

# Recuperação da Barragem do Gama por meio de Cutoff em *Jet Grouting*

S. M. Ludemann

Ludemann Engenheiros Associados, São Paulo, Brasil, sergio@ludemann.com.br

R. S. Garcia

Ludemann Engenheiros Associados, São Paulo, Brasil, robin17sg@gmail.com

M. G. T. Barbosa

Universidade de Brasília, Brasília, Brasil, maxtimo@globocom

A. L. B. Cavalcante

Universidade de Brasília, Brasília, Brasil, abrasil@unb.br

André Nascimento Borges

Trier Engenharia, Brasília, Brasil, andre.borges@trier.eng.br

M. V. R. Barbosa

Solotrat Centro Oeste Engenharia Geotécnica, Brasília, Brasil, max@solotrat.com.br

**RESUMO:** Em 2006 detectaram-se afloramentos d'água junto ao pé de uma barragem denominada Barragem do Gama, localizada na Fazenda Água Limpa da UnB, em Brasília – DF. Após visitas técnicas, caracterizaram-se esses afloramentos freáticos como um processo de retroerosão (*piping*) em estágio inicial. Por obstáculos que ocasionalmente acontecem em obras públicas, uma intervenção só se iniciou em 2015, acarretando agravação deste problema de retroerosão. Frente a esses desafios, para diminuir drasticamente o fluxo de água pelo corpo da barragem, decidiu-se fazer uma cortina de natureza impermeável. Com este objetivo, após análise das condições de campo, decidiu-se fazer colunas secantes em *Jet Grouting*. Este artigo apresenta o estudo de caso deste projeto e obra de tratamento.

**PALAVRAS-CHAVE:** *Jet Grouting*, Cutoff, Piping, Recuperação, Barragem de terra.

## 1 INTRODUÇÃO

De acordo com o histórico relatado pelos moradores mais antigos da região, a Barragem do Ribeirão do Gama foi implantada na segunda metade da década de 1950, quando do início da construção da capital federal, muito provavelmente com a finalidade de formar um reservatório para servir de abastecimento de água para as obras de terraplenagem que estavam em curso naquela época. Neste contexto, foi executado um dique com características de uma obra provisória, pois não contava com dispositivos de impermeabilização a montante, nem dispositivos de drenagem a jusante, como seria normal numa obra definitiva de barragem.

Concluídas as obras de terraplenagem e formado um lago de espelho d'água considerável, o dique foi mantido e, posteriormente alteado para permitir que o espelho d'água também aumentasse, surgindo, na ombreira esquerda do vale, o Setor de Mansões Park Way, o qual fez uso paisagístico deste lago. Posteriormente, já inserida na Fazenda Água Limpa da UnB, iniciou-se também um uso agrícola fornecendo água para o núcleo Hortícola de Vargem Bonita, com utilização para irrigação do cultivo de hortaliças e também para o abastecimento humano a jusante. Desta forma, a Barragem do Gama tornou-se uma obra permanente.

Esta barragem tem uma extensão de 290 m de

comprimento com 15 metros de altura. Possui um vertedouro de concreto situado na sua ombreira direita e uma tomada d'água tipo Tulipa na ombreira esquerda, para abastecimento de Vargem Bonita.

Após 60 anos da sua construção, numa inspeção de rotina, técnicos da UnB notaram vários pontos de surgência d'água junto ao pé do talude de jusante da barragem. Este fato, aliado ao avançado estado de degradação superficial dos taludes de montante e de jusante, causou preocupação, pois esta situação apresentava um risco elevado de evoluir para uma ruptura do talude por "piping" (erosão regressiva ou retroerosão) como já havia ocorrido em muitas outras barragens no Brasil e no exterior.

Deu-se, então, início ao presente trabalho de Recuperação da Barragem do Gama, cujos principais aspectos de projeto e de execução serão apresentados a seguir.

## 2 TRATAMENTO DE UMA BARRAGEM COM RISCO DE RETROEROSÃO POR "PIPING"

*Piping* é uma forma de ruptura hidráulica, que ocorre em casos onde se registra erosão, por carreamento de solo devido às forças de percolação. Inicialmente, se dá num ponto de surgência d'água, retroagindo em torno de um filete d'água que arrasta os grãos, cujo resultado é a formação de um tubo, normalmente em formato de um cachimbo. Em português este fenômeno também é conhecido como retroerosão tubular.

O movimento das águas pelo solo aplica forças de arrasto nas partículas do arcaço sólido, as quais são chamadas de forças de percolação. Estas forças aplicadas por unidade de volume têm a magnitude de  $J = \gamma_w \cdot i$ , sendo  $\gamma_w$  o peso específico da água e  $i$  o gradiente hidráulico dado por  $i = \Delta H / \Delta L$ , que é a perda de carga total por unidade de comprimento.

Em barragens, onde há um grande maciço de solo, poderão ocorrer regiões em que a permeabilidade seja superior à média global, tornando-se o caminho preferencial do fluxo das águas. A velocidade de percolação da água neste

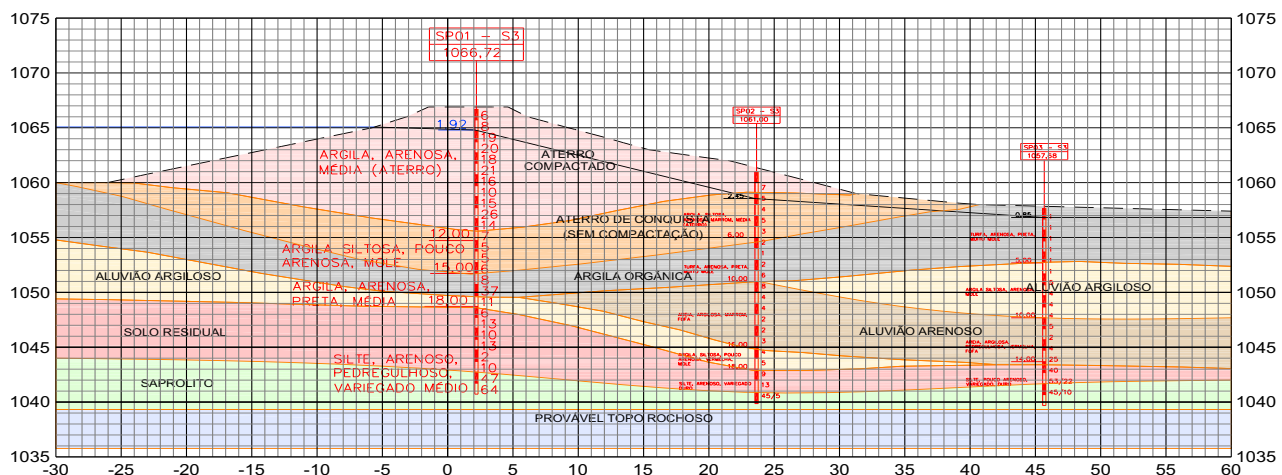
trecho é maior e, assim, poderá ocorrer o carreamento de partículas finas do solo, aumentando o espaçamento entre os grãos e, conseqüentemente, a permeabilidade. Com o prosseguimento deste processo a tendência é a surgência de água na superfície e a erosão localizada no local, formando um "tubo" que, com o tempo, vai progredindo por dentro do maciço em comprimento e em área no sentido contrário ao do fluxo. Pode ocorrer tanto no corpo da barragem quanto na sua fundação. Na história, houve casos de acidentes em barragens causados por este tipo de erosão.

Como medida de reparação em obras semelhantes, com indícios de formação deste fenômeno, há a necessidade de se executar um tratamento do terreno. Esse tratamento consiste normalmente na alteração das propriedades mecânicas do solo "in situ", conferindo ao maciço e/ou às fundações maior resistência, menor compressibilidade e menor permeabilidade.

## 3 CONHECIMENTO DO PROBLEMA

Geologicamente, a Bacia Hidrográfica do Gama está formada sobre a Unidade silítico-ardosiana do Grupo Paranoá. Observa-se na Figura 1 uma seção típica do barramento, traçado com base nos resultados das sondagens à percussão disponíveis.

As sondagens executadas sobre a barragem acusam sob sua fundação uma camada de turfa, de consistência muito mole, com espessura de 2,0 m a 5,0 m no eixo da barragem, seguida de aluvião argiloso, de consistência mole, cor vermelha com espessuras variando de 1,0 m a 5,0 m, sendo que a jusante da barragem, dentro desta camada argilosa, surge uma camada de aluvião arenoso, fofa, podendo ter pedregulhos, com espessura de até 6,0 m. Abaixo destas camadas aluvionares, encontra-se solo residual, constituído de um silte arenoso, podendo ter pedregulhos, de compacidade média, cor variegada e espessuras de 1,0 m (a jusante e sob a crista da barragem) a 6,0 m (a montante), sobrejacente à camada de saprólito e o topo da rocha matriz.



SEÇÃO GEOTÉCNICA - ESTACA 9+00,00

Figura 1. Seção geotécnica da barragem, estaca 9+00,00

Com relação à barragem, observa-se que sua base tem características diferentes do aterro que compõem a sua estrutura, dando indícios de que para a sua execução, o material composto por argila silto-arenosa foi simplesmente lançado para permitir o tráfego de equipamentos da obra (aterro de conquista). Em função disso, o material de base possui consistência mole, enquanto que o seu corpo possui consistência de média a muito rija. Também, devido ao adensamento dos aluviões argilosos, houve uma provável complementação posterior do aterro no topo da barragem.

Com a descrição do subsolo local foi possível a obtenção dos parâmetros geotécnicos. Para isso, foram realizados ensaios de piezocone em campo, além dos seguintes ensaios de laboratório: umidade natural, densidade natural, limites de Atterberg, permeabilidade e ensaios de compressão triaxial (CIU). Quanto aos parâmetros de resistência dos drenos de areia e das colunas de JG foram adotados valores obtidos na literatura. Os parâmetros de permeabilidade foram estimados simulando as condições prévias à intervenção, simulando-se redes de fluxo das seções geológicas da barragem, calibrando-as com os dados obtidos dos piezômetros já implantados no local. Os valores adotados neste projeto estão apresentados na Tabela 1.

#### 4 ESTUDOS DE CONCEPÇÃO

A fim de verificar os parâmetros adotados, a estabilidade da barragem foi estudada. Para isso fez-se uma simulação da situação que deveria existir no final da sua construção. Considerou-se que à época a camada argilosa do subsolo estava normalmente adensada, com resistência inferior do que a atual, numa espessura superior àquela detectada pelas sondagens executadas no eixo da barragem

Tabela 1 - Parâmetros geotécnicos adotados

Material	Peso Específico $\gamma$	Coesão $c'$ (ou $S_u$ )	Ângulo de Atrito $\phi'$	Permeabilidade $k$
	kN/m <sup>3</sup>	kPa	graus	m/s
Aterro compactado	17,0	33,0	37,0	2,00E-07
Aterro lançado	16,0	17,0	37,0	6,00E-06
Aluvião arenoso	16,5	5,0	25,0	5,00E-05
Solo Residual	18,0	20,0	30,0	3,00E-06
Saprolito	19,0	30,0	35,0	2,00E-06
Dreno-filtro de areia	17,0	5,0	30,0	1,00E-03
Dreno de pé de brita	19,0	5,0	40,0	5,00E-03
Colonas JG	18,0	40,0	30,0	1,00E-12
Argila orgânica Normalmente adensada	14,0	17,0	-	5,00E-08
Argila orgânica Sobreadensada 1	15,0	25,0	-	2,00E-08
Argila orgânica Sobreadensada 2	16,0	40,0	-	1,00E-08
Aluvião argiloso Sobreadensado	16,0	60,0	-	2,00E-08
Aluvião argiloso Normalmente adensado	15,5	40,0	-	5,00E-08
Topo rochoso impermeável	-	-	-	1,00E-12

Com o passar dos anos, as camadas argilosas foram adensadas, recalçando a fundação da barragem, motivo pelo qual foi necessário um aterro complementar sobre a crista da mesma para manter a cota necessária.

Essas análises, realizadas no software Slide 5.0, foram feitas com o método de Bishop Simplificado.

Quanto a análise de estabilidade na condição de fim de construção da barragem resultou num fator de segurança igual a 1,06. Depreende-se deste resultado que muito provavelmente esta barragem foi construída em etapas, sendo primeiramente feito o aterro de conquista e, posteriormente o aterro compactado superior, confirmando a cronologia informada pelos habitantes locais.

Já quanto à situação atual, considerou-se que o solo argiloso e turfoso sob a estrutura de terra é sobreadensado devido ao peso aplicado do aterro. Com essas hipóteses conjugada à consideração de uma gradação de resistências nas camadas argilosas a análise de estabilidade na situação atual da barragem resultou num fator de segurança igual à 1,92, considerado satisfatório quanto à estabilidade geral. Assim confirmou-se que o principal problema da barragem era a perda d'água pela camada de aterro de conquista e pelas camadas de transição entre os aterros executados nas diversas etapas da obra, com potencial risco de piping.

Sendo assim, foi proposta uma solução para minimizar o fluxo de água, com a execução de uma cortina de *Jet Grouting* - JG, evitando a progressão deste processo de piping, associado a um sistema de drenagem de pé e aterro de recuperação do talude de jusante.

#### 4.1 Análise de Fluxo da Solução Proposta

Foi estudado o fluxo de água pelo maciço da barragem e pelo solo de fundação, com o auxílio do software Slide, utilizando o módulo de cálculo de rede de fluxo, pelo Método dos Elementos Finitos, tendo como dados de entrada os parâmetros apresentados na Tabela 1.

Na barragem estavam instalados 14 piezômetros. Os valores das leituras estão

apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 - Leituras obtidas dos piezômetros

PONTO	ESTACA	PROF. (m)	NA dos FUIROS (m)
P01	2+0,00	6,68	4,20
P02	5+0,00	15,33	2,90
P03	9+0,00	22,10	6,00
P04	N. I.	4,18	1,70
P05	N. I.	3,35	1,60
P06	N. I.	3,45	3,20
P07	15+0,00	7,70	2,90
P08	15+0,00	9,85	2,90
P09	9+0,00	10,00	4,20
P10	5+0,00	11,30	4,10
P11	2+10,00	3,75	2,00
P12	5+0,00	12,60	1,00
P13	9+0,00	16,20	1,14
P14	15+0,00	8,14	"RENTE AO SOLO"

N.I.: Não informado na planta

Com estes dados, foram simuladas as redes de fluxo, ajustando os parâmetros de permeabilidade do solo e o nível d'água a jusante da barragem, buscando a combinação que conseguisse a melhor representatividade da situação observada no campo.

Com os parâmetros calibrados e as seções geotécnicas desenhadas, foram traçadas as redes de fluxo para cada estaca de projeto (isto é, espaçadas de 20,0 m cada seção). Apresentam-se na Tabela 3 as vazões estimadas pelas seções da barragem na situação atual e com a implantação do projeto, após a execução das colunas de JG e dos drenos a jusante. A vazão de entrada (E) é a vazão que ocorre na seção vertical onde a cota piezométrica de montante (+1.065,00 m) coincide com o nível do terreno. A vazão de saída (S) foi definida como aquela que flui sob o pé do talude de jusante da barragem. O saldo das vazões ( $\Delta$ ) é a diferença entre as vazões de entrada (E) e saída (S), tanto na condição anterior ao tratamento como também na condição final de projeto.

Pode-se notar pelos dados da Tabela 3 que a solução proposta reduziria significativamente a perda d'água a jusante, praticamente eliminando o fluxo existente pela fundação da barragem.

Tabela 3 - Estimativa das vazões pelas seções das barragens na situação atual e com a implantação do projeto

Estaca	Vazão Inicial (m³/s/m)			Vazão Projeto (m³/s/m)		
	Entrada (E)	Saída (S)	Saldo (Δ)	Entrada (E)	Saída (S)	Saldo (Δ)
0	7,11E-07	7,11E-07	0,00	7,11E-07	7,11E-07	0,00
1	9,70E-07	7,14E-07	2,57E-07	7,10E-07	7,09E-07	7,70E-10
2	1,18E-06	1,16E-06	1,70E-08	8,96E-07	9,07E-07	0,00
3	1,67E-06	1,49E-06	1,77E-07	1,37E-10	8,83E-11	4,84E-11
4	2,03E-06	1,97E-06	6,10E-08	1,59E-10	9,67E-11	6,24E-11
5	2,68E-06	1,59E-06	1,10E-06	1,93E-10	1,87E-10	5,54E-12
6	2,79E-06	1,47E-06	1,32E-06	2,24E-10	2,24E-10	0,00
7	3,20E-06	1,47E-06	1,73E-06	4,56E-07	4,56E-07	0,00
8	4,33E-06	2,94E-06	1,40E-06	1,81E-06	1,81E-06	0,00
9	4,20E-06	2,37E-06	1,83E-06	1,52E-06	1,52E-06	0,00
10	4,67E-06	2,26E-06	2,41E-06	1,75E-06	1,68E-06	6,88E-08
11	4,68E-06	4,22E-06	4,54E-07	1,45E-06	1,41E-06	3,38E-08
12	5,36E-06	1,98E-06	3,37E-06	1,18E-06	9,65E-07	2,15E-07
13	5,11E-06	3,41E-06	1,70E-06	1,67E-10	1,38E-10	2,94E-11
14	3,90E-06	2,96E-06	9,36E-07	1,29E-10	1,01E-10	2,72E-11
15	1,97E-06	1,36E-06	6,10E-07	1,04E-10	7,13E-11	3,31E-11
16	1,39E-06	1,18E-06	2,10E-07	1,15E-09	5,68E-11	1,10E-09
17	8,12E-07	8,12E-07	1,00E-11	7,43E-11	2,85E-11	4,59E-11
18	4,50E-07	4,50E-07	0,00	4,87E-11	2,24E-11	2,63E-11
19	4,06E-07	4,06E-07	0,00	4,06E-07	4,06E-07	0,00
<b>TOTAL</b> (m³/s)	1,04E-03	6,88E-04	3,52E-04	2,07E-04	2,00E-04	6,40E-06

#### 4.2 Análise de estabilidade para a solução proposta

Para esta análise foi adotada a seção da estaca 9 + 0,00 m que é a seção mais próxima da calha natural do rio, apresentando o ponto mais baixo do terreno e também com a maior espessura de solo mole orgânico, ou seja, esta seção representa a situação mais crítica da obra.

Com a rede de fluxo estimada, e adotando os parâmetros de resistência apresentados na Tabela 1, foi feita a análise de estabilidade do talude a jusante da estaca 9 + 0,00 m. A análise de estabilidade resultou em um fator de segurança de FS = 2,00, considerado satisfatório.

#### 4.3 Estimativa dos recalques por adensamento

O aluvião argiloso existente a jusante da barragem sofrerá recalques por adensamento com a construção do aterro de jusante. Considerando os parâmetros obtidos nos ensaios de adensamento realizados no solo mole local e as redes de fluxo obtidas nas modelagens apresentadas, foram estimadas as magnitudes dos recalques que ocorrerão no talude a jusante da barragem nos pontos próximos às sondagens realizadas. Os parâmetros de adensamento estão

apresentados na Tabela 4 e os valores estimados de recalques estão apresentados na Tabela 5.

Tabela 4 - Parâmetros para o cálculo do adensamento

Parâmetros			
Solo	Cc/(1+eo)	Cr/(1+eo)	OCR
Aluviões	0,225	0,022	6,00

Tabela 5 - Recalques estimados

Estaca	Sondagem	Recalque (cm)
6 + 0,00 m	SP-01	0,6
	SP-02	1,4
	SP-03	23,3
9 + 0,00 m	SP-01	2,7
	SP-02	6,3
	SP-03	3,1

#### 4.4 Conclusões sobre a solução proposta

De acordo com as estimativas de projeto, a cortina de colunas de JG diminuirá a perda de água pelas fundações da barragem em 80% e o fluxo de água junto ao pé da barragem diminuirá na ordem de 98%. A vazão remanescente será coletada pelo leito drenante e pelo dreno de pé. Com isso, o problema de afloramento da linha freática à jusante da barragem tem seu efeito controlado e o processo de piping é detido.

### 5 EXECUÇÃO DA SOLUÇÃO

Como visto no item 4 decidiu-se por executar colunas secantes em *Jet Grouting*, do tipo bifluido.

Apesar da eficácia comprovada da solução escolhida para cut-offs, na Barragem do Gama a equipe de execução preocupou-se principalmente, além dos fatores de controle recomendados por Croce et al. (2014), com dois aspectos:

- Condição de significativa heterogeneidade do subsolo, com presença de turfa;
  - Eventual falta de secância entre as colunas;
- Somou-se a essas dificuldades a existência de

tomadas d'água e raízes de árvores no corpo da barragem.

A fim de que esses desafios supracitados fossem superados e colunas íntegras de solo-cimento fossem formadas, com os parâmetros definidos em projeto, houve a necessidade de seguir rigorosos métodos de execução e controle recomendados pela ABEF (2012).

Basicamente, a execução de colunas *Jet Grouting* foi dividida em três etapas:

- Perfuração do solo por meio da rotação do conjunto de hastes, de 10 cm, e mandril triconado, paralelamente com a circulação de água (500 l/min) até a profundidade de projeto. Fechamento do bico de injeção d'água por meio de esfera metálica;
- Injeção de calda de cimento a altas pressões, envelopada por jato de ar comprimido, de forma a produzir um jato de alta velocidade, erodindo o entorno e proporcionando a interação da calda de cimento com o maciço;
- Ascensão rotacional da haste de perfuração, com passo de subida, rotação, e velocidade calibradas de forma a obter colunas com os parâmetros característicos.

Observa-se que diversos cuidados são recomendados para que se minimize instabilidades do maciço a ser tratado. Não só os parâmetros recomendados por Croce et al (2014), a serem discretizados no item 5.3, devem ser analisados, mas também o diâmetro da haste, o tipo de tricô, o volume da água de perfuração e o mecanismo interno de injeção do maquinário a ser utilizado. Para a escolha da máquina a ser utilizada estes fatores também foram considerados.

Outro aspecto observado para a execução foi o processo de formação das colunas. Como não são formadas imediatamente, colunas com endurecimento suficiente para resistir a injeções laterais são formadas após processo de cura de 48 horas, estas eram realizadas de maneira espaçada, de forma que a execução de uma coluna não interferisse com a cura de outra.

Segundo Croce et al (2014), este método de se fazer furos intercalados, chamado de “fresh in hard”, necessita de controle especial. Este cuidado se justifica pelo fato da possibilidade de ocorrência do chamado “efeito sombra” entre as

colunas, fenômeno causado pela dificuldade do jato erodir o maciço do contorno das colunas primárias (P), tendo possibilidade de formação de colunas secundárias (S) com diâmetro inferior ao desejado. Logo, após a formação e cura das colunas primárias, o espaço entre elas, formado por colunas secundárias, era preenchido até que a secância desejada fosse observada. Assim, algumas vezes foi necessária a injeção das colunas secundárias com pressões ligeiramente superiores às utilizadas nas colunas primárias.

De forma a obter colunas de diâmetro de 0,8 m, com coeficiente de permeabilidade baixo o suficiente para reduzir o fluxo pelo maciço e pela fundação da barragem e que as colunas tivessem resistência à compressão adequada, controlou-se os parâmetros de execução. Para isso foram consideradas as recomendações de Croce et al (2014) e a experiência dos projetistas e dos executores em obras de *Jet Grouting* passadas. Desse modo se obteve os parâmetros iniciais da Tabela 6.

Tabela 6. Parâmetros executivos iniciais

Passo de levantamento da haste (m)	0,05
Velocidade de levantamento da haste (m/s)	0,006
Rotação da haste (RPM)	8
Rotações da haste por passo (RPM/ passo)	1,07
Diâmetro do bico (m)	2,5
Número de bicos	2
Pressão da calda (MPa)	15
Pressão do ar (MPa)	1
Vazão da calda (m <sup>3</sup> /s)	1,2.10 <sup>-3</sup>
Fator a/c pelo peso	0,7

Após a adoção desses parâmetros fez-se colunas teste em locais da barragem não afetados pelo piping, obtendo-se colunas de solo-cimento de diâmetro médio de  $0,8 \pm 0,1$  m, como observado na Figura 2. Assim, inicialmente, adotou-se esses parâmetros para a execução da obra.



Figura 2. Coluna teste de Jet Grouting

## 6 INSTRUMENTAÇÃO MONITORAMENTO DA SOLUÇÃO

E

A Recuperação da Barragem do Gama requeria cuidados especiais, pelo processo exacerbado de retroerosão subsuperficial e pelo baixo grau de controle quando da construção da barragem, no fim da década de 1950, fato que levou à formação de camadas de maciço com parâmetros pouco adequados para uma barragem de terra. Segundo dados de Perini (2009), 36% dos casos de rompimento de barragens de terra zoneada, caso da Barragem do Gama, são por piping.

Na obra em estudo, além do fato de a barragem ter diversos focos de retroerosão subsuperficial, a obra também apresentava, diversas árvores à jusante, com tomadas d'água que passavam em sua seção média, fatores agravantes para sua recuperação.

Assim, pelo elevado risco na execução da recuperação da barragem, e de forma que tanto os projetistas quanto os executores pudessem ter maior confiança no ritmo da obra e pudessem tomar decisões técnicas expeditas, foi necessário realizar instrumentação e monitoramento adequados.

### 6.1 Instrumentação

A instrumentação de obras geotécnicas se divide em três tipos: monitoramento passivo, monitoramento em tempo real para controle de construções e monitoramento por segurança (Bassett et al, 2012). No caso da obra em estudo, a instrumentação se enquadra nos dois primeiros

casos, já que houve cálculos prévios concernentes ao comportamento da barragem quanto ao fluxo na fase de projeto e também uma instrumentação em tempo real para ajustes dos parâmetros de execução em função dos dados de piezometria e de deslocamentos. Dessa forma, caso se obtivessem medidas dos instrumentos de campo diferentes das previamente calculadas, ações remediadoras poderiam ser efetuadas.

Assim, a fim de se fazer um monitoramento com provisão de relatórios suficientemente precisos para a avaliação da Recuperação da Barragem do Gama, piezômetros elétricos, marcos superficiais e inclinômetros foram instalados

Os piezômetros foram instalados para a avaliação da performance da obra em relação ao fluxo, de forma que a água passante pela barragem tivesse parâmetros de magnitude e direção similares aos previstos em projeto. Ademais, era possível acompanhar se a intervenção resultava na perda de carga prevista, com eliminação do processo de retroerosão e o alcance de uma natureza “impermeável” no corpo da barragem. Para isso, os projetistas estabeleceram junto à topografia pontos chave da barragem para instalação dos equipamentos - as ombreiras, o local em que os pontos de piping se manifestavam com mais intensidade e locais próximos às tomadas d'água.

Já quanto aos marcos superficiais e inclinômetros foram instalados para prover dados do comportamento da barragem relacionados à sua estabilidade local e global quanto aos deslocamentos.

Os marcos superficiais eram sensíveis o bastante para que pequenos abatimentos do talude de jusante fossem detectados, de modo que o layout da movimentação da máquina de *Jet Grouting* e a sequência de execução das colunas pudessem ser otimizadas. Assim, os marcos superficiais forneciam dados do comportamento vertical dos taludes da barragem e propiciavam a detecção de superfícies de terrenos possivelmente instáveis, os quais eram injetados com cuidado redobrado.

Já os inclinômetros, de dois eixos, monitoravam qualquer movimentação da

barragem nos planos horizontais, normal e longitudinal, complementando a atuação dos marcos superficiais, possibilitando uma análise tridimensional quanto aos esforços e deslocamentos. A instalação dos inclinômetros foi feita em seções consideradas críticas quanto a estabilidade, especialmente as que apresentavam predominância de turfa.

Dessa forma, por meio da análise dos dados, coletados duas vezes ao dia, era possível monitorar e avaliar o comportamento da barragem, interferindo, quando necessário, na sequência executiva previamente estabelecida.

## 6.2 Monitoramento

Para assegurar o prosseguimento dos trabalhos, foi feito o monitoramento constante da barragem. Com avaliação contínua dos dados gerados pelos instrumentos era possível tomar decisões técnicas mais assertivas.

Pelo processo de *Jet Grouting* deixar o objeto de sua intervenção momentaneamente instável, é necessária, além da instrumentação, a atenta observação quanto às proximidades do equipamento. Dessa atenção adveio a possível explanação de comportamentos abruptos detectados a partir da análise gráfica dos dados de instrumentação.

Além da influência da vibração e movimentação dos equipamentos, o monitoramento também detectou um formigueiro abandonado, de grandes dimensões, no interior do corpo da barragem, que também gerou instabilidades. Percebeu-se, ainda, que havia outros vazios nas proximidades deste formigueiro devido às grandes extensões de raízes de árvores, presentes à jusante da barragem. Agravante a essa situação, foi constatado que a lâmina de turfa tinha espessura preocupantemente superior à prevista em projeto.

Assim, a partir da análise desses dados adicionais, que agravaram o quadro original, demandou-se que o tratamento em *Jet Grouting* nesta região seria paralisado temporariamente e que injeções de consolidação seriam realizadas nos 70 m em que se constatou necessidade de se

adensar o maciço. Essa consolidação foi feita de forma a evitar possíveis novos caminhos preferenciais de percolação, além do preenchimento dos poros do solo no trecho afetado. As injeções de consolidação foram de calda de cimento, injetada a baixas pressões, conforme recomendado por Zirlis et al. (2015).

Após a observação visual da obra e a análise dos dados da instrumentação e dos boletins de injeções de consolidação, a eficácia do tratamento foi constatada; assim, retomou-se a intervenção por meio da metodologia *Jet Grouting* nesta região que enfim se mostrou com consolidação suficiente.

## 7 RESULTADOS

### 7.1 Considerações iniciais

A avaliação de sucesso de obras geotécnicas é bastante complexa. De todo modo, a avaliação da eficácia da Recuperação da Barragem do Gama partiu da premissa que uma análise macroscópica seria suficiente para o problema.

### 7.2 Avaliação dos parâmetros

Para fins de constatação do sucesso da Recuperação da Barragem do Gama, os parâmetros resultantes do tratamento executado foram avaliados e comparados com os previstos em projeto. Para isso, além da observação dos dados de instrumentação e da análise visual minuciosa, amostras de 15 m de 4 colunas (1% do total) foram retiradas e analisadas quanto ao grau de fraturamento. Nessas 4 colunas, que foram selecionadas nos trechos em que se havia maiores incertezas quanto à formação e integridade do solo-cimento, também se realizou ensaios de perda d'água, com metodologia adaptada de Porto (2002).

Quanto à instrumentação, o principal indicador da eficácia da cortina de natureza impermeável projetada adveio, obviamente, dos dados coletados pelos piezômetros elétricos. Houve pontos da barragem, próximos ao sangradouro, em que o nível d'água estava em profundidade inferior às cotas de instalação dos

piezômetros, os quais não detectaram fluxo algum. Nos piezômetros restantes, a carga hidráulica obteve valores por vezes menores que os esperados de projeto, fato que atestou a secância adequada das colunas *Jet Grouting* e o grau de impermeabilização adequado propiciado pelo tratamento.

Para auxiliar a análise visual, feita com objetivo principal de avaliar o diâmetro das colunas, previstos para serem de  $0,8 \pm 0,1$  m, foram feitas medidas de superfície. Apesar de que o diâmetro superficial das colunas não seja indicativo evidente da magnitude do diâmetro da porção inferior dessas, este dado, junto com a carga hidráulica medida à jusante da barragem, foi suficiente para indicar que houve secância suficiente entre as colunas.

De todo modo, esperava-se que o diâmetro da porção inferior das colunas teria dimensões suficientes para a secância das mesmas. Essa expectativa é justificada pelo fato que o maciço, até a camada de saprólito, possuía resistência baixa o suficiente para que colunas de diâmetros acima de 0,8 m fossem formadas (Croce et al, 2014). Ainda assim, havia a dúvida se as colunas formadas teriam o grau de impermeabilidade adequado. Para isso, complementarmente à análise dos dados piezométricos, fez-se a análise do fraturamento dos testemunhos e dos ensaios de perda d'água nas 4 colunas selecionadas.

Para a avaliação do fraturamento e da qualidade de amostras de sondagens de colunas *Jet Grouting*, Yoshitake et al (2003) propuseram uma forma alternativa à metodologia RQD: o CRI (Core Recovery Index). Esta metodologia, idealizada a partir da própria classificação RQD, baseia-se na análise visual dos testemunhos de colunas *Jet Grouting*.

No artigo de Yoshitake et al (2003), os autores apresentaram uma correlação da resistência uniaxial para diferentes tipos de testemunho. Na obra em estudo, apesar de a preocupação ter sido com o coeficiente de permeabilidade, a apresentação da classificação dos testemunhos retirados justifica-se pela geração de dados para futuras correlações do CRI com o parâmetro de permeabilidade da amostra e por este método também possuir um

aspecto qualitativo.

Dessa forma, a partir das análises dos quatro testemunhos, a qualidade da amostra, de diâmetro de 0,1 m, extraída por meio de equipamento de sondagem rotativa, foi avaliada quanto ao aspecto geral do tratamento.

Pode-se dizer que até a profundidade de 9,1 m as amostras apresentaram alta qualidade de tratamento, com majoritária parcela de material de nível 1 (poucas fissuras, sólido e predominantemente homogêneo) e parte do material com nível 2 (presença de frações de argila). Após esse trecho, há a parte em turfa; apesar de as colunas terem se formado, há a presença de material nível 3, com maciço fraturado. De todo modo, de acordo com o método de avaliação CRI, pode-se caracterizar o tratamento executado como de alta qualidade.

Já para a obtenção do coeficiente de permeabilidade, utilizou-se metodologia adaptada de Porto (2002). As colunas *Jet Grouting* foram ensaiadas de 3 em 3 m, em 5 trechos, totalizando 15 m de profundidade. Em cada trecho de 3 m, pressões ascendentes, múltiplas de 25 kPa, até um valor pico de 150 kPa, foram aplicadas e depois decresceu-se essas pressões de forma análoga a anterior até o valor mínimo de 25 kPa.

Nos quatro testemunhos ensaiados, a maior perda d'água foi de  $1.04.10^{-5}$  m/s, na coluna 317, no trecho entre 3 e 6 m, numa porção que originalmente era composta por turfa. Dentre as colunas ensaiadas, a maior permeabilidade foi de magnitude da ordem de  $10^{-6}$  m/s, sempre no trecho em que originalmente se encontrava turfa.

Nos piezômetros, percebe-se que houve uma queda de carga nas leituras dos instrumentos a jusante das colunas de *Jet Grouting*, porém esta queda está aquém do esperado pelo modelo adotado. Mesmo assim, o tratamento executado se mostrou plenamente satisfatório, tendo cessado por completo as surgências d'água a jusante.

## 8 CONCLUSÃO

É recomendável que obras geotécnicas sejam inspecionadas rotineiramente após suas

implantações, especialmente as barragens. Foi numa inspeção destas que o problema ora exposto foi detectado e resolvido a tempo, evitando um possível acidente de proporções provavelmente catastróficas.

Um bom projeto geotécnico depende fundamentalmente de um bom diagnóstico, o qual deverá estar embasado em inspeções visuais e, sempre que possível, em ensaios de campo e de laboratório para a obtenção dos parâmetros de resistência e deformabilidade adequados.

A execução das obras propostas deve ser monitorada através da instalação de instrumentos adequadamente escolhidos e posicionados, permitindo ajustes ao projeto original sempre que se fizerem necessários para manter a segurança durante a execução da obra e para minimizar a probabilidade de insucesso após a conclusão da mesma.

No estudo de caso ora apresentado, o tratamento do processo de piping em curso através da execução de uma parede de baixa permeabilidade com colunas de JG se mostrou plenamente satisfatório, tendo sido eliminados os pontos de surgência d'água a jusante.

A solução proposta contava, ainda, com um sistema de drenagem de pé a jusante, que seria responsável pela correta condução dos fluxos d'água remanescentes após o tratamento. Esta redundância é sempre recomendável em situações como esta, pois caso ocorresse alguma falha no sistema de "impermeabilização", o fluxo resultante desta falha seria coletado pelo sistema de drenagem a jusante e conduzido adequadamente para o leito natural do Ribeirão do Gama, sem que este fato pudesse implicar e riscos para o barramento.

É preciso um estudo mais aprofundado do comportamento piezométrico obtido neste tratamento, pois as pressões neutras apresentaram queda a jusante menor do que aquela prevista nos modelos de projeto, mas o fluxo d'água foi totalmente cessado, configurando constatações aparentemente contraditórias.

Como o aterro de jusante desta obra ainda está em fase final de execução, não foi possível comparar os recalques estimados com os

recalques realmente ocorridos.

## AGRADECIMENTOS

Os autores reconhecem as informações fornecidas pelas empresas Solotrat, Trier e Tuv-Sud Bureau. Os autores também agradecem o apoio das seguintes instituições: o Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior e a Universidade de Brasília.

## REFERÊNCIAS

- ABEF (2012). Manual de Execução de Fundações e Geotecnia – Práticas Recomendadas. Pini, São Paulo, SP, pp 441-466.
- CPRM (2004). Serviço Geológico do Brasil – Carta Geológica do Brasil ao Milionésimo – Folha SD-23
- Croce P., Flora A., Modoni G. (2014). *Jet Grouting – Technology, Design and Control*. CRC Press, Boca Raton, Florida, USA, 298 p.
- Perini, D. S. (2009). Estudo dos processos envolvidos na análise de riscos de barragens de terra. Dissertação de Mestrado em Geotecnia, Publicação G.DM-180/09, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 128p.
- Porto, E. C. (2002). Critério para determinação de vazões pela fundação de barragens com base nos ensaios de perda d'água o caso da Usina Hidrelétrica de Itaipu. Dissertação de Mestrado em Construção Civil, Programa de Pós-Graduação em Construção Civil da Universidade Federal do Paraná PPGCC/UFPR, Curitiba, PR, 104p.
- Zirlis, A. C., Souza, G. J. T., Pitta, C.A. (2015). Manual de Serviços Geotécnicos. Solotrat, São Paulo, SP, 93 p.
- Yoshitake, I., Mitsui, T., Yoshikawa, T., Ikeda, A. & Nakagawa, K. (2003). An evaluation method of ground improvement by *Jet Grouting*. Proceedings of the Japan Society of Civil Engineers 735: pp. 215–220.