

AVALIAÇÃO DE SEGURANÇA DA BARRAGEM DE CURUÁ-UNA COM BASE NA PIEZOMETRIA

Alexandre R. Saré - doutorando, Departamento de Engenharia Civil, PUC-Rio

Laryssa P. Ligocki - doutoranda, Departamento de Engenharia Civil, PUC-Rio

Denise M. S. Gerscovich - Professora Adjunta, Departamento de Estruturas e Fundações, UERJ

Alberto S. F. J. Sayão - Professor Associado, Departamento de Engenharia Civil, PUC-Rio

Resumo: O presente trabalho descreve a avaliação das condições de segurança da barragem de Curuá-Una, para diferentes cotas do reservatório. Os regimes de fluxo foram simulados numericamente, tendo como base os registros piezométricos. Graus de segurança (Normal, Atenção e Emergência) foram sugeridos, de acordo com os valores praticados na engenharia de barragens. Os parâmetros geotécnicos foram estimados a partir de informações de campo e laboratório. As análises mostraram que a barragem encontra-se em nível de operação Normal. Também foram definidos limites piezométricos, associados aos diversos graus de segurança barragem. Adicionalmente, simulações numéricas permitiram prever o regime de fluxo no interior da barragem após um possível alteamento.

Abstract: *This paper describes the evaluation of safety of Curua-Una Dam, for different reservoir levels. Flow regime was numerically modeled, taking into account piezometers records. Safety levels (Normal, Attention, Emergency) were suggested, according to engineering practice. The geotechnical parameters were estimated by field and laboratory data. The analyses indicated that the dam is operating in Normal level. Piezometric limits related to the different dam's safety levels were also identified. Additionally, numerical simulations had allowed to predict the dam flow behaviour after a possible water rising.*

1 – INTRODUÇÃO

Em muitos países a construção de barragens representa um elemento de vital importância para o desenvolvimento sócio-econômico de uma região. No entanto, devido às suas características, estas podem vir a apresentar, seja de forma direta ou indireta, um potencial risco para pessoas e bens.

Conseqüentemente, os diversos aspectos relacionados com a segurança de barragens têm constituído uma preocupação fundamental para projetistas e

órgãos reguladores governamentais. Muito se tem discutido no sentido de se adotar uma legislação, visando os aspectos de segurança, bem como de se estabelecerem normas relacionadas às fases de: projeto, de construção e de aproveitamento (Ramos e de Melo, 2003). Convém ressaltar que o conceito de segurança deve ser entendido em um sentido global, envolvendo aspectos de natureza geotécnica, estrutural, hidráulica, operacional e ambiental.

O monitoramento de barragens é de fundamental importância para o controle da segurança nas fases de execução e operação. Este monitoramento assume diferentes características e finalidades dependendo da etapa da obra que se deseja analisar.

Durante a construção, os instrumentos fornecem dados que possibilitam avaliar o comportamento da obra e, com isso, corrigir e/ou aprimorar determinadas premissas de projeto. Nesta fase, os principais objetivos da instrumentação apontam para a verificação de hipóteses, critérios e parâmetros de projeto, verificação da adequação dos métodos construtivos, etc.; com isso, visa-se executar um projeto mais econômico e seguro. Já ao longo de sua vida útil, o monitoramento pode detectar variações nas condições de segurança das barragens, como resultado de processos de envelhecimento e/ou alterações ambientais.

Este trabalho apresenta um estudo dos níveis de segurança da barragem de terra da U.H.E. Curuá-Una, para as condições atuais de operação e condições futuras de alteamento do nível do reservatório. A condição de segurança foi avaliada com base em dados da instrumentação.

2 – DESCRIÇÃO DA U.H.E CURUÁ-UNA

A U.H.E Curuá-Una localiza-se no interior da floresta Amazônica, a aproximadamente 70km ao sul da cidade de Santarém (PA). Os estudos de viabilidade datam de 1952 e sua implantação ocorreu em 1977, quando a primeira turbina entrou em operação.

Atualmente, o complexo possui 3 turbinas instaladas, cada uma gerando 9,5MW. O projeto de aproveitamento de Curuá-Una prevê ainda a instalação de uma quarta unidade geradora. Com a tecnologia disponível atualmente no mercado, um aumento do nível do reservatório poderia aumentar o potencial de geração, além de permitir a instalação de uma nova turbina uma com maior potência. Com esta ampliação, a U.H.E. Curuá-Una poderia suprir a demanda energética da região de Santarém.

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 (Figura 01).

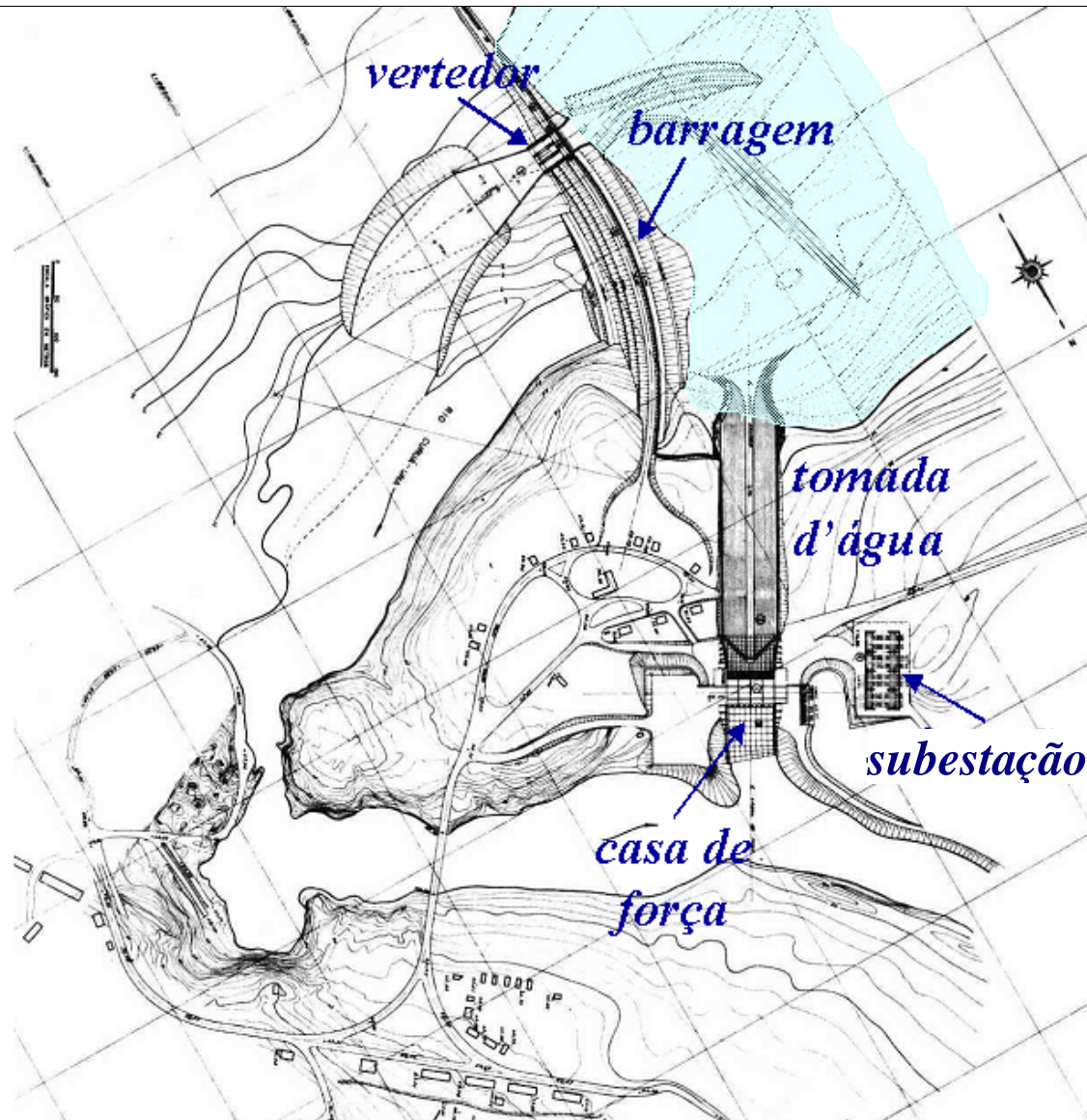


FIGURA 1 - Planta esquemática da U.H.E. de Curuá-Una (Pierre et al, 1982)

A barragem de terra situa-se na parte central do rio, ligando o vertedouro (ombreira direita) à tomada d'água (ombreira esquerda). A barragem possui altura máxima de 26m e extensão de 600m, ficando o ponto mais baixo da fundação na cota 42m. O nível máximo previsto para o reservatório situa-se na cota 68m. A barragem foi construída com largura de crista de 10m e opera com uma borda livre de 3m.

Os taludes de montante possuem inclinação variável de 1:2,5 (V:H) e 1:1,5 (V:H) e o talude de jusante possui inclinação de 1:2 (V:H). Ambos os taludes apresentam bermas intermediárias. O talude de montante é protegido com enrocamento enquanto que o de jusante é protegido com grama. A seção da barragem é do tipo zonada, constituída por aterros de areia pouco argilosa, nos espaldares, núcleo central impermeável de argila arenosa e um dreno tipo chaminé localizado a jusante do núcleo. A Tabela 1 resume as características gerais da barragem.

TABELA 1 - Características gerais da barragem

Reservatório	
Área	78km ²
Capacidade do reservatório	472 x 10 ⁶ m ³
Área de drenagem	153 x 10 ³ km ²
Vazão mínima	45m ³ /s
Vazão máxima	640m ³ /s
Barragem	
Tipo	Zonada com núcleo central impermeável
Comprimento	64m
Altura máxima	26m
Largura da crista	10m
Vertedouro	
Tipo	superficial, com comportas de setor
Comprimento	46m
Bacia de Dissipação	
Tipo	ressalto hidráulico
Comprimento	40m

A barragem está assente sobre fundação arenosa. O sistema de controle de percolação é constituído por um tapete impermeável, localizado à montante, e um tapete horizontal, drenante, localizado sob a aba de jusante. O tapete impermeável, construído com mesmo material do núcleo, possui comprimento de 240m e espessura variando de 4m, no contato com a barragem de terra, a 1,5m na extremidade de montante. O tapete tem seu início na entrada do canal de adução e estende-se até o dique direito.

Após a construção, a barragem foi monitorada por um período superior a 3 anos, incluído um ano e meio sob condições de reservatório cheio (cota 68m), com 11 piezômetros tipo Casagrande. Os instrumentos foram instalados no corpo da barragem e na fundação, em seções de controle: estaca 35 e estaca 38 (Eletroprojetos, 1978).

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. Na estaca 35, os sensores foram posicionados no corpo da barragem, já na estaca 38, estes foram instalados na fundação e drenos. Este novo sistema substituiu grande parte dos piezômetros antigos.

Esta etapa do projeto teve como objetivo principal a implantação de um sistema de monitoramento otimizado, e que fornecesse dados mais confiáveis. Além disso, os dados obtidos subsidiaram estudos para um possível alteamento do nível do reservatório (Fraiha Neto e Pacheco Neto, 2002). A Figura 2 mostra o

posicionamento dos 05 piezômetros posicionados na estaca 35, em conjunto com a linha piezométrica registrada no mês de agosto 2002.

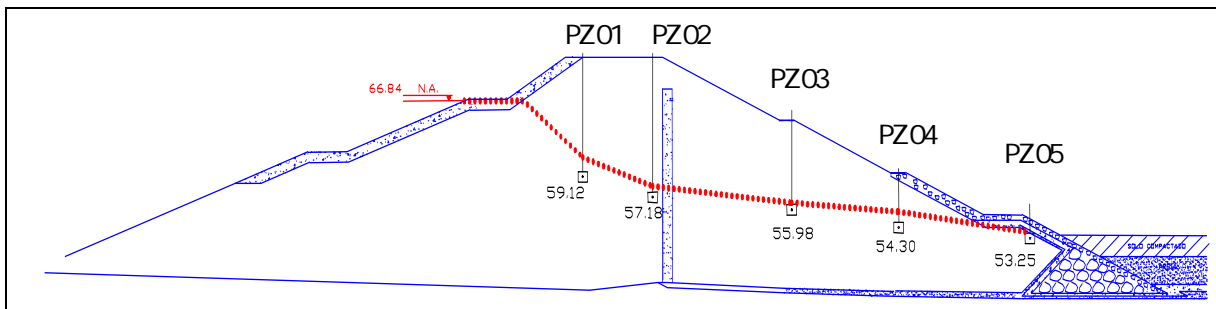


FIGURA 2- Linhas piezométricas em agosto de 2002 - Estaca 35

3 – VERIFICAÇÃO DA SEGURANÇA DA BARRAGEM DE TERRA

A segurança da barragem de terra foi avaliada para a condição atual de operação da usina (reservatório na cota 68,7m) e para diferentes condições do nível do reservatório.

3.1 – Geometria e Parâmetros Geotécnicos

A seção da barragem de terra adotada neste estudo está mostrada na Figura 3. Esta seção corresponde à seção da estaca 35, considerada como típica da barragem de Curuá-Una. Os 6 diferentes materiais que compõem o corpo da barragem e fundação estão também assinalados na figura.

A Tabela 2 apresenta os valores de peso específico total (γ) e parâmetros de resistência (c' e ϕ') adotados para os diferentes materiais. Os parâmetros das abas de montante e jusante (materiais 1 e 2) foram obtidos através de ensaios de laboratório, realizados na PUC-Rio, sob diferentes condições de saturação (Ligocki, 2003). Devido à ausência de ensaios disponíveis, as propriedades geotécnicas dos elementos drenantes (materiais 3 e 4) foram estimadas com base em informações da literatura. Ressalta-se que eventuais imprecisões nestas estimativas têm importância reduzida para os resultados de estabilidade, visto que estes materiais apresentam um volume significativamente inferior aos demais. Os parâmetros geotécnicos dos materiais 5, 6 e 7, relativos, respectivamente, ao núcleo, solo de fundação e reforço do pé de jusante foram obtidos em ensaios realizados no IPT (Instituto Pesquisas Tecnológicas de São Paulo) (CELPA, 1980).

Nas regiões com submersão parcial (aba de jusante e núcleo), foram adotados parâmetros de resistência para as condições saturada (abaixo da linha freática) e não saturada (acima da linha freática). No caso do material do núcleo, a saturação foi associada à perda de coesão efetiva. Já no material das abas, todos os parâmetros foram obtidos ensaios de laboratório (Ligocki, 2003).

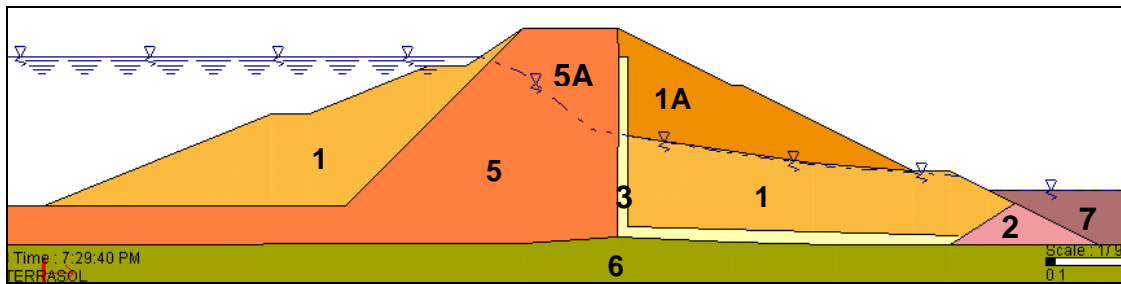


FIGURA 3 - Seção transversal da barragem

TABELA 2 - Parâmetros geotécnicos dos materiais da barragem

Material	Descrição	Local	Condição de saturação	γ (kN/m ³)	c' (kPa)	ϕ' (°)
1	Areia silto-argilosa	Abas	saturada	19,5	0	30
1A	Areia silto-argilosa	Abas	não saturada	20,4	39	26
2	Enrocamento	Pé de Jusante	saturado	20	0	40
3	Areia	Filtro	saturado	20	0	34
5	Argila arenosa	Núcleo	saturado	15	50	28
5A	Argila arenosa	Núcleo	não saturado	15	0	28
6	Areia siltosa	Fundação	saturado	20	2	32
7	-	Reforço	saturado	20	10	35

Nota: L.F. = linha freática

3.2 - Linha Freática

A simulação das condições de fluxo permanente, através do corpo da barragem e da fundação, foram realizadas com o programa PLAXIS v7.2 Pro (Brinkgreve e Vermeer, 1988).

Os coeficientes de permeabilidade saturada foram inicialmente estimados a partir de resultados de campanhas de ensaios de campo e laboratório (Amorim, 1976, Eletroprojetos, 198? e Saré, 2003) Devido à ampla faixa de valores encontrados para cada material, sucessivas simulações das condições de fluxo foram feitas, até obter aquela que melhor reproduzisse a linha freática observada no campo. Este estudo teve como base a condição atual de operação da barragem (reservatório na cota 68,7m). Diferentes razões de permeabilidade vertical e horizontal (k_v/k_h), tanto para o corpo da barragem como para a fundação, foram testadas e as cargas piezométricas obtidas numericamente foram confrontadas com as registradas nos piezômetros. Os resultados mostraram que o conjunto de valores de permeabilidade, listados na Tabela 3, associado a hipótese de $k_H / k_V = 1,0$, resultava em um ajuste adequado. A qualidade deste ajuste pode ser verificada na Figura 4, a partir da comparação entre as cotas piezométricas medidas no campo e as previstas numericamente.

TABELA 3 - Valores de permeabilidade

Material	K (cm/s)
núcleo	$5,0 \times 10^{-7}$
abas	$8,2 \times 10^{-6}$
fundação	$6,2 \times 10^{-5}$
drenos	$5,8 \times 10^{-5}$

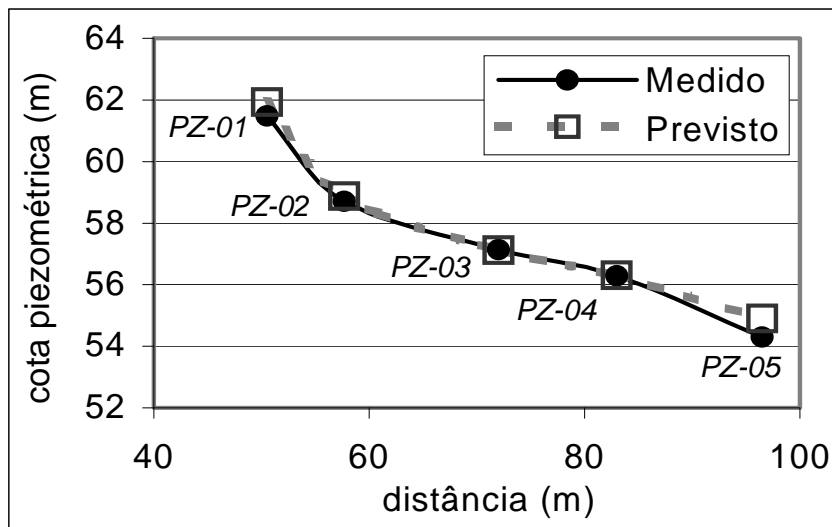


FIGURA 4 – Comparação entre as cotas piezométricas medidas e previstas

3.3 – Níveis de Alerta

Para um acompanhamento adequado das condições de segurança da barragem de terra de Curuá-Una, foram estabelecidas 3 categorias relacionadas às condições de operação: Normal, Atenção e Emergência.

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. Este limite é recomendado pelo “Corps of Engineers” dos EUA, para estabilidade de barragens (Fell e outros, 1992). 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 possíveis condições de operação da barragem foram então testadas variando-se a cota do reservatório e calculando-se o fator de segurança associado. O padrão de fluxo correspondente a cada situação analisada foi estimado pelo programa PLAXIS (Brinkgreve e Vermeer, 1988). Os respectivos fatores de segurança foram calculados com o programa Talren 97 (Terrasol, 1997), admitindo-se superfícies potenciais de ruptura circulares (Bishop, 1955). A definição dos parâmetros de resistência dos materiais, em particular núcleo e

a aba de jusante, foi condicionada às mudanças no seu grau de saturação, resultado de variações na posição da linha freática.

A elevação do nível do reservatório foi simulada para cotas até 85m, superior a cota atual da crista da barragem (71m). Nestas simulações admitiu-se a existência de um muro posicionado sobre a crista. Adicionalmente, nas condições atuais, o canal de adução impõe uma limitação ao nível do reservatório na cota 69,5m.

A Figura 5 apresenta a variação do fator de segurança em função da cota do reservatório. O trecho tracejado refere-se a níveis do reservatório superiores aos permitidos para a geometria atual da barragem. Observa-se que, para as condições atuais de operação, a barragem encontra-se no nível Normal de segurança. O nível de Emergência só seria atingido com o reservatório acima da cota 83m, o que representa uma situação inviável para a geometria atual da barragem. Desta forma, para as condições atuais, elevações futuras do nível reservatório estariam limitadas à cota 69,5m e a barragem estaria operando com nível de alerta na condição de Atenção (FS = 1,46).

As variações observadas da declividade da curva, observadas na FIGURA 5, são atribuídas a mudanças nos parâmetros de resistência dos materiais quando saturados.

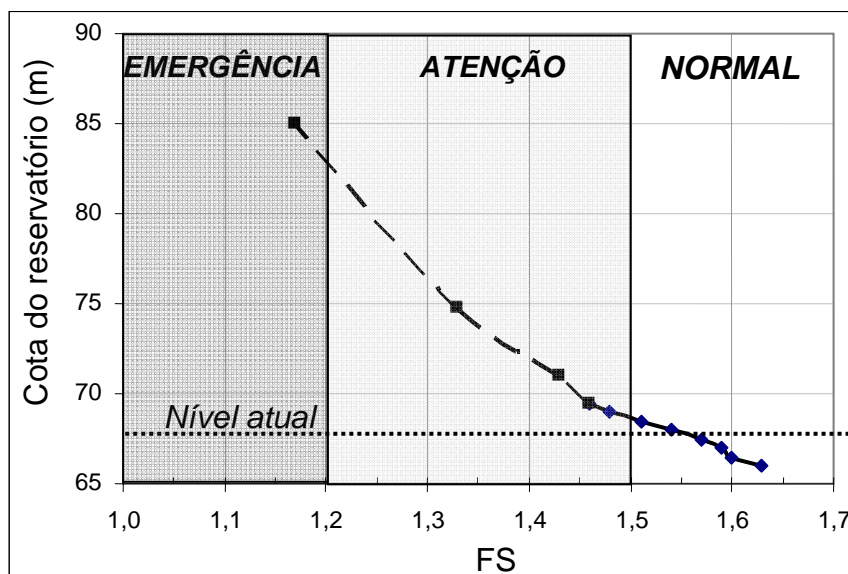


FIGURA 5- Influência do nível do reservatório no FS

Os valores previstos de cota piezométrica, para cada um dos piezômetros instalados na Estaca 35, nas condições FS=1,5 e FS=1,2, estão apresentados na Tabela 4. Estes resultados estão plotados na Figura 6, em conjunto com a linha piezométrica monitorada em agosto de 2002 (cota do reservatório = 66,8m). Observa-se que, neste período a barragem operou com borda livre de 4,2m, dentro do nível de segurança Normal. As linhas piezométricas correspondentes aos limites Normal – Atenção – Emergência mostraram-se aproximadamente paralelas entre si e com a os dados da piezometria.

TABELA 4 - Níveis de segurança – Estaca 35

Piezômetro	Cota de instalação (m)	Cota piezométrica (m)	
		FS=1,20	FS=1,50
PZ-01	59,12	65,92	63,59
PZ-02	57,18	61,28	59,79
PZ-03	55,98	58,78	57,75
PZ-04	54,30	57,68	56,86
PZ-05	53,25	57,00	55,06

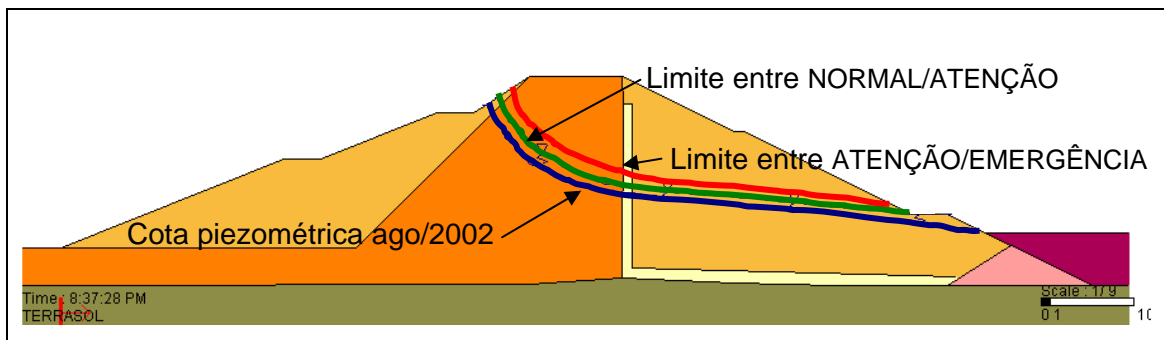


FIGURA 6 - Linhas Piezométricas x Níveis de Alerta

Na Figura 7 estão representadas as cotas piezométricas previstas no piezômetro PZ-03, para as diferentes posições do nível do reservatório. Este tipo de gráfico é bastante útil no gerenciamento de operação da barragem, pois fornece uma indicação simples e eficaz do grau de segurança de todo o maciço. Nesta figura, o trecho tracejado refere-se a condições hipotéticas (cotas do nível do reservatório acima do limite 69,5m), fisicamente inviáveis para a geometria atual da barragem.

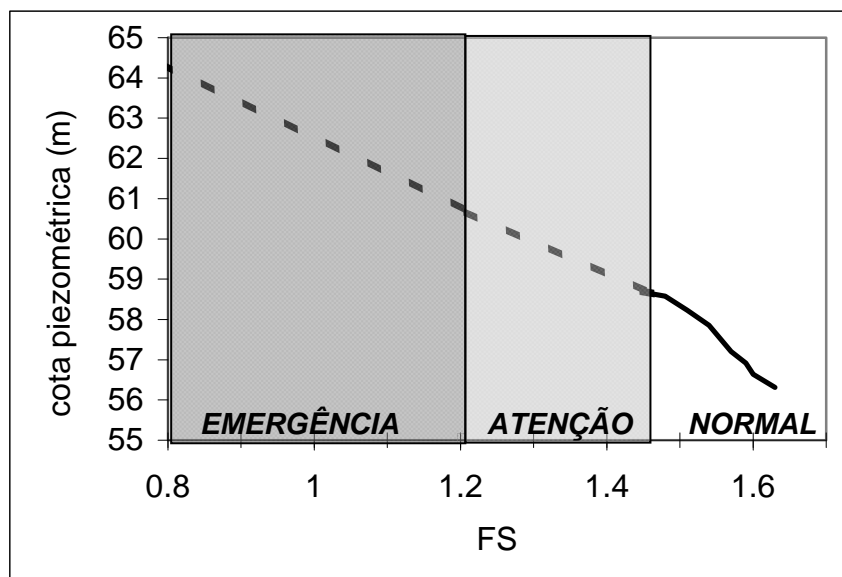


FIGURA 7 - Níveis de alerta PZ-03

3.4 – Simulação do Regime de Fluxo

Com o objetivo de melhor analisar as possíveis condições de futuras de alteamento do reservatório, foram realizadas algumas simulações que posteriormente foram comparadas com os níveis de alerta anteriormente estabelecidos.

A TABELA 5 apresenta os níveis piezométricos previstos e a FIGURA 8 os compara com os níveis de alerta. Os resultados indicam que as variações previstas de carga de pressão ($\Delta\psi$) entre as cotas máxima e mínima do reservatório são relativamente pequenas. Estas variações crescem com a proximidade do talude de montante. A comparação com os níveis de alerta mostram que para a cota 69,5m a barragem opera no nível de atenção.

TABELA 5 - Cotas piezométricas previstas para os diversos níveis do reservatório

	Cotas Piezométricas (m)							
NA (m)	66,84	67,00	67,50	68,00	68,50	69,0	69,5	$\Delta\psi$
PZ-01	61,50	61,55	61,74	61,89	62,08	62,28	62,52	1,02
PZ-02	58,87	58,89	59,02	59,09	59,20	59,30	59,46	0,59
PZ-03	57,07	57,08	57,16	57,19	57,25	57,29	57,37	0,30
PZ-04	56,40	56,41	56,47	56,50	56,54	56,57	56,63	0,23
PZ-05	55,14	55,15	55,17	55,18	55,20	55,20	55,23	0,09

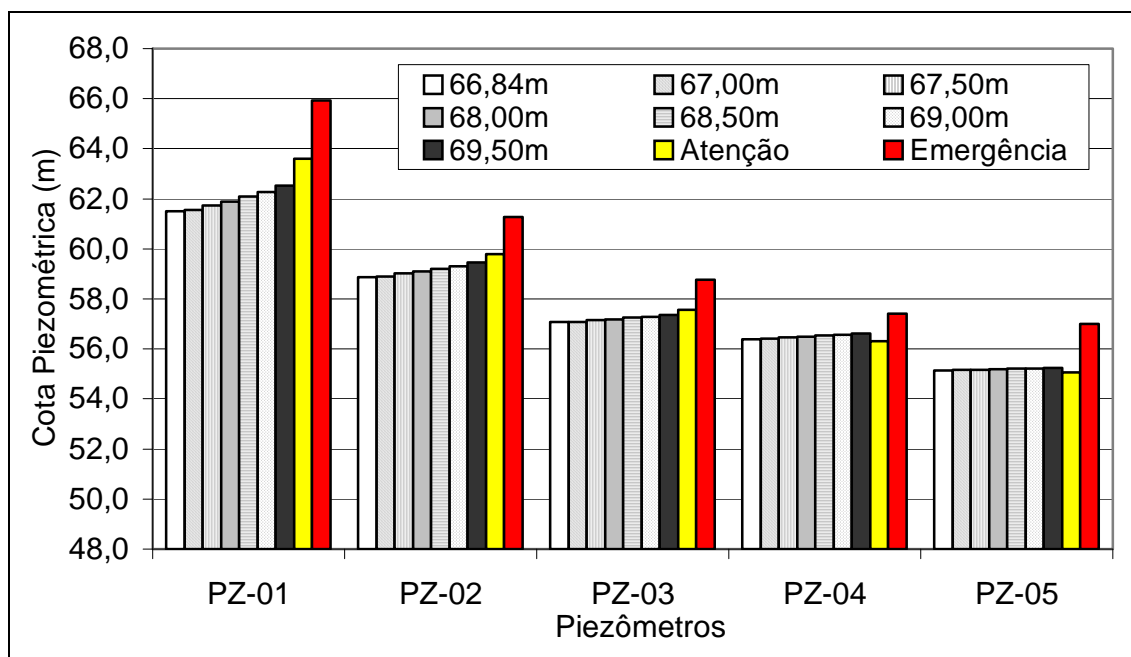


FIGURA 8 - Comparação entre níveis piezométricos previstos e níveis de alerta.

5 – 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 e fundação. As análises englobaram a condição atual de operação da barragem e condições futuras de alteamento do nível do reservatório. 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 ($FS \geq 1,5$). Conseqüentemente, a ampliação da capacidade energética da usina, a partir do aumento do nível do reservatório, acarretaria numa redução da categoria de operação em termos de segurança da barragem. Para a geometria atual, a cota máxima permitida para o reservatório está limitada a 69,5m. As simulações do regime de fluxo mostram uma pequena variação dos níveis piezométricos devido ao alteamento do reservatório. Adicionalmente, para o nível de 69,5m, a barragem deve operar no nível de atenção.

As análises também permitiram estabelecer limites piezométricos, associados aos diversos graus de segurança 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.

6 – AGRADECIMENTOS

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.

7 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMORIM, P. C. Análise da percolação na Barragem de Curuá-Una pelo método dos elementos finitos. Dissertação de Mestrado – COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 86 f. 1976.

- 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.
- CENTRAIS ELÉTRICAS DO PARÁ (CELPA). UHE de Curuá-Una. Serviços de reforço no sistema de drenagem junto ao pé de jusante da barragem de terra. Relatório do desenvolvimento dos serviços. Relatório Técnico. Belém: CELPA, 1980, 3p.
- ELETROPROJETOS. Relatório de Atividades em Curuá-Una (CA-0243). Relatório Técnico. Rio de Janeiro: ELETROPROJETOS, p.8-14. [198?].
- FELL, R.; MAC GREGOR, P.; STAPLEDON, D. Geotechnical engineering of embankment dams. Rotterdam: A. A. Balkema, 1992. 675p.
- LIGOCKI, L. P. Comportamento da barragem de Curuá-Una, Pará. Dissertação de Mestrado - PUC-Rio, Rio de Janeiro, 173 f. 2003.
- PIERRE, L. F.; ÁVILA, J. P.; BICUDO, R. I.; SILVA, R. S. Curuá-Una Dam, Main Brazilian Dams – Design, Construction and Performance, Rio de Janeiro: Brazilian Committee on Large Dams – CBGB, p. 637 - 653. 1982.
- RAMOS, C. M.; DE MELO, J. F. Segurança de barragens: aspectos hidráulicos e operacionais. LNEC – Departamento de hidráulica e ambiente, <<http://www.dha.lnec.pt>>. 1998.
- SARÉ, A. R. Análise do fluxo da barragem de Curuá-Una, Pará. Dissertação de Mestrado – PUC-Rio, Rio de Janeiro, 168 f. 2003.
- TERRASOL. Manual técnico do programa Talren: França, 192 f. 1997.