

## Revisão das Condições de Segurança da Barragem de Curuá-Una (PA)

Alexandre Reis Saré

Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro – PUC-Rio, Rio de Janeiro, Brasil

Laryssa Petry Ligocki

Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento – LACTEC, Curitiba, Brasil; Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro – PUC-Rio, Rio de Janeiro, Brasil

Alberto Sayão

Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro – PUC-Rio, Rio de Janeiro, Brasil

Denise Maria Soares Gerscovich

Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil

Giorgiana Freitas Pinheiro

REDE Celpa, Belém do Para, Brasil

**RESUMO:** O artigo tem como objetivo o estabelecimento das condições de segurança da barragem de terra de Curuá-Una. O monitoramento é realizado por meio de piezômetros instalados no corpo da barragem. Comparações entre dados de campo e simulações numéricas permitiram a determinação das condições de fluxo no maciço. A simulação de diferentes níveis do reservatório permitiu a definição de limites de operação que estão associados a diferentes valores de fatores de segurança. Os limites de segurança determinados para cada instrumento constituem a carta de risco da barragem, isto é, a condição de segurança da mesma. As análises realizadas mostram que a barragem opera dentro dos padrões de segurança estabelecidos. Barragem, segurança e instrumentação.

**PALAVRAS-CHAVE:** Barragem de Terra, Segurança, Instrumentação.

### 1 INTRODUÇÃO

A identificação de riscos inerentes ao projeto de barragens é fundamental para o correto funcionamento do empreendimento. O nível de segurança fornece um diagnóstico do comportamento do talude e dos outros elementos da obra. O conceito de segurança deve ser entendido em um sentido global, envolvendo aspectos de natureza geotécnica, estrutural, hidráulica, operacional e ambiental.

Os diversos aspectos relacionados com a segurança de barragens têm constituído uma preocupação constante para projetistas e órgãos reguladores governamentais. Muito se tem discutido no sentido de se adotar uma legislação, visando estabelecer normas relacionadas às fases de: projeto, de construção e de aproveitamento, bem como os aspectos de segurança.

O monitoramento de barragens é a principal ferramenta na avaliação de suas condições de segurança. Este monitoramento assume diferentes características e finalidades dependendo da etapa da obra que se deseja analisar. Ao longo de sua vida útil, o monitoramento pode detectar variações nas condições de segurança, como resultado de processos de envelhecimento e alterações ambientais. O conhecimento do nível de segurança é importante para a elaboração de um plano de contingência; isto é, para definição do conjunto de ações que devem ser tomadas caso ocorra alguma alteração significativa do nível de segurança da barragem.

O objetivo deste trabalho é a revisão das condições de segurança da barragem de terra da U.H.E. Curuá-Una (Santarém-Pará). A partir de dados de piezometria foi possível avaliar o fator de segurança com base em análises de

equilíbrio limite. A análise foi então estendida para condições piezométricas mais severas, estabelecidas com base em simulações numéricas do aumento gradativo do nível do reservatório.

## 2 DESCRIÇÃO DA BARRAGEM

A U.H.E. Curuá-Una está localizada na floresta Amazônica, a aproximadamente 70km ao sul da cidade de Santarém (Figura 1).



Figura 1 - Localização da U.H.E. de Curuá-Una

O complexo foi inaugurado em 1977 e atualmente possui 3 turbinas instaladas, cada uma gerando 9,5MW. A usina é de propriedade da REDE Celpa – Centrais Elétricas do Pará.. O projeto da usina consta de casa de força, com canal adutor e canal de fuga, vertedouro, barragem de terra e uma subestação. Uma descrição detalhada do projeto pode ser encontrada em Ligocki et al.(2003).

A barragem de terra possui altura máxima de 26m e extensão de 600m. O nível máximo do reservatório situa-se na cota 68m e tem uma borda livre de 3m. A seção da barragem é do tipo zonada, constituída por aterros de areia pouco argilosa, nas abas de montante e jusante, núcleo central impermeável de argila arenosa e um dreno tipo chaminé localizado a jusante do núcleo (Figura 2). Os taludes de montante possuem inclinação variável de 1:2,5 (V:H) e 1:1,5 (V:H). Ambos os taludes apresentam bermas intermediárias.

A barragem está assente sobre uma seqüência sedimentar homogênea de areias e argilas, com presença reduzida de arenitos. O sistema de controle de percolação da fundação é constituído por um tapete impermeável localizado a montante. Esse tapete foi construído com o mesmo material do núcleo e possui comprimento de 240m e espessura variando de 4,0m, no contato com a barragem, a 1,5m, na extremidade de montante.

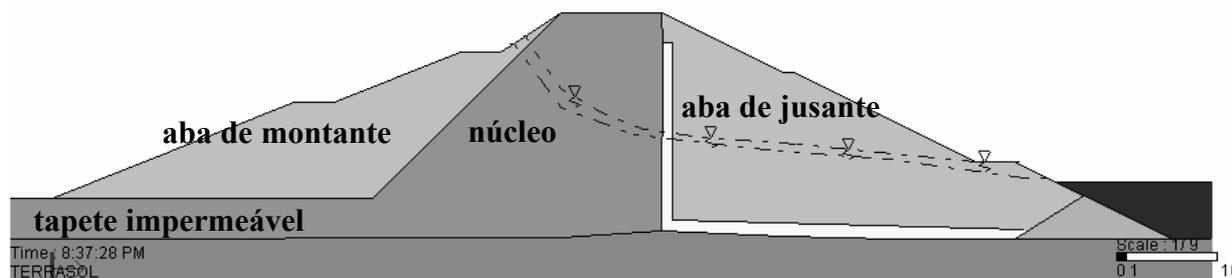


Figura 2 – Seção transversal típica da U.H.E. de Curuá-Una.

A barragem de terra vem sendo monitorada por piezômetros tipo Casagrande desde a fase de construção. Mais recentemente, em 2002, foi implantado um sistema de auscultação automático, composto por 15 piezômetros elétricos, sendo 11 localizados na barragem (corpo da barragem e fundação) e 4 na casa de força, distribuídos em duas seções. Este novo sistema substituiu grande parte dos piezômetros antigos e forneceu dados para os estudos aqui apresentados.

### 3 PADRÃO DE FLUXO

A Figura 3 mostra o posicionamento dos 05 piezômetros instalados no corpo da barragem, em conjunto com a linha piezométrica registrada no mês de agosto 2002. A

Tabela 1 detalha os dados geométricos e os valores médios das leituras efetuadas nos piezômetros para o mês de agosto de 2002 (N.R.=66,84m).

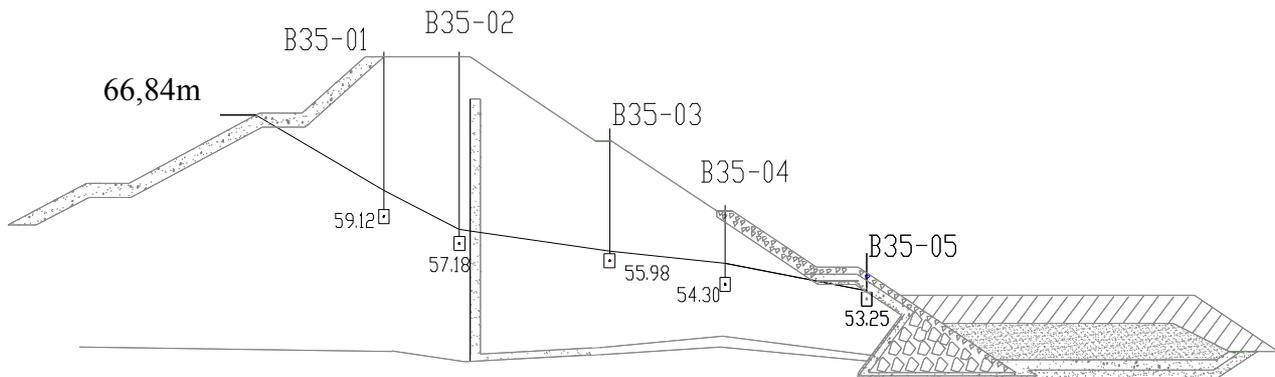


Figura 3 - Cotas piezométricas para nível do reservatório de 66,84m

Tabela 1- Cargas de pressão e cotas piezométricas em agosto de 2002

Piezômetro	Cota de Instal. (m)	Cota Piezom.(m)	Carga de Pressão (m)
B35-01	59,12	61,47	2,35
B35-02	57,18	58,71	1,53
B35-03	55,98	57,15	1,17
B35-04	54,30	56,29	1,99
B35-05	53,25	54,31	1,06

Uma vez definido o nível piezométrico da barragem, procurou-se estimar os valores de permeabilidade dos diversos materiais constituintes, a partir da reprodução do padrão de fluxo que resultasse na mesma linha piezométrica. Nesta retro-análise utilizou-se o programa de elementos finitos FLOW3D (Gerscovich, 1994).

Diversas simulações foram realizadas para diferentes valores de permeabilidade nas direções vertical e horizontal. A ordem de grandeza dos coeficientes de permeabilidade para os diversos materiais da barragem foi estabelecida com base em ensaios de laboratório e relatórios de execução do projeto (Ligocki, 2003 e Saré, 2003). A Tabela 2 apresenta os coeficientes de permeabilidade que melhor reproduziram ao dados de campo, em

função do material e da localização do mesmo na barragem. A

Tabela 3 compara os valores das cotas piezométricas registradas em campo com os valores estimados pelo programa FLOW3D. A última coluna desta tabela mostra que o erro percentual entre as leituras de campo e numérica situa-se em torno de 0,3%, com exceção do piezômetro B35-05 que apresentou um erro igual a 1,5%. Este fato pode ser explicado devido a uma possível heterogeneidade que não foi satisfatoriamente representada na modelagem numérica.

Uma vez determinados os contrastes de permeabilidade que regulam o fluxo no corpo da barragem, foi possível simular condições de fluxo para diferentes cotas do nível do reservatório.

Tabela 2 - Valores de permeabilidade (k) obtidos com base nos dados de laboratório e simulação numérica

Material	Região	Permeabilidade (m/dia)	
		horizontal	vertical
Areia Silto-argilosa	Aba Montante	4,5x10-3	9,0x10-4
Argila	Núcleo	2,0x10-3	4,3x10-4

Compactada			
Areia Silto argilosa	Aba Jusante	$3,2 \times 10^{-2}$	$6,5 \times 10^{-3}$
Areia	Drenos e Tapete Permeável	$8,6 \times 100$	$8,6 \times 100$
Areia	Fundação Perm.	$2,5 \times 100$	$5,0 \times 10^{-1}$
Solo Imperm.	Camada Inferior	$1,0 \times 10^{-7}$	$1,0 \times 10^{-7}$

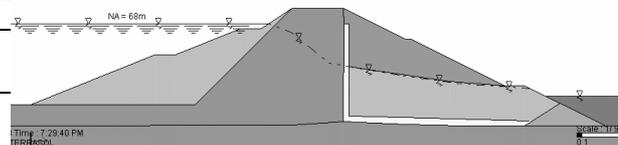


Figura 4 - Seção transversal da barragem

Tabela 3 - Comparação entre a simulação numérica e a instrumentação de campo

Piezômetros	Cota Piezométrica (m)		
	Campo	Numérica	Erro (%)
B35-01	61,47	61,50	<0,1
B35-02	58,71	58,87	0,3
B35-03	57,15	57,07	0,1
B35-04	56,29	56,40	0,2
B35-05	54,31	55,14	1,5

Tabela 4 - Parâmetros geotécnicos da barragem de

Material	Local	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	$c'$ (kPa)	$\phi'$ (°)
1	Abaixo da L.F.	19,5	0	30
2	Acima da L.F.	20,4	39	26
3	Núcleo	15	50	28
4	Pé de Jusante	20	0	40
5	Filtro	20	0	34
6	Fundação	20	2	32
7	Reforço	20	10	35

#### 4 ANÁLISE DE ESTABILIDADE

No presente trabalho foram definidos três níveis de segurança: Normal, Atenção e Emergência, associados aos fatores de segurança, calculados com base em análises por equilíbrio limite. Para a barragem em operação, sob condição de fluxo permanente, considerou-se como situação de operação Normal, àquela em que os níveis piezométricos refletem uma condição de estabilidade associada a fatores de segurança (FS) superiores a 1,5. Como situação de Atenção, foram consideradas as condições de fluxo que resultam em fatores de segurança entre 1,50 e 1,20. Condições de estabilidade com  $FS < 1,20$  foram classificadas na faixa de Emergência..

As análises de estabilidade levaram em consideração o zoneamento da barragem (Figura 4), assim como a as condições de saturação dos materiais; abaixo da linha freática o solo foi considerado saturado. A Tabela 4 resume os diferentes parâmetros geotécnicos adotados na presente análise. Os parâmetros relativos a aba de jusante foram obtidos em ensaios de laboratório, realizados por Ligocki, 2003 e Saré, 2003, e os demais extraídos de relatórios técnicos.

Os estudos consistiram na variação das condições de fluxo em decorrência da elevação do nível do reservatório. Com os novos níveis piezométricos, definidos pelo programa FLOW3D, avaliava-se a estabilidade, utilizando-se o programa Talren 97 (Terrasol, 1997) e admitindo-se superfícies potenciais de ruptura circulares (Bishop, 1955).

A Tabela 5 mostra as cotas piezométricas que delimitam os níveis de segurança, bem como as cotas piezométricas para o mês de Agosto de 2002 (Nível do reservatório 66,84m). Os dados estão apresentados para todos os 05 piezômetros. Observa-se que em Agosto de 2002, a barragem apresenta  $FS > 1,5$  uma vez que os piezômetros registram cotas cerca de 1,5m mais baixas das associadas ao  $FS=1,5$  (Figura 5)

Com base nesses valores limites é possível estabelecer para cada um dos piezômetros o seus limites de operação. As leituras obtidas em campo devem ser constantemente comparadas com os valores propostos para os níveis de segurança. Leituras piezométricas que excedam as condições de segurança devem ser consideradas criteriosamente na elaboração do plano de contingência da barragem.

Tabela 5 – Comparação entre cotas piezométricas medidas, previstas e associadas aos níveis de alerta

Cota Piezom. (m)	Níveis de Segurança (m)
Nível do	

reservatório 66,84m			
Piezômetro	Medido	Atenção (FS=1,50)	Emergência (FS=1,20)
B35-01	61.47	63.59	65.92
B35-02	58.71	59.79	61.28
B35-03	57.15	57.57	58.78
B35-04	56.29	56.30	57.40
B35-05	54.31	55.06	57.00

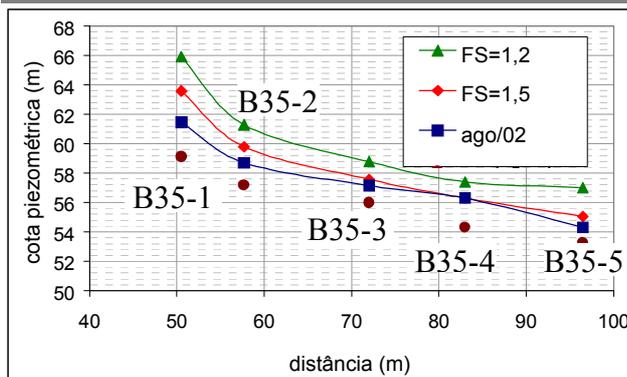


Figura 5 - Condição de operação da barragem durante agosto de 2002

## 6 CONCLUSÕES

Este trabalho teve como principal objetivo apresentar um estudo de avaliação das condições de segurança da barragem de Curuá-Una, Pará. A partir dos nos registros piezométricos, foram estudadas diferentes condições de fluxo no corpo da barragem. A simulação numérica de fluxo permitiu a determinação dos valores de permeabilidade para os diversos materiais da barragem, tendo como base os parâmetros obtidos no laboratório e durante a revisão bibliográfica. Após estabelecidas as condições de fluxo, foi possível simular diferentes níveis de operação do reservatório, associadas diferentes leituras piezométricas.

Com base nos dados piezométricos e nas análises de estabilidade foram definidas 3 categorias de operação: Normal, Atenção e Emergência, função dos fatores de segurança atualmente recomendados em projetos de barragens. Para as condições de fluxo simuladas, verificou-se que a barragem situa-se dentro dos limites normais de segurança ( $FS \geq 1,5$ ). As análises também permitiram estabelecer limites piezométricos, associados aos diversos graus de segurança barragem. Estes limites piezométricos foram definidos

como os níveis de segurança, isto é, a carta de risco de operação da barragem.

Com estas informações, o controle das condições de estabilidade do maciço pode a ser feito com base em um simples acompanhamento da instrumentação. Com isso, fica evidenciado que um programa de monitoramento adequado, associado a um processo de análise, possibilitam um gerenciamento eficaz das condições de segurança de barragens.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem às Centrais Elétricas do Pará (Rede Celpa), em particular à Eng. Giorgiana Pinheiro, por disponibilizar os dados necessários para a realização desta pesquisa. À CAPES, CNPq e REDE Celpa pelo apoio financeiro.

B35-5

## REFERÊNCIAS

- BISHOP, A. W. The use of the slip circle in stability analysis of earth dams. *Géotechnique*, v. 5, p. 7-17. 1955.
- BRINKGREVE, R. B. J.; VERMEER, P. A (editores). *PLAXIS: Finite element code for soil and rock analyses, version 7.2. Technical Manual*. Rotterdam: A. A. Balkema, 1998. 364p.
- GERSCOVICH, D. M. S. Fluxo em meios porosos saturados e não saturados: modelagem numérica com aplicações ao estudo da estabilidade de encostas no Rio de Janeiro. Tese de Doutorado – PUC-Rio, Rio de Janeiro, 232f. 1994.
- LIGOCKI, L. P. Comportamento da barragem de Curuá-Una, Pará. Dissertação de Mestrado - PUC-Rio, Rio de Janeiro, 173 f. 2003.
- LIGOCKI, L. P.; SARÉ, A. R.; GERSCOVICH, D. M. S.; SAYÃO, A. S. F. J. Avaliação de segurança da barragem de Curuá-Una com base na piezometria. In: *Seminário Nacional de Grandes Barragens*, 25. Salvador, 12 f. 2003.
- SARÉ, A. R. Análise do fluxo da barragem de Curuá-Una, Pará. Dissertação de Mestrado – PUC-Rio, Rio de Janeiro, 168 f. 2003.
- SAYÃO, A. S. F. J.; SARÉ, A. R.; LIGOCKI, L. P.; GERSCOVICH, D. M. S. Estudo de estabilidade e comportamento da barragem da U.H.E. de Curuá-Una – Projeto de pesquisa e desenvolvimento na U.H.E. de Curuá-Una.. Relatório Técnico. PUC-Rio, Rio de Janeiro, 55

f. 2002.

TERRASOL. Manual técnico do programa Talren:  
França, 192 f. 1997.