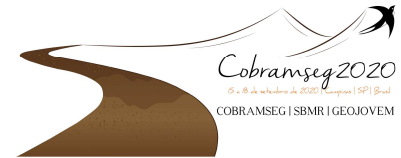


XX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica
IX Simpósio Brasileiro de Mecânica das Rochas
IX Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens
VI Conferência Sul Americana de Engenheiros Geotécnicos Jovens
15 a 18 de Setembro de 2020 – Campinas - SP



Análise da Influência do Nível de Água do Reservatório nos Fatores de Segurança da Barragem de Terra (ME) de Itaipu

Josiele Patias

Engenheira Civil, Itaipu Binacional, Foz do Iguaçu, Brasil, jpatias@itaipu.gov.br

Rodrigo de Lima Rodrigues

Engenheiro Civil, Centro de Estudos Avançados em Segurança de Barragens – Parque Tecnológico Itaipu (Ceasb-FPTI), Foz do Iguaçu, Brasil, rodrigo.lr@pti.org.br

RESUMO: A barragem de terra da margem esquerda (BTME) de Itaipu faz o fechamento entre a barragem de enrocamento e o terreno natural na ombreira esquerda. Ao longo de seu comprimento, as seções transversais apresentam mudanças importantes na sua geometria, desta maneira, ocorrem variação das condições de fluxo e estabilidade. As variáveis hidrometeorológicas ou as atividades de operação da usina podem fazer com que o reservatório de Itaipu atinja cotas abaixo do nível normal de operação. Sendo assim, este estudo visa compreender o grau de influência da variação do N.A. do reservatório nos fatores de segurança (FS), em condições de fluxo permanente. Para este estudo, avaliaram-se três seções desta estrutura quanto à estabilidade dos taludes de montante e de jusante. As seções foram previamente modeladas em CAD e, em seguida, exportadas para o GeoSlope, para realizar as análises de fluxo pelo Método dos Elementos Finitos (MEF) e análises de estabilidade pelo método de equilíbrio limite. A partir dos resultados, foram comparadas as variações dos valores do FS em relação à variação do N.A. do reservatório por meio de gráficos e tabelas. O FS do talude de montante é o mais sensível à alteração do nível do reservatório, sendo que esta variação é diretamente proporcional à variação do N.A. do reservatório. Já o FS de jusante tem menor influência do N.A. do reservatório, sendo seu comportamento inversamente proporcional à variação do N.A. do reservatório. Cada seção apresenta uma relação $\Delta N.A. / \Delta FS$ diferente, em função das características geométricas e da espessura de solo na fundação. Contudo, o estudo possibilitou a verificação da variação do FS relativo à estabilidade dos taludes nas seções estudadas da BTME mediante a variação do N.A. do reservatório da Usina Hidrelétrica de Itaipu.

PALAVRAS-CHAVE: Barragem de Itaipu, Análise de Fluxo, Análise de Estabilidade, Fator de Segurança.

ABSTRACT: The left side earthfill dam closes the gap between the rockfill dam and the natural terrain on the left abutment. Along its length the section varies considerably in its geometry, as a result there is variation in flow and stability conditions. In the eventuality of certain hydrometeorological or plant operating conditions, the Itaipu reservoir may reach levels below normal operating level. This study aims to understand the degree of influence of the variation of the reservoir water level on safety factors, under conditions of permanent internal flow. Three sections of this structure were evaluated regarding the stability of the upstream and downstream slopes. The sections were previously modeled in CAD, and then exported to GeoSlope to perform flow analysis using the Finite Element Method (FEM) and stability analysis using the limit equilibrium method. From the results, the variations in the values of the Safety Factor in relation to the variation in the reservoir level were compared using graphs and tables. The safety factor of the upstream slope is the most sensitive to changes in the level of the reservoir, with its variation being directly proportional to the reservoir variation. The downstream safety factor has less influence on the reservoir level and its behavior is inversely proportional to the reservoir variation. Each section has a different reservoir variation versus safety factor variation, depending on the geometric characteristics and the thickness of the soil in the foundation. The study made possible a greater understanding of the alteration of the safety factor of the slopes caused by alteration of the level of the reservoir in the observed sections of the earthfill dam (left side).

KEYWORDS: Itaipu Dam, Flow Analysis, Stability Analysis, Factor of Security.

1 Introdução

A barragem de Itaipu possui aproximadamente 8 km de extensão, sendo que as barragens de aterro correspondem à aproximadamente 65% deste comprimento. Desde seu enchimento, o nível de água do reservatório varia, tipicamente, entre as elevações 219,0 e 220,5 msnm. Entretanto, eventualmente, devido a condições hidrometeorológicas ou de operação da usina, o reservatório atinge cotas abaixo da El. 219,0. O nível de água normal do reservatório está definido na cota 220,0 (Itaipu Binacional, 2009).

A barragem de terra da margem esquerda (BTME) possui diversas seções com características específicas que faz com que as pressões neutras e, conseqüentemente, o fator de segurança seja consideravelmente diferente ao longo do comprimento desta estrutura, para o mesmo nível do reservatório. No entanto, a variação do N.A. do reservatório nas seções próximas à ombreira direita, é objeto de avaliação constante da segurança de barragens, pois quando o reservatório se encontra em cotas abaixo da elevação 218,0, algumas delas são expostas à condição seca, ou seja, sem a ação direta do reservatório.

Desta maneira, foram realizados diversos estudos com objetivo de compreender e estudar o comportamento da barragem quanto à fluxo (barragem e fundação) e estabilidade dos taludes (Patias, 2015, Rodrigues 2017a, 2017b, 2010 e Thá, 2007). O presente estudo visa avaliar o efeito do N.A. do reservatório nos fatores de segurança dos taludes de montante e jusante, buscando compreender qual é a influência da variação do N.A. do reservatório em condição de fluxo permanente. A análise foi procedida em três seções da BTME, com avaliação da condição de estabilidade para ambos os espaldares, de montante e de jusante.

Os resultados deste trabalho são relativos ao estudo de caso específico da BTME sendo aplicados a atividades de segurança de barragens desta usina, sendo que as variações de FS não são aplicáveis à outras estruturas, mesmo que possuam geometria e condições de contorno semelhantes.

2 Materiais e Métodos

A Figura 1 (adaptada de Itaipu Binacional, 2009) mostra uma vista geral da barragem com destaque para as barragens de enrocamento e de terra da margem esquerda.



Figura 1 - Vista geral da barragem de Itaipu a partir da BTME (Adaptada de Itaipu Binacional, 2009)

Para o presente estudo, as seções foram previamente modeladas geometricamente, gerando um arquivo do tipo CAD, o qual foi posteriormente exportado para o software GeoSlope®.

Inicialmente foram procedidas as análises de fluxo, por meio de MEF (Método de Elementos Finitos). Em seguida foram realizadas as análises de estabilidade, com base no Método de Morgenstern-Price, o qual se aplica adequadamente ao problema descrito neste trabalho, pois se trata de superfícies de ruptura em formato circular, devido a homogeneidade do maciço terroso compactado, que compõe o corpo da BTME.

A Figura 2 mostra a localização em planta das seções e as Figuras Figura 3, Figura 4 e Figura 5 mostram as seções 129+50, 132+00 e 135+50, respectivamente. A Tabela 1 apresenta as principais características destas seções.

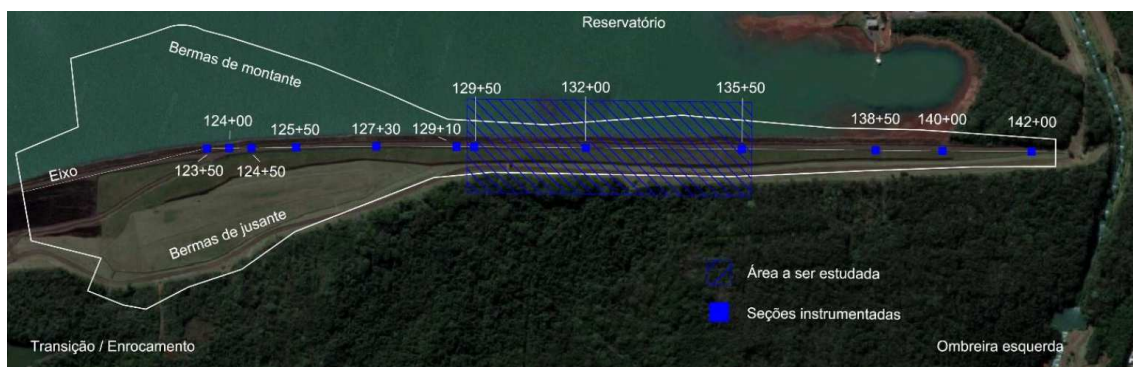


Figura 2 - Localização em planta das seções estudadas.

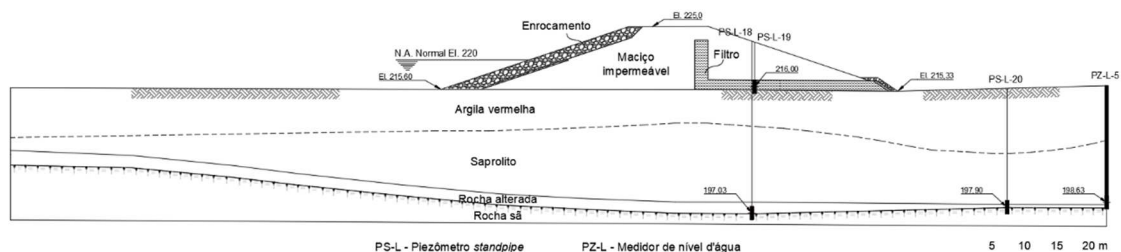


Figura 3 - Seção da Est. 129+50.

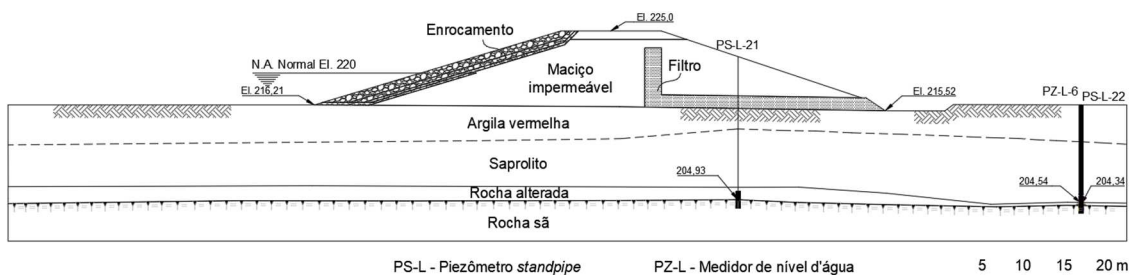


Figura 4 - Seção da Est. 132+00.

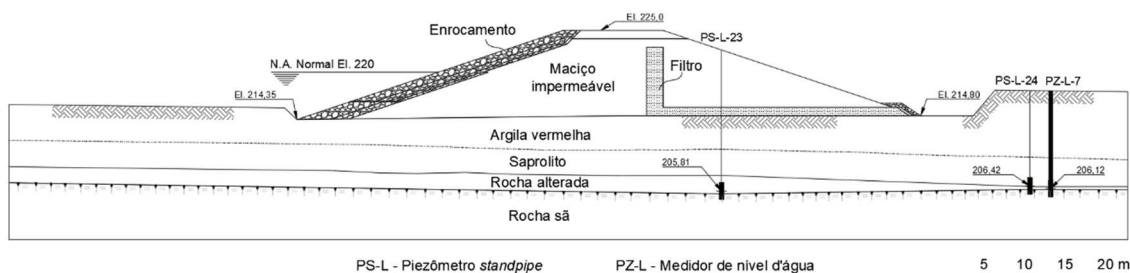


Figura 5 - Seção da Est. 135+50.

Tabela 1 - Principais características das seções.

Estaca	Alt. do maciço compac. (m)	Esp. de argila na fund. (m)	Esp. de saprolito na fund. (m)	Base do talude de mont. (m)
129+50	9,5	5,0	12,5	215,60
132+00	9,0	4,0	7,0	216,21
135+50	10,5	4,0	3,0	214,35

Considerando as informações da Tabela 1 e das Figuras 2 a 4, nota-se que existe uma grande variabilidade no que tange a espessura da camada de saprolito da fundação. Com respeito à seção da Est. 129+50, a camada possui uma espessura de 12,5 m em média, enquanto que na seção da Est. 135+50 esta mesma camada possui uma espessura de apenas 3 m. Essa diferença muda consideravelmente as condições de fluxo nas duas seções.

Quanto às condições de contorno, tem-se o nível do reservatório a montante e o nível d'água no terreno a jusante da barragem. Existem instrumentos que realizam a medida do nível d'água instalados a jusante do pé da barragem, os quais foram utilizados nas simulações de variações reais do N.A. do reservatório. Entretanto, alguns casos simulados representam condições hipotéticas de alteamento do reservatório nas quais não é possível prever o comportamento do nível freático a jusante. Sendo assim, adotou-se a condição mais crítica em todos os casos para fins de comparações entre as diferentes condições de carregamento, admitindo-se o nível d'água a jusante coincidente com o nível do terreno natural. A Figura 6 mostra as condições de contorno típicas das seções simuladas.

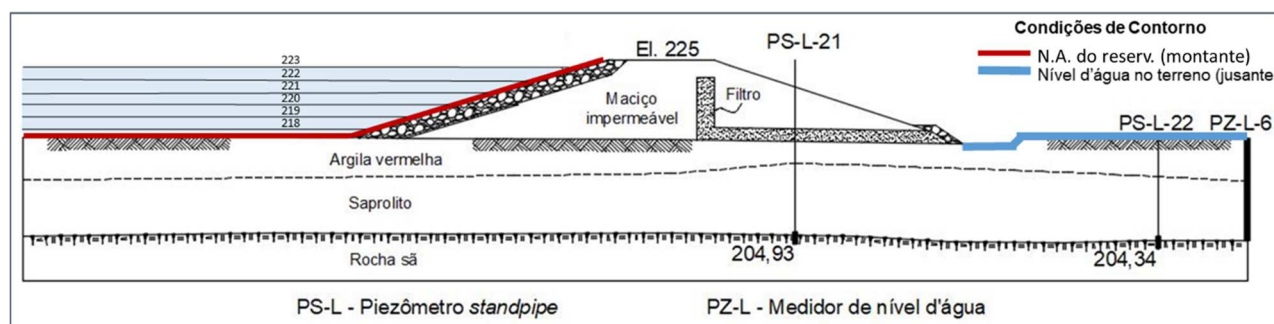


Figura 6 - Condições de contorno típicas das seções simuladas.

Os parâmetros geotécnicos dos materiais foram adotados a partir de ensaios realizados à época da investigação e construção da barragem. As permeabilidades foram ajustadas a partir da comparação dos valores médios lidos pelos piezômetros instalados em cada seção estudada e com os valores simulados considerando um período em que o nível do reservatório manteve-se estável (entre El. 219 e 220,5). Os parâmetros de resistência, utilizados na análise de estabilidade, foram obtidos pelos ensaios triaxiais do tipo consolidados-drenados (CD). A Tabela 2 apresenta a síntese dos parâmetros utilizados.

Foram realizadas simulações de fluxo permanente considerando o N.A. do reservatório com variações de 1 metro, a partir da base do talude a montante até a El. 223 m, nível máximo *maximorum*.

Tabela 2 - Síntese dos parâmetros geotécnicos utilizados

Material	Permeabilidade (cm/s)	c' (kPa)	θ' (°)
Argila compactada	$k_x = 3,4 \times 10^{-7}$	54	27,4
	$k_y = 1,3 \times 10^{-7}$		
Areia (Sistema de drenagem)	10^{-2}	0	40
Argila da fundação	$4,4 \times 10^{-5}$	0	25
Saprolito da fundação	$2,5 \times 10^{-3}$	20	25
Rocha Alterada	5×10^{-3}	20	25

Fonte dos parâmetros: CESP (1975, 1976a, 1976b); IECO-ELC (1977, 1982, 1992); Thá (2007).

3 Resultados

Serão apresentadas as superfícies de ruptura de cada seção para os fatores de segurança mínimos e, em seguida, mostradas as variações do Fator de Segurança (FS) mediante as mudanças do N.A. do reservatório.

3.1 Seção da Estaca 129+50

A seção da Estaca 129+50 possui maior espessura de solo no corpo da barragem, sendo 9,5 m de argila compactada e aproximadamente 17 m de solo na fundação (argila vermelha e saprolito). A base do talude de montante fica na El. 215,6 m. Desta maneira, o N.A. do reservatório pode variar aproximadamente 8 m no talude de montante nesta seção.

A Figura 7 mostra a linha freática e as superfícies de ruptura para os menores fatores de segurança com o N.A. do reservatório próximo a base do talude. A Figura 8 mostra a linha freática e as superfícies de ruptura para os menores fatores de segurança com o N.A. do reservatório na El. 223,0.

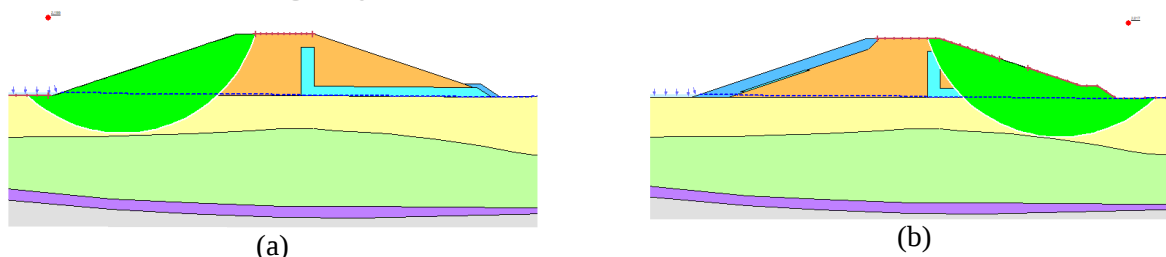


Figura 7 – Seção da Estaca 129+50 com N.A. do reservatório próximo à base do talude de montante. (a) Superfície de ruptura a montante. (b) Superfície de ruptura de jusante.

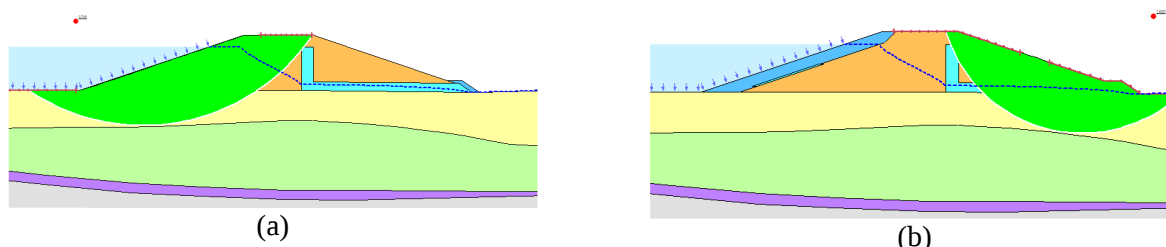


Figura 8 – Seção da Estaca 129+50 com N.A. do reservatório na cota 223. (a) Superfície de ruptura a montante. (b) Superfície de ruptura a jusante.

A Tabela 3 mostra os valores de fator de segurança a montante e a jusante para o NAR variando entre as cotas 216,0 e 219,0. A Figura 9 mostra o gráfico representando esta variação.

Tabela 3 - Variação dos Fatores de Segurança mediante alteração do NAR na seção da Est. 129+50.

NAR	FS Mon	Δ FS Mon	FS Jus	Δ FS Jus
216	2,20	-	2,02	-
217	2,23	0,03	1,97	-0,05
218	2,33	0,09	1,92	-0,05
219	2,49	0,16	1,87	-0,05
220	2,71	0,22	1,83	-0,05
221	2,98	0,27	1,78	-0,05
222	3,31	0,32	1,73	-0,05
223	3,71	0,40	1,69	-0,05

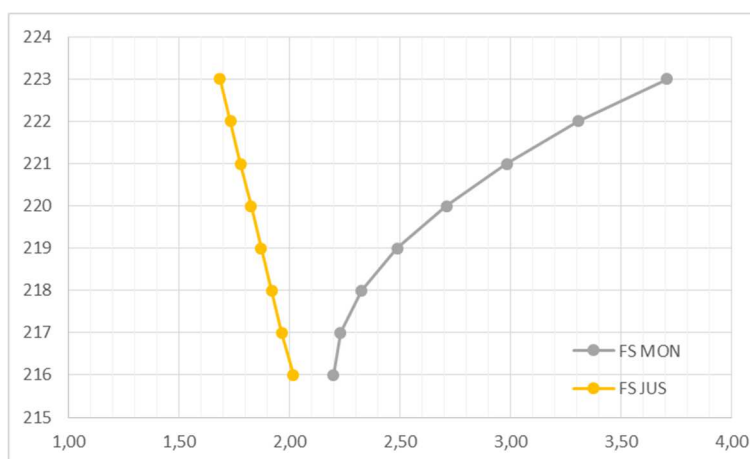


Figura 9 - Representação gráfica da variação dos valores de Fator de Segurança mediante as variações do N.A. do reservatório para a seção da Estaca 129+50.

Nota-se que os fatores de segurança a montante e a jusante apresentam um comportamento divergentes entre si (Figura 9).

A variação do fator de segurança a jusante ocorre principalmente devido à variação das pressões neutras na fundação. As pressões neutras, por sua vez, variam de acordo as oscilações do N.A. do reservatório, conforme demonstrado por Rodrigues (2017), que realizou diversos estudos de análise de correlação entre as oscilações do N.A. do reservatório e as cotas piezométricas e pressões neutras, medidas por medidores de nível d'água e piezômetros, respectivamente. Este estudo indicou do inclusive a defasagem das respostas dos piezômetros e medidores de nível d'água.

Já o fator de segurança a montante, é influenciado principalmente pelo peso do reservatório, que contribui para estabilidade do talude, ou seja, quanto mais elevado o N.A. do reservatório maior o fator de segurança.

O FS de jusante apresenta redução linear com o aumento do N.A. do reservatório, com um Δ FS constante. O FS de montante apresenta comportamento não linear, sendo que quanto maior N.A. do reservatório maior o incremento do Δ FS.

3.1 Seção da Estaca 132+00

A BTME na seção da Estaca 132+00 possui 9 m de altura e a base do talude de montante fica na El. 216,2 m, ou seja, o reservatório pode variar aproximadamente 7 m ao longo do talude da barragem.

A Figura 10 mostra a linha freática e as superfícies de ruptura para os menores fatores de segurança com o N.A. do reservatório próximo a base do talude. A Figura 11 mostra a linha freática e as superfícies de ruptura para os menores fatores de segurança com o N.A. do reservatório na El. 223,0.

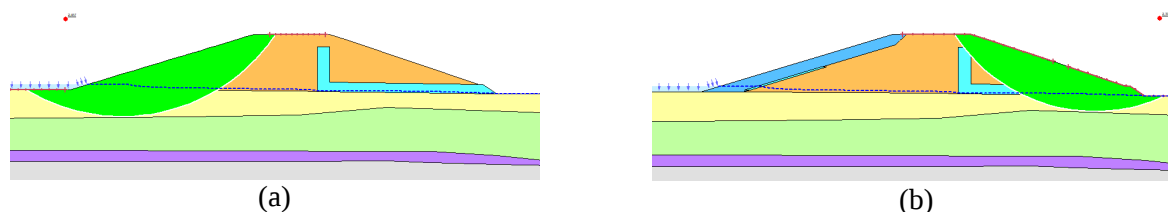


Figura 10 - Seção da Estaca 132+00 com N.A. do reservatório próximo à base do talude de montante. (a) Superfície de ruptura a montante. (b) Superfície de ruptura de jusante.

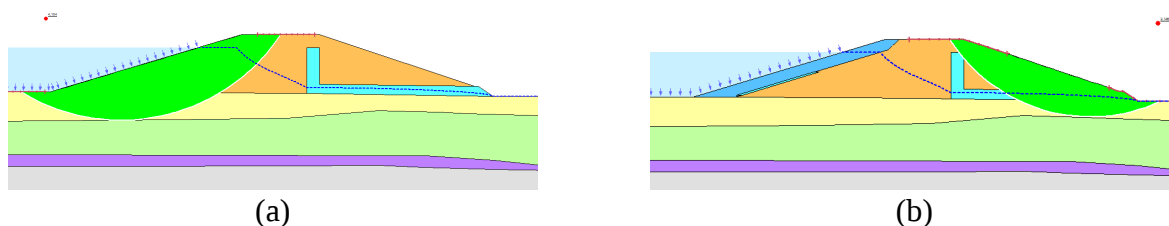


Figura 11 - Seção da Estaca 132+00 com N.A. do reservatório na cota 223. (a) Superfície de ruptura a montante. (b) Superfície de ruptura a jusante.

A Tabela 4 mostra os fatores de segurança simulados para os taludes de montante e jusante, considerando a variação do N.A. do reservatório entre as cotas 216,0 e 223,0. A Figura 12 mostra esta variação de maneira gráfica.

Tabela 4 - Variação dos valores do Fator de Segurança com a oscilação do NAR na seção da Est. 132+00.

NAR	FS Mon	Δ FS Mon	FS Jus	Δ FS Jus
217	2,46	-	2,31	-
218	2,55	0,10	2,28	-0,03
219	2,70	0,15	2,25	-0,03
220	2,92	0,22	2,22	-0,03
221	3,22	0,30	2,19	-0,03
222	3,61	0,39	2,16	-0,03
223	4,10	0,49	2,15	-0,02

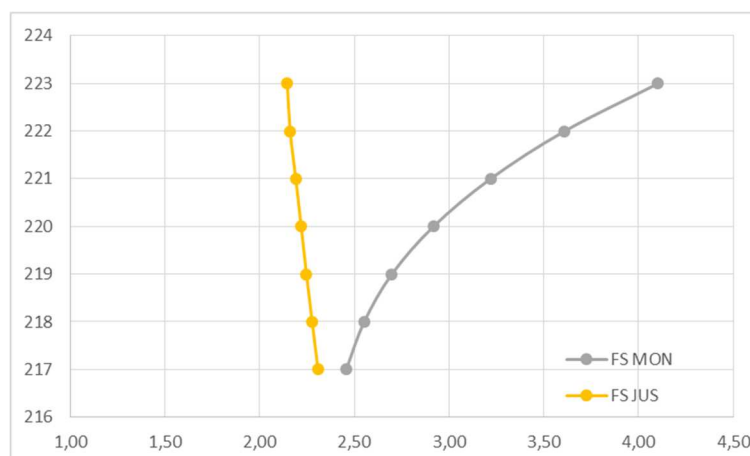


Figura 12 - Representação gráfica da variação dos valores de Fator de Segurança mediante as variações do N.A. do reservatório para a seção da Estaca 132+00.

A variação dos fatores de segurança calculados para a Estaca 132+00 apresentou comportamento semelhante ao da Estaca 129+50. No entanto, a variação do FS de jusante para a seção da Estaca 129+50 foi muito menor para esta Estaca. Este comportamento pode ser atribuído ao fato da camada de solo da fundação

ter menor espessura, o que resulta em menor variação das pressões neutras e, consequentemente, na menor variação do FS de jusante.

A montante, a variação do FS para a seção da Estaca 132+00 seguiu o mesmo comportamento apresentado para a seção da Estaca 129+50, tendo inclusive incrementos semelhantes no FS de acordo com a variação do NAR.

3.2 Seção da Estaca 135+50

A seção da Estaca 135+50 possui 10,5 m de espessura de barragem (argila compactada), sendo a seção mais alta dentre as apresentadas neste trabalho, com a menor espessura de solo na fundação (7 m). A base do talude de montante assenta-se na El. 214,35, assim, o reservatório varia aproximadamente 8 m no talude de montante.

A Figura 13 mostra a linha freática e as superfícies de ruptura para os menores fatores de segurança considerando o N.A do reservatório próximo à base do talude (El. 214,35). A Figura 14 mostra a linha freática e as superfícies de ruptura para os menores fatores de segurança considerando o N.A do reservatório na El. 223.

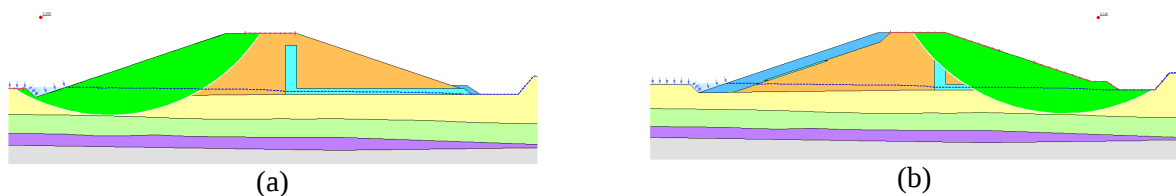


Figura 13 – Seção da Estaca 135+50 com N.A do reservatório próximo à base do talude de montante. (a) Superfície de ruptura a montante. (b) Superfície de ruptura de jusante.

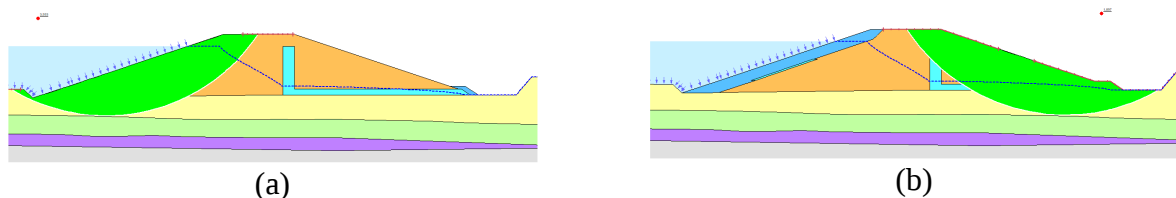


Figura 14 – Seção da Estaca 135+50 com N.A do reservatório na cota 223. (a) Superfície de ruptura a montante. (b) Superfície de ruptura a jusante.

A Tabela 5 mostra os fatores de segurança a montante e jusante considerando a oscilação do N.A do reservatório entre as cotas 216,0 e 223,0. A Figura 15 mostra graficamente tais variações.

Tabela 5 - Variação dos Fatores de Segurança mediante alteração do NAR na seção da Est. 135+50.

NAR	FS Mon	Δ FS Mon	FS Jus	Δ FS Jus
216	2,31	-	2,13	-
217	2,38	0,07	2,09	-0,03
218	2,53	0,15	2,06	-0,03
219	2,68	0,15	2,03	-0,03
220	2,89	0,21	1,99	-0,03
221	3,17	0,28	1,96	-0,03
222	3,52	0,35	1,93	-0,03
223	3,93	0,42	1,90	-0,03

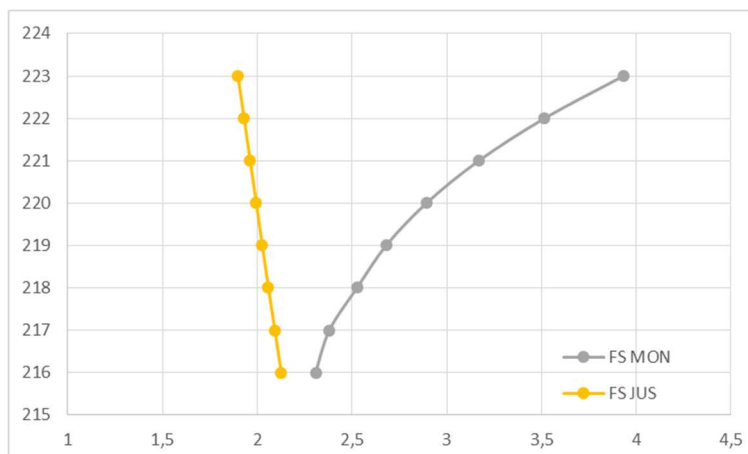


Figura 15 - Representação gráfica da variação dos valores de Fator de Segurança mediante as variações do N.A. do reservatório para a seção da Estaca 135+50.

Para as simulações feitas para a seção da Estaca 135+50 pode-se verificar que a variação do FS foi semelhante aos casos das Estacas 129+50 e 132+00. O FS de jusante apresentou a mesma taxa de variação que para a seção da Estaca 132+00, o que pode ser conferido à semelhança na espessura de solo na fundação.

Considerações finais

Neste trabalho foram apresentadas as simulações feitas para três seções da Barragem de Terra da Margem Esquerda (BTME) de Itaipu, onde foi avaliada a influência do nível de água do reservatório nos fatores de segurança (FS) quanto à estabilidade para ambos os espaldares, a montante e a jusante.

A variação dos FS nos taludes de montante e jusante nas seções avaliadas da BTME é influenciada de maneira direta pela variação do N.A. do reservatório. O estudo apresentado proporciona uma avaliação sobre o quanto os fatores de segurança variam de acordo com as oscilações do N.A. do reservatório e de que forma isto se dá (linear ou não linear).

Conclui-se que o FS de montante apresenta um incremento em seu valor quando da elevação do N.A. do reservatório, sendo influenciado pelo peso do reservatório que atua como uma carga estabilizadora do talude de montante. Assim, quanto mais elevado o N.A. do reservatório, maior o FS de montante, com incremento exponencial no FS, para as cotas estudadas.

O Δ FS de jusante é influenciado principalmente pelas variações das pressões neutras na fundação que, por sua vez, tem comportamento diferente entre as seções devido à variação da espessura do solo de fundação.

Para todas as seções observadas, verifica-se que a jusante, para os N.A. de reservatório avaliados, quanto mais se eleva o N.A., reduz-se o FS do talude. Em geral, trata-se de uma relação linear, onde o Δ FS é praticamente o mesmo para cada metro de elevação do NAR. Na seção com maior redução do FS (Estaca 129+50) o decréscimo a cada metro de alteamento do NAR foi de 0,05 por metro, sendo que no total, considerando da El. 216,0 a 223,0, a variação devido o reservatório foi de 0,33 por metro.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Centrais Elétricas de São Paulo S.A. (CESP) (1975). **Ensaio geotécnicos sobre amostras indeformadas extraídas da fundação da barragem - M.E. e sobre amostras deformadas das áreas de e escavação da fundação da barragem de enrocamento - Usina de Itaipu - Estado do Paraná.** Documento interno de Itaipu, SAT 2063.50.001.P.

XX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica
 IX Simpósio Brasileiro de Mecânica das Rochas
 IX Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens
 VI Conferência Sul Americana de Engenheiros Geotécnicos Jovens
 15 a 18 de Setembro de 2020 – Campinas - SP



_____ (1976a). **Ensaio geotécnicos sobre amostras indeformadas da fundação da barragem de terra - margem esquerda e dos aterros experimentais e sobre amostras deformadas das áreas de empréstimo “Dois Irmãos” e da “Escavação da fundação da barragem de enrocamento” - Usina de Itaipu - Estado do Paraná.** Documento interno de Itaipu, SAT 2063.50.0253.P

_____ (1976b). **Ensaio Geotécnicos Sobre Amostras Indeformadas Extraídas Da Fundação Da Barragem de Terra de Itaipu - M.E.** Documento interno de Itaipu, SAT 2063.50.0252.P.

International Engineering Company (IECO) & Enerconsult Engenharia Ltda (ELC) (1977). **Aprovechamiento Hidroelectrico de Itaipu - Presa de Tierra Margen Izquierda y Transicion con la Presa de Enrocado - Informe final del proyecto.** Arquivo interno de Itaipu, SAT 4280.50.8003-E.

_____ (1982). **Barragem de terra e de transição - M.E. - Maciço de argila plástica - relatório final.** Arquivo interno de Itaipu, SAT 2061.50.1757.P.

_____ (1992). **Aprovechamiento Hidroelectrico de Itaipu - Presa de Tierra de la Margen Izquierda - Informe geotecnico final - Sintesis de los parametros geotecnicos y analisis de estabilidad del macizo.** Arquivo interno de Itaipu, SAT 4280.50.8007.E.

Itaipu Binacional (2009). **Usina Hidrelétrica de Itaipu: Aspectos de Engenharia.** Foz do Iguaçu.

Patias, J. et al. (2015). **Vazões de Infiltração Através Da Barragem de Itaipu.** XXX Seminário Nacional de Grandes Barragens, Foz do Iguaçu PR.

Rodrigues, R. L. (2017a). **Comportamento da Barragem de Terra da Margem Esquerda de Itaipu Durante Período de Operação.** Dissertação de Mestrado. Pontifícia Univervisade Católica do Rio de Janeiro, PUC-Rio.

Rodrigues, R. L., Patias, J., Sayão, A. S. F. J. (2017b). **Barragem de Terra da Margem Esquerda de Itaipu: Estudo de Caso para Rebaixamento Rápido.** Revista Brasileira de Engenharia de Barragens do CBDB. Ano IV, Nº 05, Dezembro 2017.

Rodrigues, R. L. et al. (2010). **Modelagem de Barragens de Aterro – Estudo de Caso em Itaipu Binacional.** XXXII Seminário Nacional de Grandes Barragens – SNGB. Salvador – BA.

Thá, P. C. (2007). **Estudos das condições de fluxo pela Barragem de Terra da Margem Esquerda de Itaipu.** Dissertação de Mestrado. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, PUC-Rio.