta = 1,20\text{m}$).

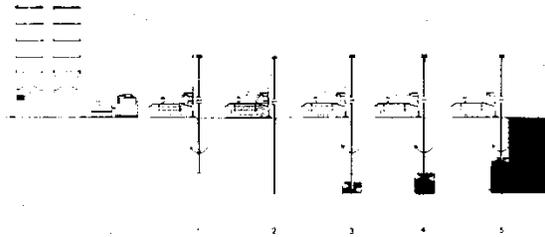


Fig. 5 - Sequência de Injeção do Tipo C.C.P.

Os métodos que utilizam tubos perfurados lateralmente foram os primeiros a serem empregados para resolver o problema de alta permeabilidade de solos aluvionares. A firma francesa "SOLETANGE" responsável por esses serviços na Barragem de Serre-Ponçon (França - 1950) e Barragem de Sylvenstein (Alemanha - 1958), desenvolveu um sistema pioneiro que ficou internacionalmente conhecido como "tubo à manchettes". Esse sistema é um processo de diversas fases que permite a reinjeção da mesma zona, se necessário. Um tubo perfurado a cada 30 cm, geralmente de PVC, e colocado com os orifícios cobertos com membranas de borracha (manchettes) dentro de um furo de injeção o qual, é mantido aberto com um revestimento ou mistura bentonítica. Em seguida o espaço anelar compreendido entre o tubo perfurado e o solo é selado através de uma calda bentonita-cimento, para evitar que a calda de injeção percole verticalmente. Quando a calda é injetada sob pressão as membranas de borracha cedem permitindo que a calda rompa radicalmente o selo bentonita-cimento e penetre no solo aluvionar. Para injetar nos orifícios do tubo que se deseja, dois obturadores de borracha no interior do tubo limitam as extremidades do trecho a ser injetado (ver figura 6).

As pressões máximas de injeção são objeto de discussões e controversias. Nos Estados Unidos o Corpo of Engineers tem usado, como regra primeira, a pressão de 0,23Kg/cm² para cada metro de profundidade. Na Europa pressões maiores são admitidas no método "tubo a manchette" talvez, necessárias para romper o selo bentonita-cimento.

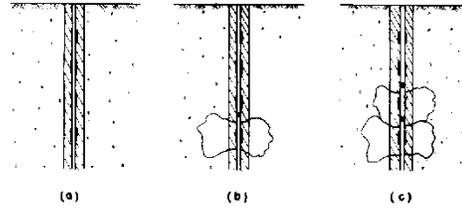


Fig. 6 - Injeção Tipo "Tubo à Manchette"

- a) COLOCAÇÃO DO REVESTIMENTO, DESCIDA DO TUBO "À MANCHETE" E COLOCAÇÃO DA CALDA
- b) EXTRAÇÃO DO REVESTIMENTO E INJEÇÃO COM OBTURADOR DUPLO
- c) NOVA INJEÇÃO NO ESTÁGIO SUPERIOR SEQUINTE

CONCLUSÕES

Para enfrentar os problemas de construção de obras reservatórias sobre espessos aluviões permeáveis, vem sendo desenvolvidos diversos métodos que tem possibilitado a edificação com segurança dessas barragens. Espera-se, para o futuro, significativos desenvolvimentos tecnológicos nesses sistemas tornando-os mais econômicos e permitindo a construção de obras em aluviões cada vez mais profundos. A aplicação de resinas orgânicas, atualmente de uso muito limitado devido ao seu alto custo, parece ser muito promissora diante da grande relação de expansão, em relação ao volume original (de até 50 vezes).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- SHERARD J. L. & Alli - "Earth - Rock Dams" - John Wiley & Sons, 1963. N. York.
- BOURDEAUX, G. H. M - "Barragens de terra e enrocamento - Projeto e Construção" - Volume 2 - Tema 9 Injeções. Clube de Engenharia da Bahia 1980.
- SINGH, B e SHARMA, H. D. - "Earth au Rockfill Dams" - Nova Delhi 1976
- REDAELLI, L. L. - "Consolidation of Soil ao Rock by Grouting" - Conferência no "Asian Institute of Technology" Bangkok - Tailândia - 1981.
- PEREZ, Jean - "Cutoffo fo Dams" - Seminário What's New in Dams Design and Constructio. ASCE - Colorado - 1986.
- JUNQUEIRA, A. A. e Matos, W. D. - "Fundações em Solos" Item X do curso de Barragens de Terra e Enrocamento - UnB/ABMS - 1981.