

5 Análise do comportamento da barragem

A análise do comportamento da barragem de Curuá-Una teve como principal objetivo a verificação da segurança da barragem de terra para as condições atuais de operação (dezembro de 2002) e para uma futura elevação do nível do reservatório em 1,5m, passando a cota máxima para 69,5m. A finalidade desta elevação é viabilizar a ampliação da capacidade energética da usina, beneficiando a população local.

Nesta cota de 69,5m, a borda livre da barragem passaria de 3,0m para 1,5m, sendo este um valor ainda aceitável para a Barragem de Curuá-Una.

Além da elevação do reservatório, foram também verificadas as conseqüências de um alteamento do corpo da barragem, passando a cota da crista de 71,0m para 72,0m.

Para avaliar a segurança e o comportamento da barragem foram utilizados os programas Talren 97 e Plaxis v7.2.

5.1. Definição da linha freática

O conhecimento da posição da linha freática é fundamental em estudos de comportamento geotécnico de barragens. No presente trabalho, a definição da linha freática baseou-se, inicialmente, nos dados de piezômetros antigos. No final do ano de 2002 foram disponibilizados os resultados de novos piezômetros instalados no corpo da barragem e na fundação. Estes dados foram então comparados com a linha freática obtida pela instrumentação antiga.

Um estudo detalhado sobre o fluxo através da barragem e fundação da UHE Curuá-Una é apresentado em uma dissertação desenvolvida paralelamente a este trabalho (Saré, 2003).

Para a definição da linha freática existente no corpo da barragem, foram utilizados dados de dois conjuntos de piezômetros, que estão alinhados em duas seções da barragem: estaca 35 e estaca 38 (Figura 77). O primeiro grupo constitui-se de 2 piezômetros tipo Casagrande, referidos neste trabalho como

“piezômetros antigos”. O segundo grupo é constituído por 5 piezômetros elétricos, instalados em 2002, denominados “piezômetros novos”.



Figura 77 - Posicionamento em planta dos piezômetros

A Tabela 21 apresenta o posicionamento dos piezômetros utilizados na presente pesquisa, instalados no corpo da barragem. No ano de 2002, a cota real de instalação dos instrumentos foi verificada pela REDE Celpa, tendo sido observadas diferenças significativas entre o posicionamento previsto no projeto e o efetivamente executado no campo. O piezômetro PZ03, por exemplo, apresentou uma diferença de 2,84m entre a cota de instalação prevista no projeto (48,01m) e a verificada no campo (50,85m).

A Figura 78 representa esquematicamente o posicionamento dos piezômetros antigos, estes piezômetros foram instalados no corpo da barragem e estão referidos à seção da estaca 38. A Figura 79 mostra o posicionamento dos piezômetros novos na estaca 35.

Tabela 21 - Cotas dos piezômetros verificadas no ano de 2002

Piezômetro	Tipo	Estaca	Distância horizontal a partir do início da crista (m)	Cota de instalação (m)	Cota da boca (m)
PZ03	Casagrande	38	0,0	50,85	71,14
PZ18	Casagrande	38	33,0	53,91	59,74
B38-3	Elétrico	38	21,5	54,80	-
B38-4	Elétrico	38	32,5	50,00	-
B38-5	Elétrico	38	46,0	50,71	-
B38-6	Elétrico	38	72,0	49,42	-
B35-1	Elétrico	35	0,0	59,12	-
B35-2	Elétrico	35	7,2	57,18	-
B35-3	Elétrico	35	21,5	55,98	-
B35-4	Abutamento	35	32,5	54,30	-
B35-5	Elétrico	35	46,0	53,25	-

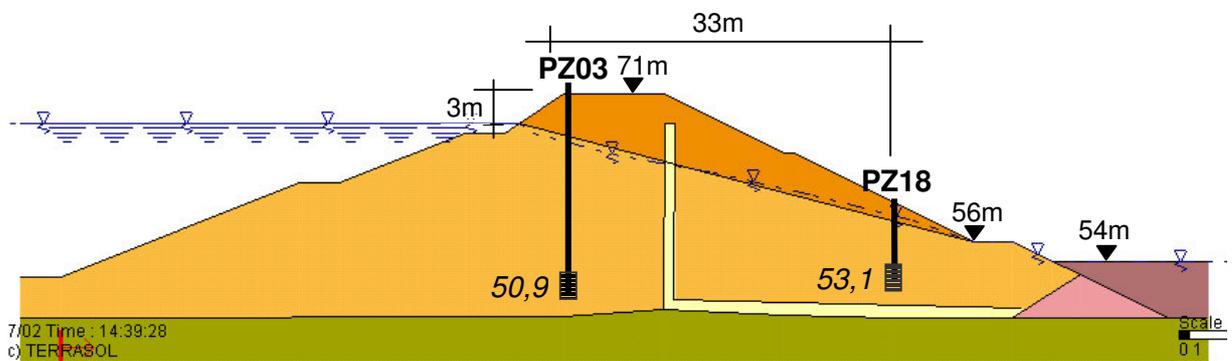


Figura 78 - Seção transversal da estaca 38 e posicionamento dos piezômetros “antigos”

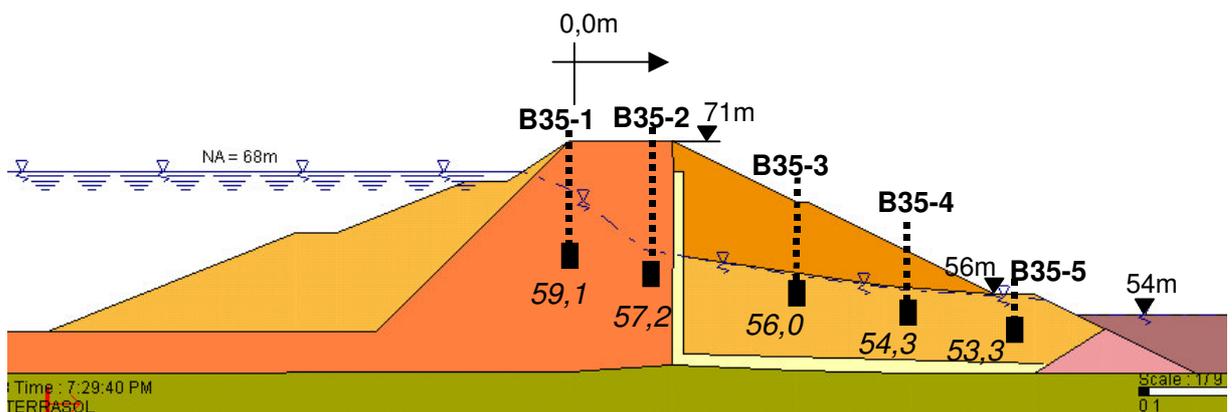


Figura 79 - Seção transversal estaca 35 e posicionamento dos piezômetros “novos”

A Figura 80 mostra a evolução dos registros dos piezômetros “antigos” PZ03 e PZ18 ao longo do 2001. Neste gráfico pode-se observar que a usina operou com a cota máxima do reservatório de fevereiro até o início de novembro, com exceção de um curto período em outubro. Em seguida houve uma redução

da cota do reservatório de até 1,42m no final de dezembro. Dezembro é usualmente a época de menor vazão nos rios da região. Verifica-se ainda que os maiores valores de carga piezométrica ocorrem entre os meses de março e abril, cujo período está indicado na figura como crítico.

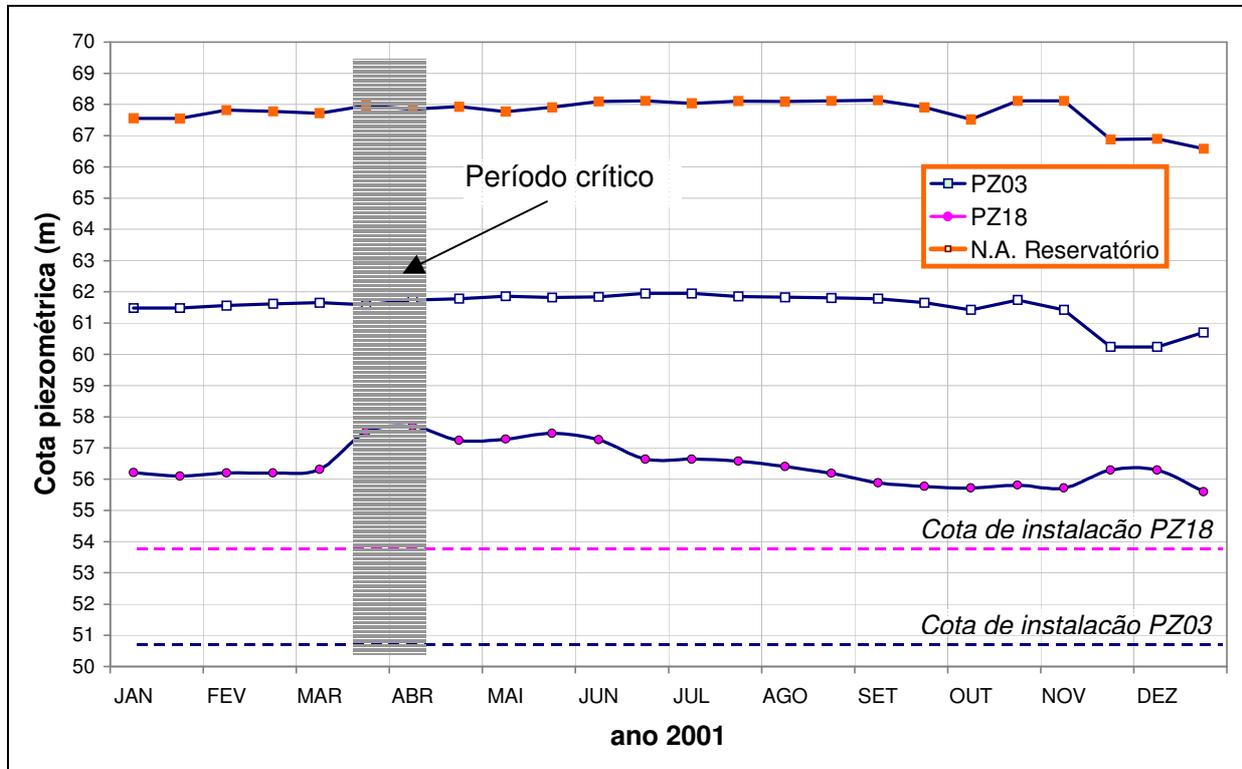


Figura 80 - Cota piezométrica no ano de 2001

Os registros piezométricos, relativos ao período crítico, associado aos indícios de funcionamento inadequado do sistema de drenagem (descrito no capítulo 3) serviram para estabelecer, de forma preliminar, a linha freática no corpo da barragem. Seguindo recomendações de Cedergren (1977), linhas freáticas foram traçadas manualmente, considerando-se diferentes razões de permeabilidade, até encontrar-se a melhor representação da situação de campo; isto é, reservatório na cota 68,0m e surgência de água na face do talude de jusante na cota 56,0m. Neste estudo, considerou-se a barragem homogênea, sem filtro vertical, desprezando-se o fluxo pela fundação. Os resultados mostraram que a razão $k_h / k_v = 4,6$ era a que melhor se adequava à situação de campo. Este resultado está em acordo com as simulações numéricas reportadas por Amorim (1976), quando foi indicada uma razão k_h / k_v da ordem de 5, para diferentes condições de percolação na barragem de Curuá-Una.

Posteriormente, a razão k_h / k_v foi verificada utilizando-se o programa PLAXIS v.7.2. O programa permite o cálculo da posição da linha freática, sob condição de regime permanente, a partir do conhecimento da geometria, dos coeficientes de permeabilidade e das condições de contorno a montante e a jusante. A pesquisa do valor de k_h / k_v que causaria surgência de água na face de jusante da barragem, para nível do reservatório na cota 68,0m, indicou que o valor 4,8 era o mais indicado para a razão de permeabilidades.

Ao final do ano de 2002, após a instalação dos piezômetros novos, foram disponibilizadas as medições realizadas no período de 13 a 30 de agosto. Verificou-se que, ao longo deste mês, o nível do reservatório manteve-se constante e que não houve dispersão entre os valores de carga piezométrica obtidos. A Tabela 22 apresenta a média dos valores das cotas piezométricas durante o mês de agosto de 2002. Ressalta-se que estes valores correspondem ao reservatório na cota 66,84m e que não representam o nível máximo que o reservatório pode atingir (68,0m).

Tabela 22 - Leituras dos piezômetros novos em agosto de 2002

Piezômetro	Distância horizontal do B35-01 (m)	Cota de instalação (m)	Medição (m)	Cota piezométrica de campo (m)
B35-01	0	59,12	2,35	61,47
B35-02	7,20	57,18	1,53	58,71
B35-03	21,5	55,98	1,17	57,15
B35-04	32,5	54,30	1,99	56,29
B35-05	46,0	53,25	1,06	54,31

Na Figura 81 estão comparadas as linhas freáticas obtidas com os piezômetros antigos e com os instrumentos novos. Nesta figura, a linha freática dos piezômetros antigos foi traçada manualmente, para razão $k_H / k_V = 4,6$, e admitindo reservatório na cota 67,0m. Observa-se que a instrumentação mais recente indica perda significativa de carga na região central da barragem. Esta perda não foi evidenciada com os piezômetros antigos, instalados próximos às abas de montante e jusante. Esta perda de carga pode ser atribuída à presença de um núcleo mais impermeável na barragem, não considerado inicialmente. Ressalta-se que, no estudo preliminar, apenas dois piezômetros (antigos) estavam disponíveis.

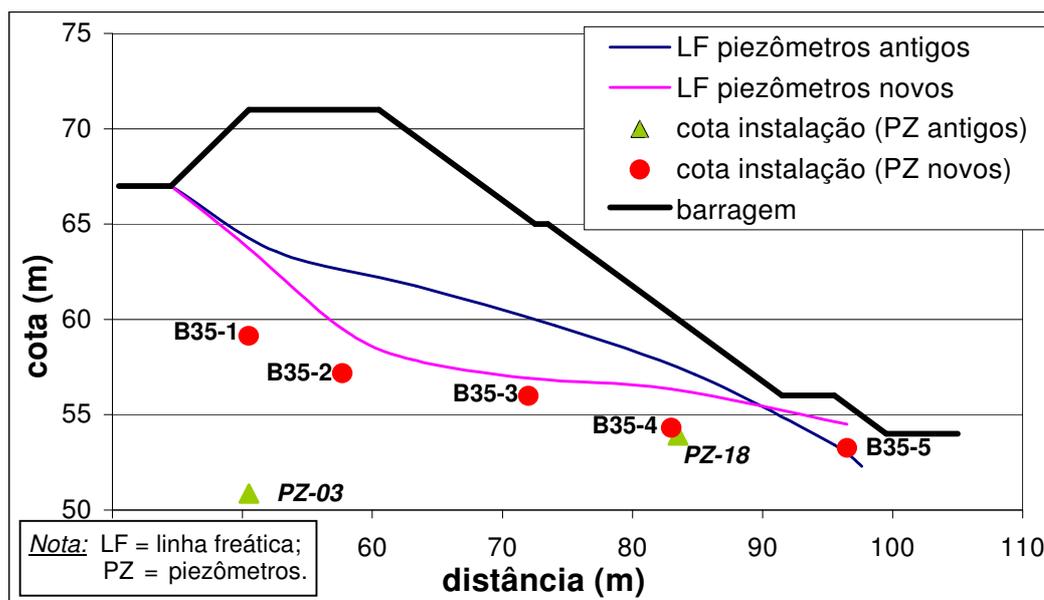


Figura 81 - Comparação entre linhas freáticas definidas por piezômetros novos e antigos com o reservatório na cota 67,0m

Com os novos registros piezométricos, a condição de fluxo permanente através do corpo da barragem e da fundação foi então simulada com o programa PLAXIS. Os valores de permeabilidade utilizados foram originados de dados obtidos em ensaios de laboratório e de dados disponíveis na literatura (Capítulo 3). Devido à ampla faixa de valores de permeabilidade encontrados para cada material, foram feitas várias simulações até encontrar-se a que melhor se ajustasse às condições de campo. Neste estudo foram testadas diferentes razões de permeabilidade, tanto para o corpo da barragem como para a fundação. O valor $k_H / k_V = 1,0$ resultava em um ajuste adequado entre a linha freáticas de campo e a prevista pelo programa. Na Tabela 23 encontram-se listados os valores de permeabilidade finais.

Tabela 23 - Valores de permeabilidade

Material	k (cm/s)	Observação
núcleo	5,00E-07	amostra proveniente de aterro experimental (Eletroprojetos, 198_)
abas	8,16E-06	valor médio obtido no presente trabalho
fundação	6,20E-05	estimado de Amorim (1976)

A simulação numérica foi considerada satisfatória, verificando-se na Figura 82 e na Figura 83 que os valores de carga de pressão medidos e previstos são razoavelmente próximos. A Tabela 24 compara as cotas piezométricas, sendo o erro definido como a razão entre os valores encontrados no campo e os previstos no programa Plaxis.

Tabela 24 - Cotas piezométricas de campo e previstas numericamente

Piezômetro	Material	Cota piezométrica (campo)	Cota piezométrica (Plaxis)	Erro
B35-01	núcleo	61,47	61,93	0,9926
B35-02	núcleo	58,71	58,87	0,9972
B35-03	aba	57,15	57,13	1,0003
B35-04	aba	56,29	56,30	0,9999
B35-05	aba	54,31	54,90	0,9893

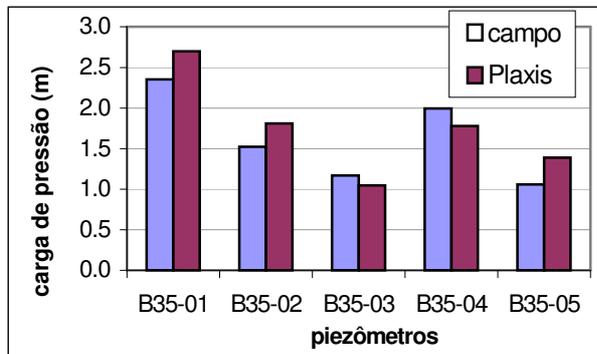


Figura 82 - Comparação entre as cargas piezométricas medidas e previstas

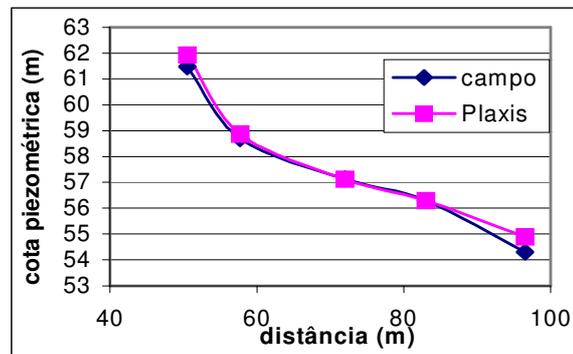


Figura 83 - Comparação entre as linhas piezométricas medidas e previstas

Com a definição dos valores de permeabilidade dos diferentes materiais (Tabela 23) e da geometria, foram estimadas as linhas freáticas para diferentes níveis do reservatório como mostra a Figura 84.

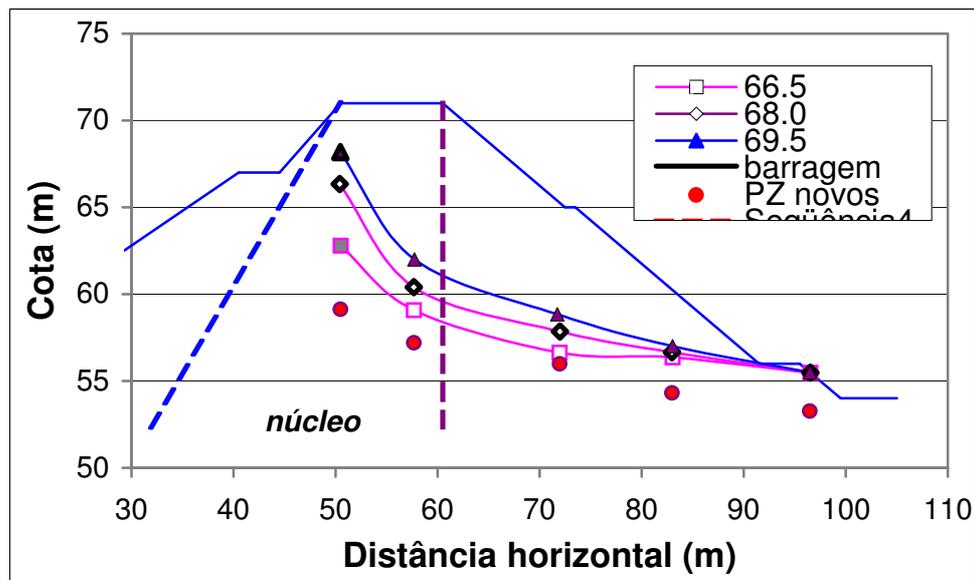


Figura 84 - Linhas freáticas para diferentes cotas do reservatório

5.2. Estudo de estabilidade

Análises de estabilidade do talude de jusante da barragem de terra da UHE Curuá-Una foram realizadas, sob condições distintas do nível do reservatório, para duas condições de linha freática.

As análises realizadas com a linha freática definida a partir dos piezômetros antigos serão referidas como Caso 1, e as análises que foram subsidiadas pelos piezômetros novos serão denominadas Caso 2. Com o estudo destes dois casos, pretendeu-se mostrar a importância de resultados de instrumentação confiáveis.

Nas análises de estabilidade, foi utilizado o método de Bishop Simplificado (Bishop, 1955), disponibilizado no programa Talren 97.

CASO 1: Piezômetros antigos - barragem homogênea

A seção transversal adotada no caso 1 está apresentada na Figura 85. Esta seção foi baseada em informações sobre a geometria original e os materiais empregados na construção da barragem de terra, reportadas em CELPA (1980) e Ferrari (1973).

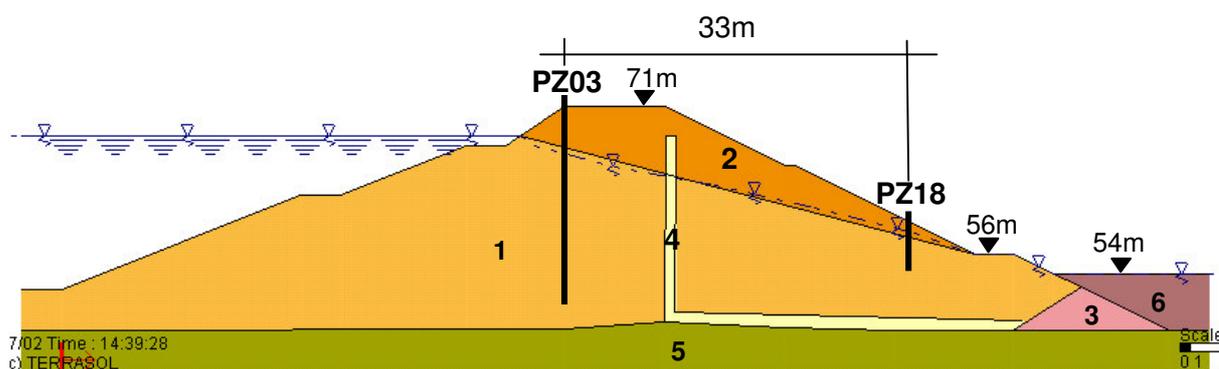


Figura 85 - Seção transversal típica da barragem de terra de Curuá-Una

Na Tabela 25 estão resumidas as principais propriedades geotécnicas dos seis diferentes materiais que compõem a seção da barragem. Neste estudo, optou-se por desprezar a existência do núcleo e considerar, no corpo da barragem, diferentes parâmetros geotécnicos dependendo das condições de saturação. Os parâmetros dos materiais 1 e 2 foram obtidos através de ensaios laboratoriais realizados na PUC-Rio. As propriedades geotécnicas dos materiais 3 e 4 foram estimadas com base em informações da literatura, devido à ausência de ensaios disponíveis.

Ressalta-se que eventuais imprecisões nestas estimativas têm importância reduzida para os resultados de estabilidade, visto que os materiais 3 e 4 apresentam um volume significativamente inferior ao dos demais materiais da seção. Os materiais 5 e 6 referem-se, respectivamente, ao solo de fundação e reforço do pé de jusante, tendo os valores da Tabela 25 sido obtidos a partir de ensaios realizados no IPT (Instituto Pesquisas Tecnológicas de São Paulo), com amostras provenientes da fundação da barragem (CELPA, 1980).

Tabela 25 - Parâmetros geotécnicos da barragem de Curuá-Una (caso1)

Material	Descrição	Local	γ (kN/m ³)	c' (kPa)	ϕ' (°)
1	Areia silto-argilosa	Abaixo da L.F.	19,5	0	30
2	Areia silto-argilosa	Acima da L.F.	20,4	39	26
3	Enrocamento	Pé de Jusante	20	0	40
4	Areia	Filtro	20	0	34
5	Areia siltosa	Fundação	20	2	32
6	-	Reforço	20	10	35

Nota: L.F. = linha freática

Para uma compreensão adequada da condição de estabilidade da barragem de terra de Curuá-Una, foram determinados os valores de fator de segurança (FS) correspondentes a diferentes níveis do reservatório. A Tabela 26 mostra os valores de FS e a Figura 86 ilustra a influência do aumento do nível do reservatório na estabilidade. O valor de FS global refere-se ao talude de jusante e o FS local refere-se a superfícies de ruptura localizadas na berma próxima ao pé do talude de jusante.

Na Figura 87 estão apresentadas as superfícies de ruptura para a condição de operação da usina com nível do reservatório na cota 68,0m.

Os resultados mostram que para a condição analisada, barragem homogênea e cargas piezométricas fornecidas pelos piezômetros antigos, os valores de FS são relativamente baixos, não havendo condições aceitáveis de segurança para um alteamento do nível do reservatório para a cota 69,5m.

Tabela 26 - Fatores de segurança na barragem de Curuá-Una (Caso 1)

Cota máxima do reservatório (m)	Fator de Segurança Global	Fator de Segurança Local
65,00	1,74	-
65,50	1,70	-
66,00	1,66	-
66,50	1,58	-
67,00	1,52	-
67,50	1,44	-
67,65	1,42	-
68,00	1,26	1,32
68,50	1,23	1,23
69,00	1,15	1,13
69,50	1,12	1,09
69,75	1,11	1,03
70,00	1,07	1,02

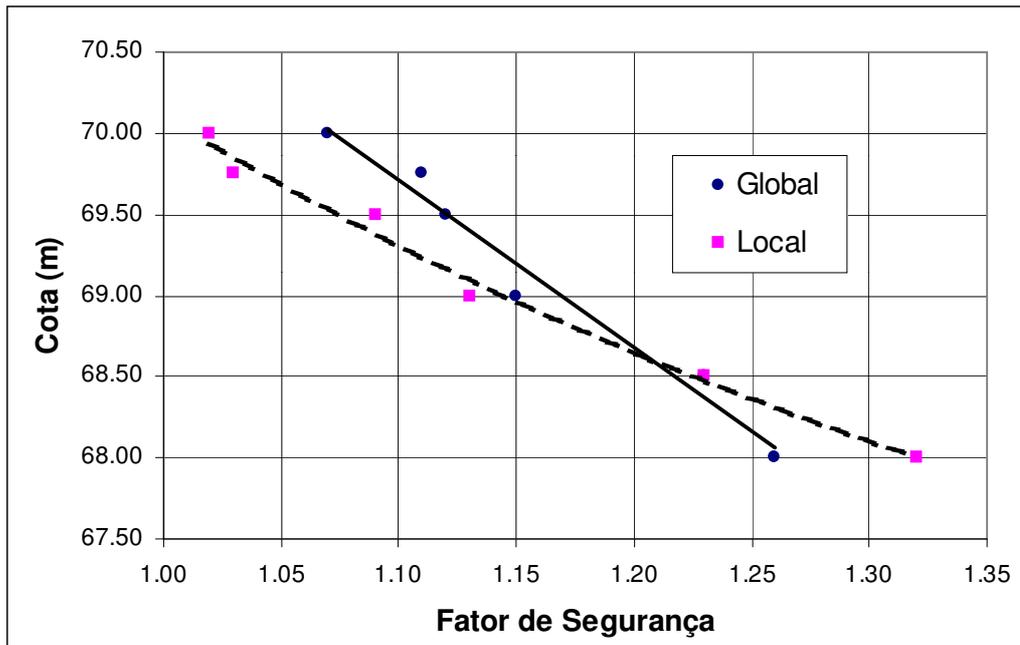


Figura 86 - Influência da variação do nível do reservatório no fator de segurança

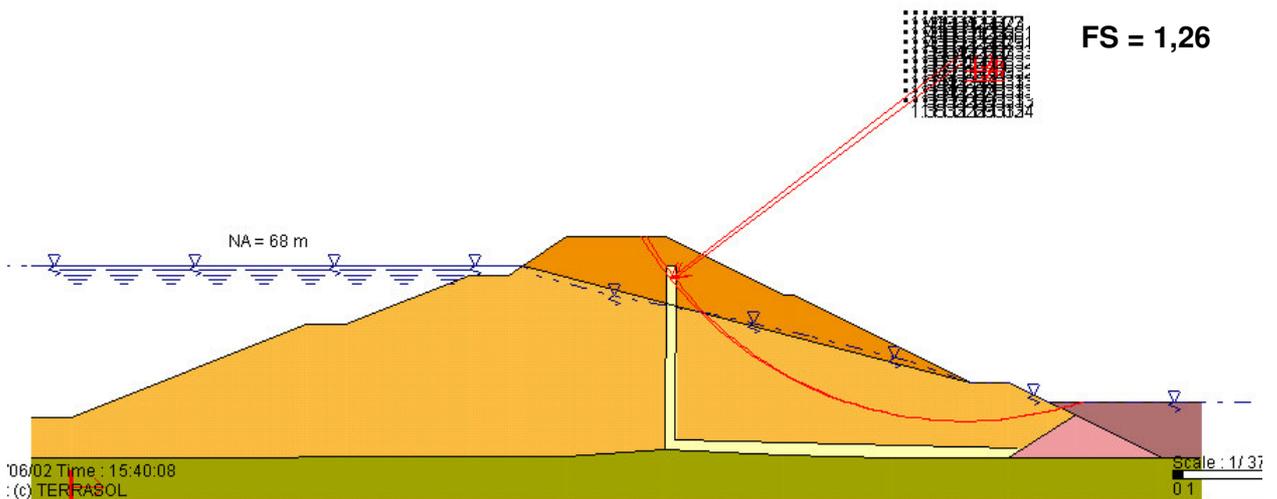


Figura 87- Estabilidade do talude de jusante com reservatório na cota 68,0m (Caso1)

As análises até então apresentadas não incorporaram a existência de sistema interno de drenagem. Para o caso de funcionamento adequado do sistema de filtro chaminé e dreno a jusante, previstos no projeto, o fator de segurança global obtido é significativamente maior ($FS = 2,05$), como pode ser visto na Figura 88. Neste caso (funcionamento do filtro e dreno), a elevação do reservatório em 1,5m, não causa variação significativa na estabilidade da barragem, sendo obtido $FS = 2,02$.

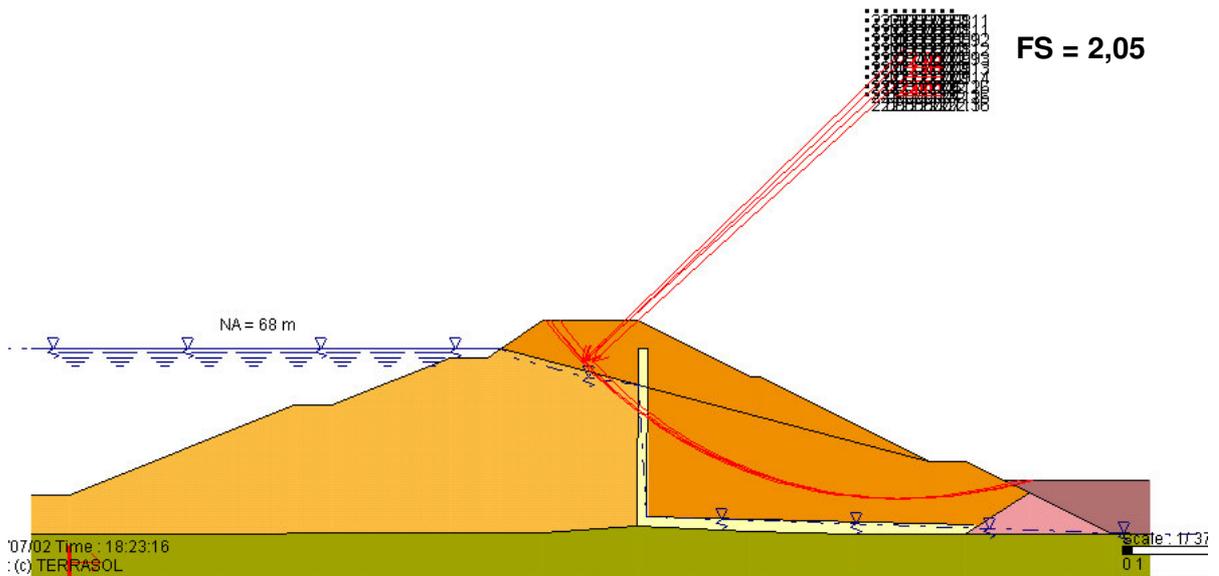


Figura 88 - Estabilidade da barragem com funcionamento adequado do filtro (Caso 1)

Ressalta-se que o funcionamento adequado do filtro chaminé e do dreno horizontal é questionável devido às observações de surgência de água na face do talude de jusante e à elevada carga piezométrica acusada pelo PZ18 da estaca 38.

Depois de definida a condição atual de segurança da barragem, estudou-se a possibilidade do alteamento do corpo da barragem e uma posterior elevação do nível do reservatório. Nas análises, considerou-se, para o solo de alteamento, as mesmas propriedades geotécnicas do material 2 (abas acima da linha freática). Foi feito, então, um estudo variando-se a inclinação do talude e determinando-se FS para o nível do reservatório nas cotas 68,0m e 69,5m. A Figura 89 mostra um esquema de alteamento de 1,0m da crista da barragem, com o talude de jusante com uma inclinação de 1V:2,5H. Ressalta-se que, neste caso, haveria necessidade de fazer uma camada de transição, a ser dimensionada com critério.

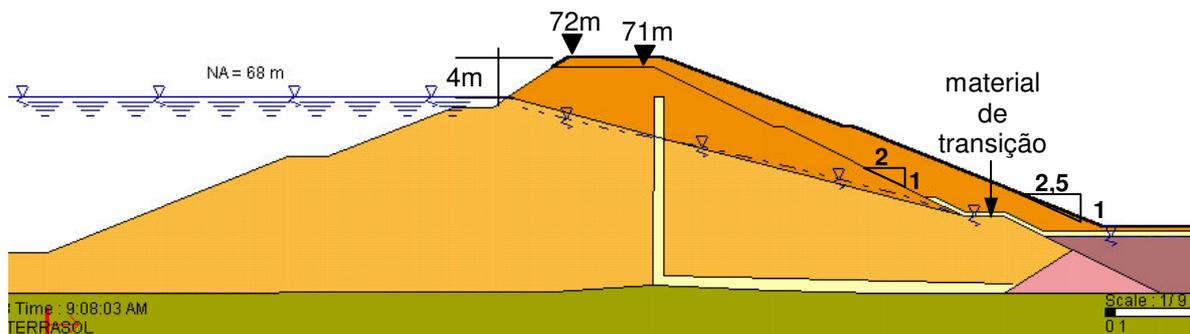


Figura 89 - Alteamento da barragem (1V:2,5H)

A Figura 90 e a Tabela 27 mostram os valores de FS para diferentes inclinações do talude de jusante e diferentes níveis do reservatório. Nesta tabela estão também apresentadas estimativas dos volumes de solo necessários para execução do alteamento. A eficiência de cada uma das alternativas, definida como a razão entre o volume a ser adicionado e o incremento de fator de segurança (Δ FS), pode então ser analisada. Nota-se que, para ambas as condições do reservatório, a barragem atingiria a condição de estabilidade satisfatória com inclinação do reforço de 1V:2,25H. A máxima eficiência seria porém atingida com inclinação do talude em 1V:2,5H. Vale lembrar que, para fluxo em regime permanente através de barragens de terra, a condição de estabilidade satisfatória é normalmente associada a $FS \geq 1,50$ (Figura 90).

Tabela 27 - Alteamento da barragem para jusante (Caso 1)

Inclinação do talude de jusante	Nível do reservatório (m)		Nível do reservatório (m)		Volume a ser adicionado (m ³ /m)	Nível do reservatório (m)	
	FS	69,5	68	69,5		68	69,5
	FS		Δ FS			eficiência	
	68	69,5	68	69,5		68	69,5
Situação atual	1,26	1,12	-	-			
1V:2H	1,43	1,31	13,5	17,0	63,25	4,7	3,73
1V:2,25H	1,61	1,50	5,90	14,5	102,0	4,1	7,03
1V:2,5H	1,79	1,69	11,2	12,7	142,5	3,6	11,25
1V:3H	2,19	2,08	22,3	23,1	216,25	3,3	9,37

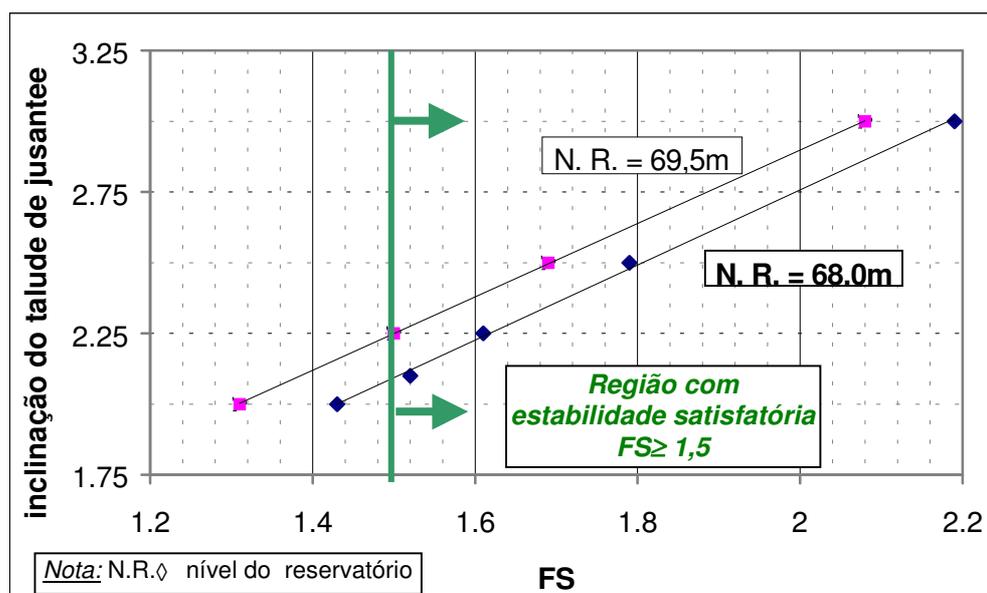


Figura 90 - Comparação do alteamento da barragem para os níveis do reservatório nas cotas 68,0m e 69,5m (caso1)

CASO 2: Piezômetros novos – barragem heterogênea

Neste estudo, o posicionamento da linha freática foi definido a partir dos valores de carga de pressão obtidos com os piezômetros novos. Adicionalmente, foi considerada a heterogeneidade da barragem, a partir da inclusão dos parâmetros de resistência e permeabilidade do núcleo.

A Figura 91 mostra a seção típica da barragem e a Tabela 28 mostra os valores dos parâmetros geotécnicos adotados nas análises. Os parâmetros do núcleo foram definidos com base em ensaios realizados no IPT (Eletroprojetos, 1980).

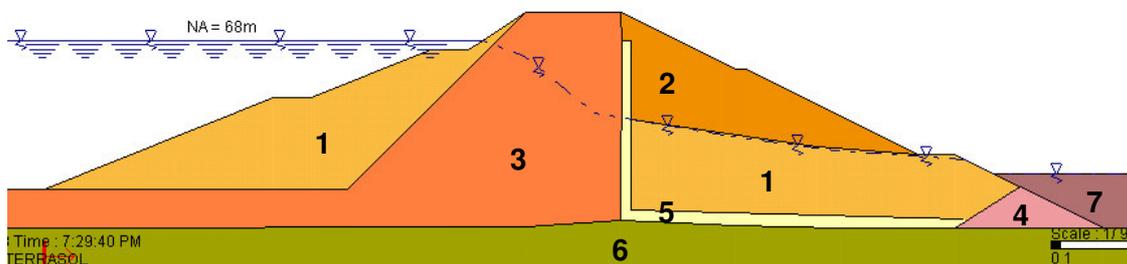


Figura 91 - Seção transversal da barragem (caso 2)

Tabela 28 - Parâmetros geotécnicos da barragem de Curuá-Una (caso2)

Material	Descrição	Local	γ (kN/m ³)	c' (kPa)	ϕ' (°)
1	Areia silto-argilosa	Abaixo da L.F.	19,5	0	30
2	Areia silto-argilosa	Acima da L.F.	20,4	39	26
3	Argila arenosa	Núcleo	15	50	28
4	Enrocamento	Pé de Jusante	20	0	40
5	Areia	Filtro	20	0	34
6	Areia siltosa	Fundação	20	2	32
7	-	Reforço	20	10	35

Nota: L.F. = linha freática

A Figura 92 apresenta a variação do FS para as diferentes condições analisadas. Os resultados mostram $FS \geq 1,5$ somente para níveis do reservatório inferiores a 68,6m. Acima deste nível, seriam recomendadas obras adicionais de estabilização.

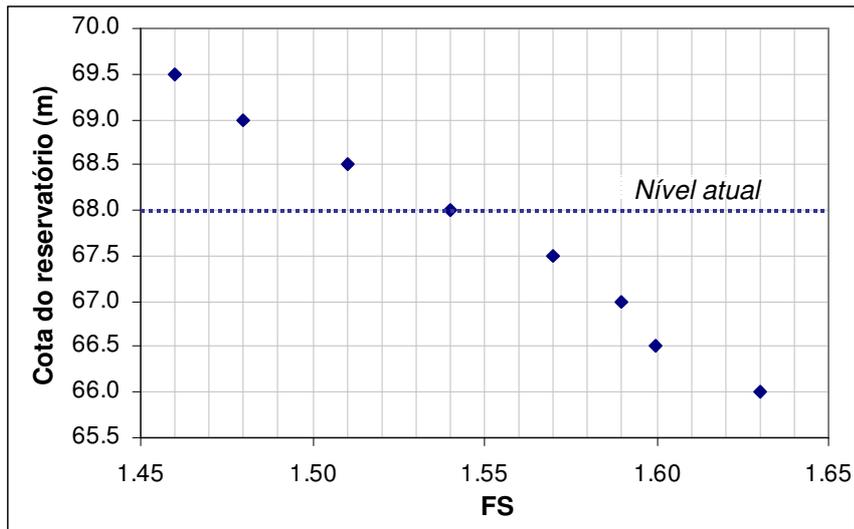


Figura 92 - Influência do nível do reservatório no FS (caso 2)

O alteamento do corpo da barragem é uma das alternativas possíveis para elevar o nível do reservatório até a cota 69,5m e garantir a condição mínima de estabilidade ($FS = 1,5$). Foram, então, consideradas duas situações para o talude de jusante. Na primeira, foi admitida uma inclinação do talude paralela à face original (inclinação 1V:2H); na segunda, adotou-se um aumento suave na inclinação (1V:2,25H). Os resultados estão resumidos na Tabela 29, incluindo os volumes de solo a serem adicionados no alteamento. Observa-se que o talude de jusante com inclinação de 1H:2V pode ser considerado uma solução adequada.

Tabela 29 - FS para alteamento da barragem para jusante (caso 2)

Inclinação do talude de jusante	Nível do reservatório		Volume a ser adicionado (m^3/m)
	68,0m	69,5m	
Sem alteamento	1,54	1,46	0,0
1V:2H	1,57	1,49	63,25
1V:2,25H	1,72	1,66	102,0

Na Figura 93 estão apresentadas as superfícies de ruptura para a condição de operação da usina, com nível do reservatório na cota 68,0m. Observa-se que a influência dos parâmetros de resistência do núcleo é desprezível em comparação com os do material da aba de jusante.

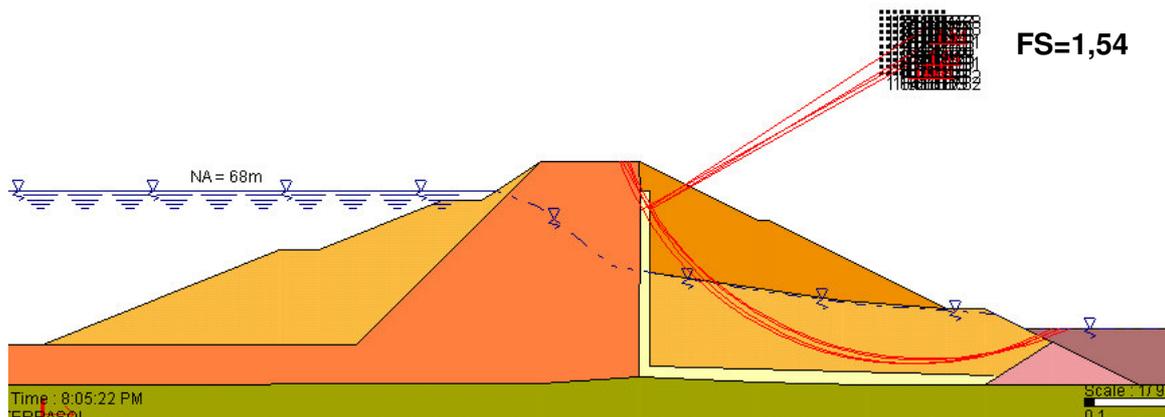


Figura 93 - Estabilidade do talude de jusante com nível do reservatório na cota 68,0m (Caso 2)

5.3. 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 um $FS \geq 1,50$. Este limite é recomendado pelo “Corps of Engineers” dos EUA, para estabilidade de barragens (Fell e outros,1992). Foram consideradas como situação de Atenção as condições de fluxo que resultam em FS entre 1,50 e 1,20. Condições de estabilidade com $FS < 1,20$ foram classificadas na faixa de Emergência.

As análises foram realizadas computando-se os FS associados a diferentes cotas do nível do reservatório. As linhas freáticas correspondentes à elevação do nível do reservatório foram estimadas a partir da distribuição de carga de pressão estabelecida pelos piezômetros antigos (Caso 1) e pelos piezômetros novos (Caso 2). Mais uma vez, o estudo destes dois casos teve como objetivo mostrar a importância do uso de parâmetros e de resultados de instrumentação confiáveis.

CASO 1: Piezômetros antigos – barragem homogênea

Na Tabela 30 estão apresentadas as cotas de instalação dos instrumentos da estaca 38 e as respectivas cotas piezométricas, referentes aos valores de FS que delimitam as faixas de segurança acima definidas. Verifica-se, que, no caso

do piezômetro PZ03, cotas piezométricas superiores a 62,6m indicam uma condição de Alerta e que a condição de operação Normal é limitada à cota 61,10m.

Tabela 30 - Cota piezométrica da estaca 38

Piezômetro	Cota de instalação (m)	Cota piezométrica (m)	
		FS = 1,20	FS = 1,50
PZ03	50,85	62,60	61,10
PZ18	53,91	57,85	56,33

Na Figura 94 está ilustrada a variação do fator de segurança com o nível do reservatório. Neste gráfico, é possível perceber que, com o rebaixamento do nível do reservatório da cota 68,0m para a cota 67,0m, obtém-se $FS > 1,50$, ou seja, a obra passaria a ser classificada dentro do padrão Normal de operação. Pode ser observado também que, para os níveis de reservatório abaixo da cota 68,0m, os fatores de segurança têm um acréscimo significativo, provocando uma descontinuidade no gráfico. Isto pode ser explicado pelo fato da linha freática no Caso 1 interceptar a face do talude de jusante quando o nível de reservatório situa-se acima da cota 68,0m.

Na Figura 95 e na Figura 96 estão ilustradas os registros dos piezômetros PZ03 e PZ18 ao longo do ano de 2001. A oscilação natural do nível do reservatório, em função das épocas chuvosas e de estiagem, acarretam alterações nas leituras, fazendo com que a segurança da barragem varie entre as condições de Atenção e Normal.

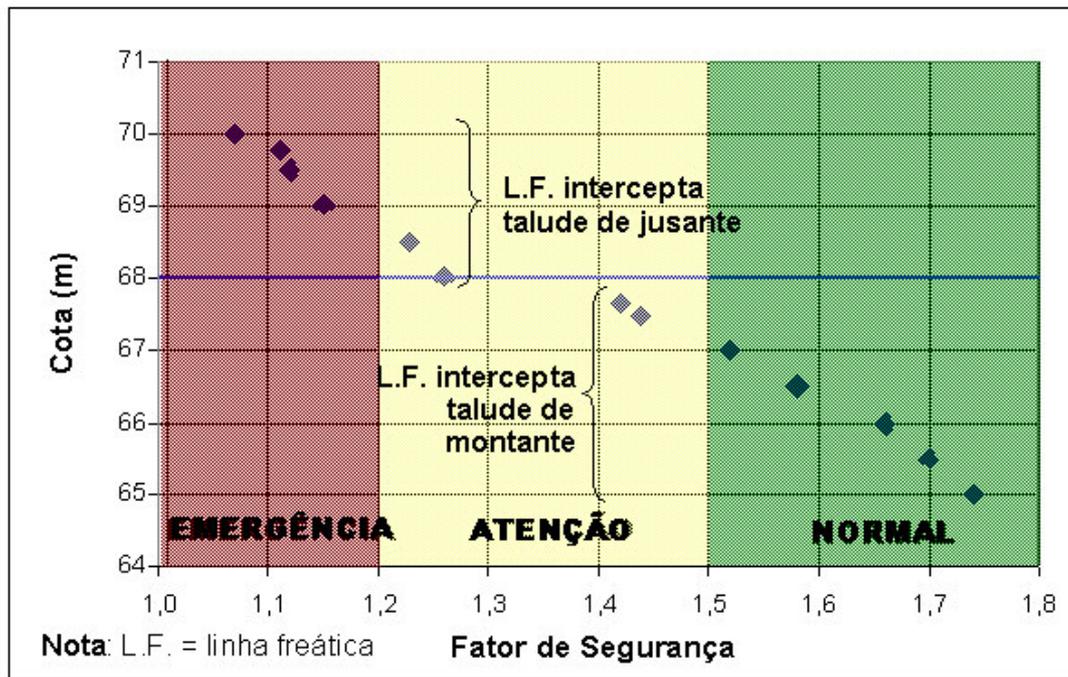


Figura 94 - Variação do fator de segurança com o nível do reservatório

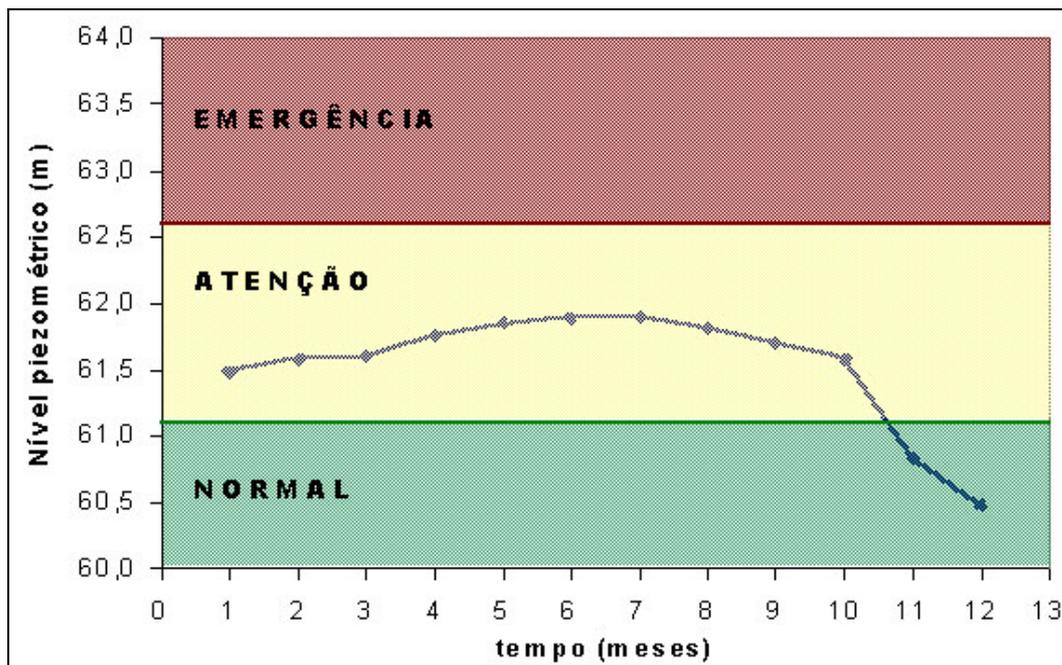


Figura 95 - Condições de operação da barragem durante o ano de 2001 (PZ03)

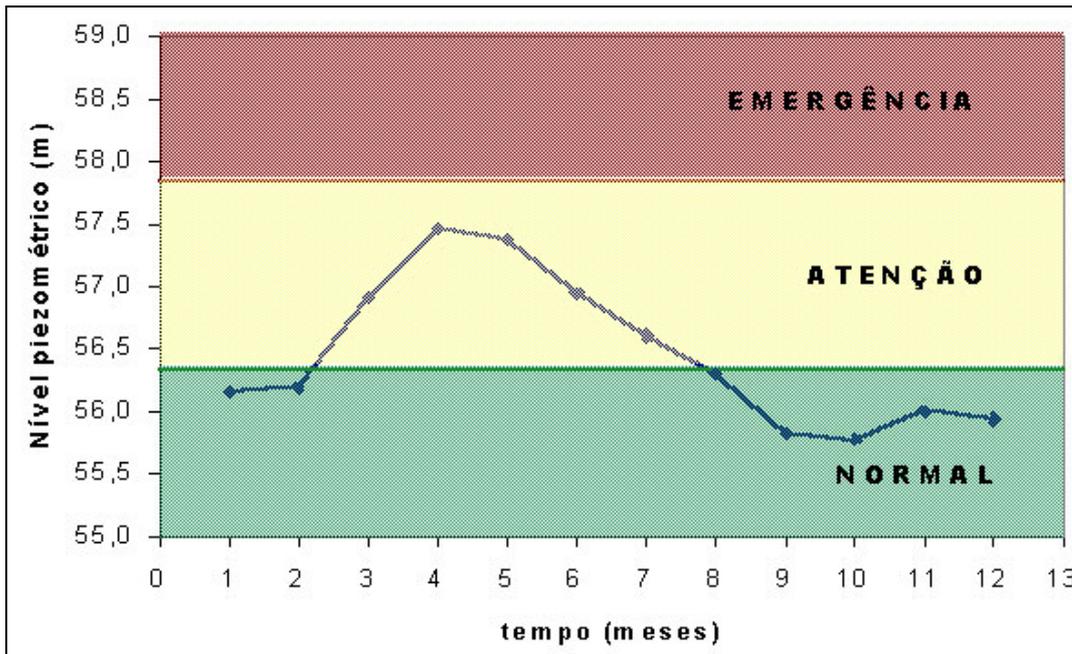


Figura 96 - Condições de operação da barragem durante o ano de 2001 (PZ18)

CASO 2: Piezômetros novos – barragem heterogênea

Neste estudo, as linhas freáticas relativas aos diferentes níveis do reservatório foram extrapoladas a partir linha freática, fornecida pelos piezômetros novos com reservatório na cota 66,84m. Adicionalmente, foi considerada a heterogeneidade da barragem, a partir da inclusão dos parâmetros de resistência e permeabilidade do núcleo.

Na

Tabela 31 estão apresentados os valores que limitam as condições de operação Normal ($FS \geq 1,50$) e de Atenção ($1,50 > FS \geq 1,20$).

Por motivos operacionais, a cota máxima que o nível do reservatório pode atingir é de 69,5m. Acima deste limite, o nível do reservatório seria superior à cota do canal de adução. Dessa forma, para as condições atuais da barragem e admitida a extrapolação da linha freática definida pelos piezômetros novos, não há possibilidade da barragem de terra atingir um nível de Emergência ($FS < 1,20$) quanto à segurança. Apesar desta limitação prática, foi simulada a elevação do reservatório até que a barragem atingisse a condição de Emergência. Para níveis acima da cota da crista, foi adotada a hipótese de um

alteamento com muro “cantilever” de concreto, para evitar mudanças na geometria da seção transversal da barragem.

Tabela 31 - Nível de segurança para os piezômetros novos – estaca 35

Piezômetro	Cota de instalação (m)	Cota piezométrica (m)	
		FS=1,20	FS=1,50
B35-01	59,12	65,92	63,59
B35-02	57,18	61,28	59,79
B35-03	55,98	58,78	57,57
B35-04	54,30	57,40	56,30
B35-05	53,25	57,00	55,06

A Figura 97 compara as linhas piezométricas relativas ao monitoramento de agosto de 2002 e a correspondente ao limite da condição de Atenção (FS = 1,50). Os resultados indicam que neste período a barragem operou em condições normais de segurança.

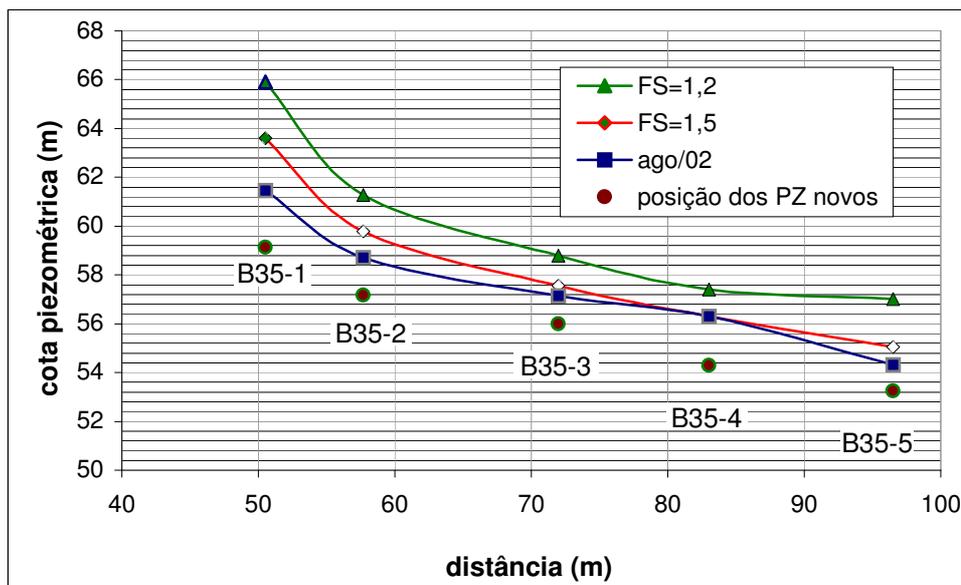


Figura 97 - Condição de operação da barragem durante agosto de 2002

Os resultados observados nas análises dos casos 1 e 2 indicam diferenças significativas nas condições de segurança da barragem de Curuá-Una. No Caso 1, os dois piezômetros estão instalados muito próximo às abas de montante e jusante e, portanto, não há como detectar a perda de carga decorrente da presença do núcleo. Os novos piezômetros, instalados em 2002, são em maior número e aparentemente apresentam leituras consistentes e funcionamento

adequado. Com isto, pode-se considerar que os resultados referentes ao Caso 2 sejam mais representativos do comportamento atual da barragem.

5.4. Sugestões de projeto de recuperação

Face aos valores relativamente baixos de FS encontrados para a barragem de Curuá-Una com a linha freática definida apenas com os piezômetros antigos, deveriam ser tomadas medidas para aumentar as condições de estabilidade. Tendo em vista os estudos ora realizados, poderiam ser sugeridas algumas alternativas que serão descritas a seguir.

Ressalta-se que os estudos realizados no Caso 2 foram considerados mais representativos da condição de campo, porém as sugestões apresentadas a seguir visam mostrar a diferença entre conclusões que dados de diferentes instrumentações de campo podem conduzir.

i) Controle de percolação:

No quadro atual de operação da barragem, o nível do reservatório poderia ser limitado à cota 67m, para garantir uma condição adequada de estabilidade, ou seja, fator de segurança não inferior a 1,50. Com esta restrição, eventuais surgências de água na face do talude de jusante deixariam de ocorrer e o fluxo no corpo da barragem corresponderia a cargas piezométricas relativamente baixas.

Esta alternativa, entretanto, não se mostra interessante pelo fato de reduzir a produção de energia elétrica, sendo oposta a intenção de ampliar a geração de energia elétrica a partir de uma eventual elevação do nível do reservatório.

ii) Execução de berma de reforço

Uma outra medida possível seria a execução de uma berma de reforço de solo compactado no talude de jusante, sem alteração do nível atual de operação do reservatório e com possibilidade de alteamento deste nível.

Um estudo foi realizado com o reservatório na condição atual (cota 68,0m) e com elevação de 1,5m. Na Figura 98, está representada uma seção esquemática do reforço sugerido.

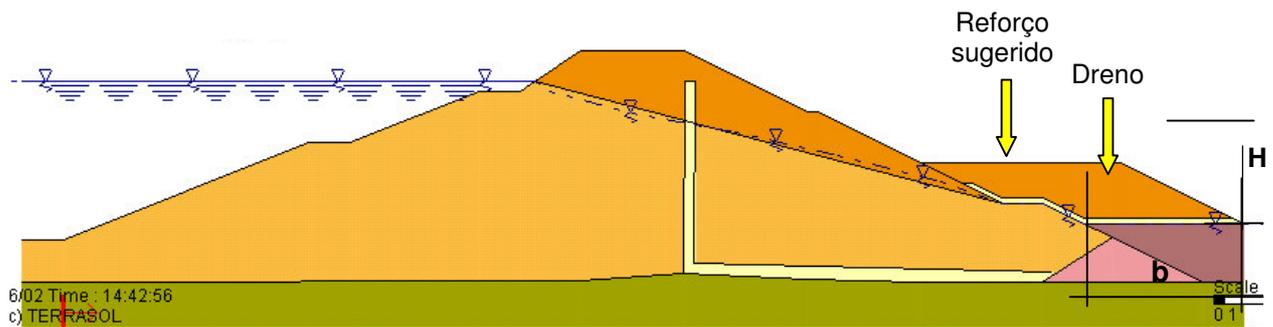


Figura 98 - Esquema de reforço sugerido

Neste estudo, foi simulada a construção de uma berma e calculado o valor de FS para diferentes alturas do aterro (H), mantendo-se constantes a largura da berma ($b = 15,5\text{m}$) e a inclinação do talude (1V:2H). Nas análises, os parâmetros geotécnicos da berma foram considerados idênticos aos adotados na barragem, assumindo a existência de disponibilidade deste tipo de material na região. Admitiu-se, ainda, a colocação de um dreno no pé do talude, a fim de manter as condições de fluxo existentes no maciço. Destaca-se a importância de um detalhamento rigoroso para este dreno, de forma a garantir a sua funcionalidade a longo prazo. Cuidados especiais também devem ser tomados com o material utilizado, para evitar uma possível colmatagem.

Os resultados, apresentados na Tabela 32 e Figura 99, mostram a influência da altura do reforço do fator de segurança. Neste gráfico observa-se que, para as condições atuais de operação do reservatório (cota 68,0m), a execução de uma berma com 3,5m de altura garantiria condições ideais de estabilidade barragem. No caso da elevação do nível do reservatório para a cota 69,5m, esta condição só seria atingida caso a altura da berma fosse igual a 6m.

Tabela 32 - Fatores de segurança para diferentes alturas de reforço (Caso1)

H berma (m)	68,0m	69,5m
0	1,26	1,12
1	1,38	1,22
2	1,40	1,23
2,5	1,41	1,23
3	1,47	1,27
3,5	1,52	1,30
4	1,57	1,32
5	1,71	1,43
6	1,87	1,53

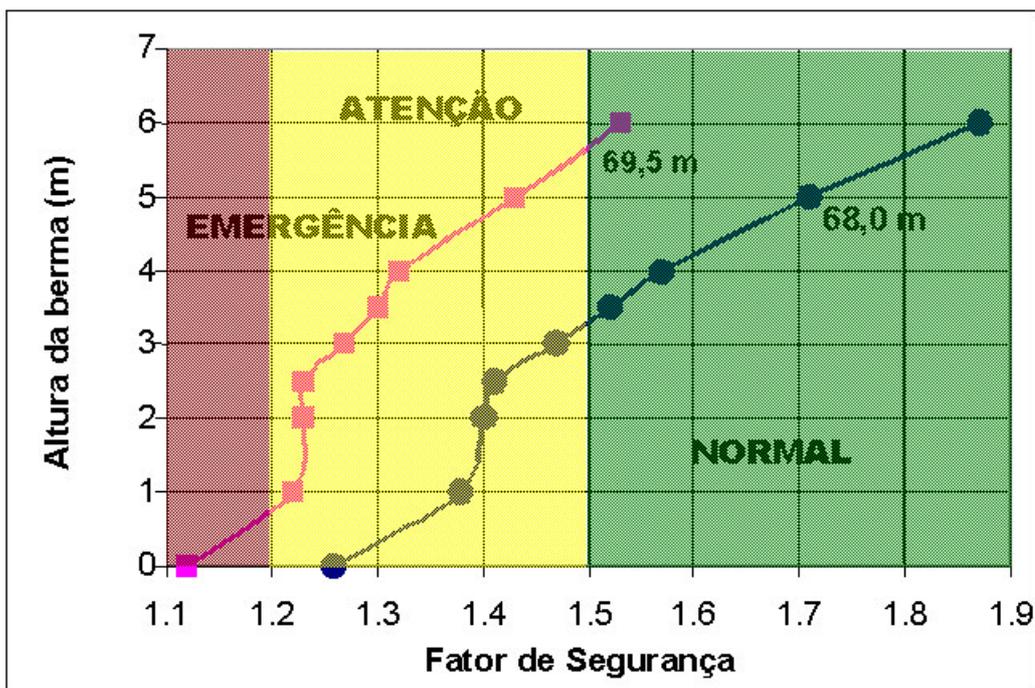


Figura 99 - Estudo de reforço no talude de jusante

iii) Alteamento da barragem com talude de jusante suavizado

Esta alternativa foi mostrada no subitem Estudo de Estabilidade do presente capítulo. Foi observado que, para a condição de fluxo do Caso 1, ao realizar um alteamento de 1,0m no maciço da barragem, é necessário fazer o talude de jusante com inclinação de 1H:2,1V e 1H:2,25V para os níveis do reservatório nas cotas 68,0m e 69,5m respectivamente (Figura 90 e Tabela 27). Desta forma seria garantida a condição Normal de operação da barragem (FS > 1,50).

Para as condições de fluxo encontradas no Caso 2, verificou-se que a barragem está dentro dos limites normais de segurança, para a condição do reservatório na cota 68,0m. Observou-se que o nível do reservatório pode atingir até a cota de 68,6m sem que haja comprometimento da condição Normal de operação da barragem. No entanto, como pretende-se elevar o nível do reservatório até a cota 69,5m, algumas medidas podem ser tomadas para assegurar que o fator de segurança seja superior à 1,50. Seguindo a mesma metodologia do estudo do caso1, têm-se as seguintes recomendações.

i) Controle de percolação:

No quadro atual de operação da barragem, o nível do reservatório poderia ser limitado à cota 68,7m, para garantir uma condição adequada de estabilidade, ou seja, fator de segurança não inferior a 1,50. Com esta restrição o fluxo no

corpo da barragem corresponderia a cargas piezométricas limite entre a condição Normal e de Atenção. No entanto, pretende-se elevar o nível do reservatório até a cota 69,5m para aumentar a produção de energia da usina.

ii) *Execução de berma de reforço*

Uma outra medida possível seria a execução de uma berma de reforço de solo compactado no talude de jusante, sem alteração do nível atual de operação do reservatório e com possibilidade de alteamento deste nível.

Um estudo foi realizado com o reservatório nas cotas 68,0m, 69,0m e 69,5m. Na Figura 98, está representada uma seção esquemática do reforço sugerido, sendo a mesma do Caso 1 e seguindo exatamente a mesma metodologia.

Os resultados, apresentados na Tabela 33 e Figura 100, mostram a influência da altura do reforço no fator de segurança. Neste gráfico observa-se que, para as condições atuais de operação do reservatório (cota 68,0m), não há necessidade da execução da berma. No caso da elevação do nível do reservatório para a cota 69,5m, esta condição é atingida uma altura de berma com apenas 1m. Por motivos executivos, foram calculados os fatores de segurança para altura da berma de 2m, pois desta forma seria atingida a cota 56,0m. Esta cota apresenta surgência de água na face do talude de jusante.

Tabela 33 - Fatores de segurança para diferentes alturas de reforço (Caso 2)

H berma (m)	Nível do reservatório (m)		
	68,0	69,0	69,5
2m	1,69	1,62	1,59
1m	1,62	1,56	1,52
sem reforço	1,54	1,48	1,46

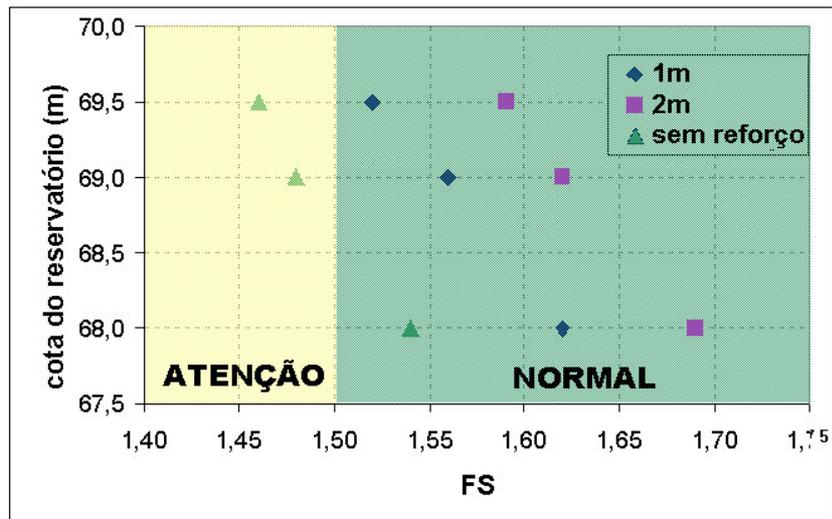


Figura 100 - Estudo de reforço no talude de jusante (Caso 2)

iii) Alteamento da barragem com talude de jusante suavizado

Esta alternativa foi mostrada no item Estudo de estabilidade do presente capítulo. Foi observado que para a condição de fluxo do Caso 2. Observou-se que para o nível do reservatório até a cota 69,0m pode ser executado o alteamento paralelo ao talude da barragem, ou seja, com inclinação 1H:2V. Ao realizar um alteamento de 1m no maciço da barragem com inclinação do talude de jusante de 1H:2,25V, os fatores de segurança para cota 68,0m e 69,5m são respectivamente 1,72 e 1,66 (Tabela 29). Desta forma seria garantida a condição Normal de operação da barragem ($FS > 1,50$).

5.5. Discussão dos Resultados

Segundo relatório da Eletroprojetos (1973), os critérios de projeto adotados para avaliar a estabilidade do talude de jusante foram: barragem homogênea e materiais com $c' = 250\text{kPa}$, $\phi' = 30^\circ$, $\gamma = 20\text{kN/m}^3$, obtendo-se $FS = 1,75$ para final de construção e $FS = 1,30$ para rebaixamento rápido do reservatório. Não foi encontrada nenhuma referência de fator de segurança para a condição de fluxo permanente da barragem.

Ferrari (2000) reportou resultados de análises de estabilidade para o talude de jusante da barragem. Para a condição de operação normal do reservatório (cota 68,0m) foi indicado um fator de segurança $FS = 1,54$, pelo método de Bishop simplificado. O autor adotou uma linha freática simplificada, com base somente nos resultados piezométricos referentes ao dia 12 de janeiro de 2000 (piezômetros antigos). A linha freática estipulada por Ferrari foi situada um pouco

abaixo da definida no Caso 1, porém os parâmetros de resistência adotados foram muito superiores aos utilizados na presente pesquisa. Ferrari considerou a seção da barragem como sendo homogênea e com parâmetros geotécnicos $c' = 100\text{kPa}$, $\phi' = 30^\circ$, $\gamma_{\text{sat}} = 20\text{kN/m}^3$ e $\gamma_{\text{nat}} = 18\text{kN/m}^3$.

Ressalta-se, ainda, que foram realizados ensaios no IPT (Eletroprojetos 198_), com materiais provenientes das jazidas das áreas de empréstimo. São relatados como parâmetros do material do núcleo $c' = 50\text{kPa}$, $\phi' = 28^\circ$ e $\gamma_{\text{dmax}} = 15\text{kN/m}^3$. Para o material das abas, foram adotados $\gamma_{\text{dmax}} = 20\text{kN/m}^3$ e os valores médios de resistência $c' = 40\text{kPa}$ e $\phi' = 35^\circ$.

A partir de ensaios realizados na PUC-Rio e reportados no presente trabalho, verificou-se que os parâmetros de resistência, em particular a coesão, mostraram-se inferiores aos parâmetros adotados na fase de projeto da barragem.

Com os resultados apresentados neste capítulo, ressalta-se a importância de uma instrumentação adequada. Os estudos de estabilidade, acima mostrados, levaram a conclusões distintas. As análises considerando apenas piezômetros antigos indicaram a necessidade de obras emergenciais para a estabilização da barragem. No entanto, com os dados dos novos piezômetros, verificou-se que a barragem pode operar em padrões aceitáveis de segurança até a cota do reservatório igual a 68,7m, ou seja, 70cm acima da cota máxima do projeto original (Figura 101).

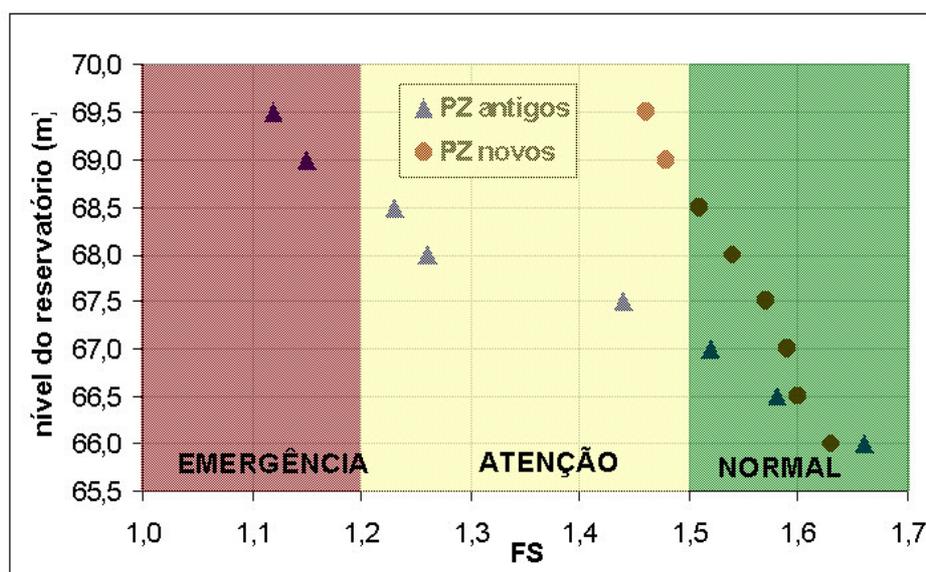


Figura 101 - Comparação entre fatores de segurança do Caso 1 (PZ antigos) e Caso 2 (PZ novos)

A diferença entre os Casos 1 e 2 é significativa no que se refere às recomendações de obras de estabilização. De acordo com a instrumentação mais recente, para a cota do reservatório atingir 69,5m, seria necessária a execução de uma berma de reforço a jusante com apenas 1m de altura. No entanto, estudos com base unicamente nos instrumentos antigos indicaram a necessidade de uma berma com altura 6 vezes maior.

Estes equívocos podem trazer conseqüências severas para o gerenciamento da usina, uma vez que uma má avaliação das condições de segurança poderia acarretar a necessidade de se reduzir o potencial energético ou mesmo de se realizar obras emergenciais de reforço eventualmente desnecessárias.

5.6. Análise de deslocamentos

O comportamento tensão-deformação da barragem de terra foi simulado com o programa Plaxis para 3 situações: condição atual do reservatório (cota 68,0m); elevação de 1,5m do nível do reservatório (cota 69,5m); e elevação de 1,5m do nível do reservatório com alteamento de 1m da barragem (crista na cota 72,0m). O alteamento foi admitido como tendo uma inclinação de 1V:2,25H, pois foi a solução mais eficiente encontrada nos estudos de estabilidade.

Para definir as condições de fluxo, estabilidade e tensão-deformação foi gerada uma malha triangular com 2636 elementos e 5513 nós, mostrada na Figura 102. Nesta figura também estão indicados os materiais utilizados na simulação numérica, cujas propriedades estão resumidas na Tabela 34. Os parâmetros adotados são os mesmos utilizados nas análises de equilíbrio limite.

Tabela 34 -Parâmetros utilizados no estudo tensão-deformação

Material	1	2	3	4	5	6
Local	Abas abaixo da L.F.	Abas acima da L.F.	Núcleo	Dreno de pé	Fundação	Reforço de jusante
Modelo	HS	MC	MC	MC	MC	MC
γ_d (kN/m ³)	19,5	19,5	13,0	19,4	17,0	23
γ_w (kN/m ³)	20,4	20,4	15,0	20,4	20,0	26
k_x (m/dia)	$7,1 \times 10^{-3}$	$7,1 \times 10^{-3}$	$4,32 \times 10^{-4}$	0,05	0,05	0,05
k_x (m/dia)	$7,1 \times 10^{-3}$	$7,1 \times 10^{-3}$	$4,32 \times 10^{-4}$	0,05	0,05	0,05
E_{50}^{ref} (kPa)	$1,6 \times 10^4$	2×10^4	$1,2 \times 10^4$	4×10^4	3×10^4	$2,5 \times 10^4$
E_{oed}^{ref} (kPa)	$1,92 \times 10^4$	-	-	-	-	-
E_{incr} (kN/m ³)	-	-	-	-	200	-
m	0,673	-	-	-	-	-

c_{ref} (kPa)	0,5	39	0,5	0,5	2,0	0,5
ϕ'	30°	26°	28°	40°	32°	35°
ψ	0°	0°	0°	10°	0°	5°
ν	0,25	0,20	0,30	0,20	0,26	0,27
p_{ref} (kPa)	100	-	-	-	-	-
k_n^{nc}	0,50	-	-	-	-	-

Nota: L.F.= linha freática; HS = "hardening soil"; MC = Mohr-Coulomb.

Tabela 35 -Parâmetros utilizados no estudo tensão-deformação

Material	1	2	3	4	5	6
Local	Abas abaixo da L.F.	Abas acima da L.F.	Núcleo	Dreno de pé	Fundação	Reforço de jusante
Modelo	HS	MC	MC	MC	MC	MC
γ_d (kN/m ³)	19,5	19,5	13,0	19,4	17,0	23
γ_w (kN/m ³)	20,4	20,4	15,0	20,4	20,0	26
k_x (m/dia)	$7,1 \times 10^{-3}$	$7,1 \times 10^{-3}$	$4,32 \times 10^{-4}$	0,05	0,05	0,05
k_x (m/dia)	$7,1 \times 10^{-3}$	$7,1 \times 10^{-3}$	$4,32 \times 10^{-4}$	0,05	0,05	0,05
E_{50}^{ref} (kPa)	$1,6 \times 10^4$	2×10^4	$1,2 \times 10^4$	4×10^4	3×10^4	$2,5 \times 10^4$
E_{oed}^{ref} (kPa)	$1,92 \times 10^4$	-	-	-	-	-
E_{incr} (kN/m ³)	-	-	-	-	200	-
m	0,673	-	-	-	-	-
c_{ref} (kPa)	0,5	39	0,5	0,5	2,0	0,5
ϕ'	30°	26°	28°	40°	32°	35°
ψ	0°	0°	0°	10°	0°	5°
ν	0,25	0,20	0,30	0,20	0,26	0,27
p_{ref} (kPa)	100	-	-	-	-	-
k_n^{nc}	0,50	-	-	-	-	-

Nota: L.F.= linha freática; HS = "hardening soil"; MC = Mohr-Coulomb.

Neste estudo, o material do filtro foi desprezado, tendo em vista que sua pequena espessura exigiria uma discretização excessiva da malha. O material do dreno do pé também foi considerado apenas para definir as condições de fluxo. O grande contraste de rigidez existente entre o material da aba e o enrocamento do dreno de pé poderia gerar problemas de convergência numérica. O programa sugere nestes casos a utilização de elementos de interface. Entretanto, face à dificuldade de se estabelecer os parâmetros desta interface, esta opção não foi adotada.

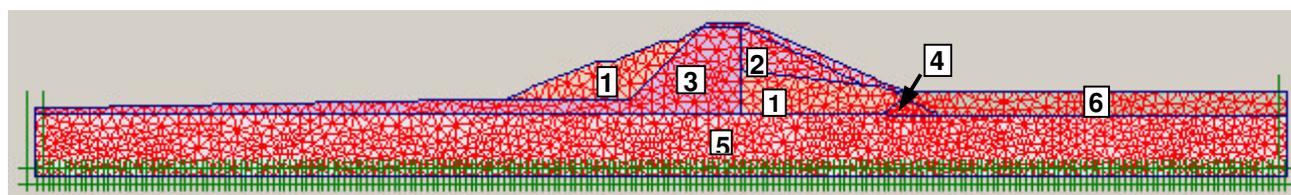
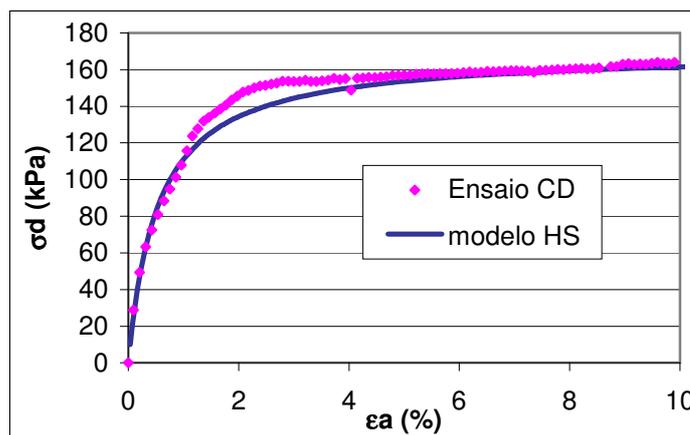


Figura 102 - Malha da análise tensão-deformação

Os parâmetros dos materiais das abas da barragem foram obtidos a partir de ensaios realizados no laboratório da PUC-Rio, apresentados no capítulo 4 desta dissertação. O conhecimento do comportamento tensão-deformação deste material, na sua condição saturada, possibilitou a utilização do modelo HS.

Os parâmetros do núcleo e da fundação foram retirados de dados utilizados no projeto (Eletroprojetos, 198_) e os demais parâmetros estimados a partir de valores encontrados na literatura (Azevedo Filho, 1990; Maia, 2001; Castro, 1996 e Águas, 1999). Para estes materiais, utilizou-se o modelo de Mohr-Coulomb, mais simples.

A Figura 103, a Figura 104 e a Figura 105 mostram a reconstituição das curvas tensão-deformação, dos ensaios de compressão triaxial CD, utilizando o modelo HS. Os ensaios foram realizados com tensão confinante de 100kPa, 200kPa e 450kPa, sendo os parâmetros de referência obtidos com o ensaio de tensão confinante de referência $p_{ref} = 100\text{kPa}$. Os resultados mostram que o modelo reproduz, razoavelmente bem, os módulos de deformabilidade para níveis de deformação inferiores a 2%, além da condição de ruptura. As pequenas diferenças encontradas podem ser atribuídas ao fato do modelo HS prever o comportamento tensão-deformação segundo uma hipérbole. Apesar destas diferenças, as simulações foram consideradas satisfatórias.

Figura 103 - Reconstituição da curva tensão-deformação de $\sigma_3 = 100\text{kPa}$

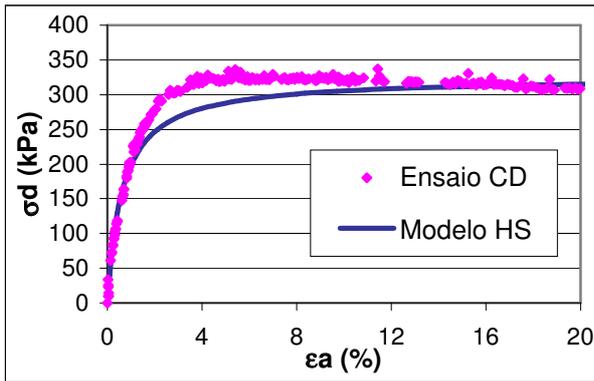


Figura 104 - Reconstituição da curva tensão-deformação $\sigma_3=200\text{kPa}$

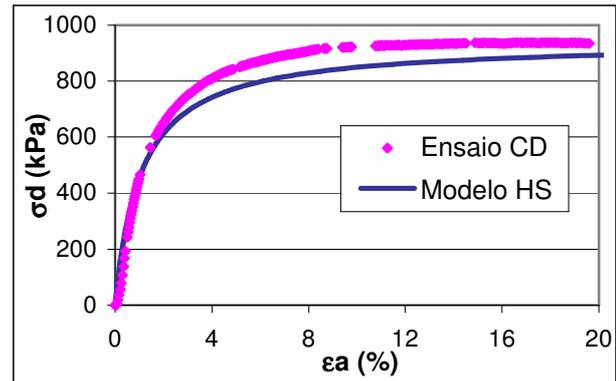


Figura 105 - Reconstituição da curva tensão-deformação de $\sigma_3=450\text{kPa}$

Foram simuladas 3 situações de carregamento: (i) condição atual da barragem, ou seja nível do reservatório na cota 68,0m; (ii) elevação do nível do reservatório da cota 68,0m para a cota 69,5m; (iii) elevação do nível do reservatório da cota 68,0m para a cota 69,5m após o alteamento do corpo da barragem.

Estado de tensão inicial

A Figura 106 mostra a distribuição de tensões totais médias para as condições atuais do reservatório. Segundo a convenção do programa, é atribuído o sinal negativo às tensões de compressão. Nesta figura está também apresentado o desenho da linha freática correspondente à cota do reservatório 68,0m. As duas linhas inclinadas paralelas que aparecem na figura representam um símbolo, utilizado pelo programa, para indicação da linha freática.

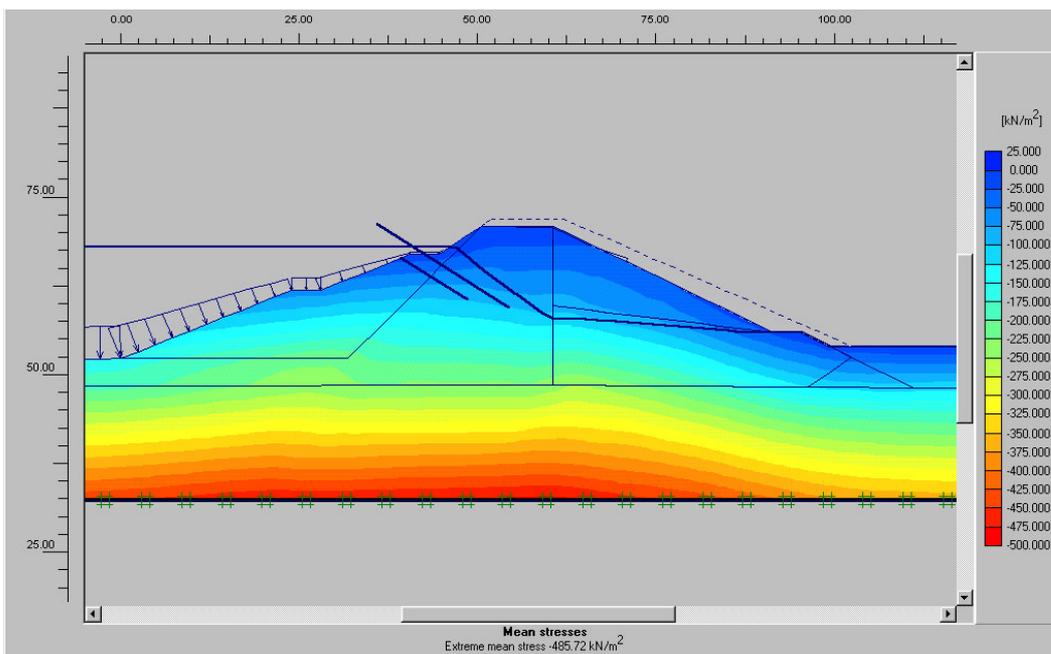


Figura 106 - Estado de tensão para nível do reservatório na cota 68,0m

Para avaliar os resultados fornecidos pelo Plaxis, comparou-se as tensões calculadas em pontos de Gauss (SP = “stress points”) em dois elementos da malha (Tabela 36). Procuraram-se elementos onde a superfície fosse horizontal e representasse uma condição de carregamento infinito, a fim de garantir que a direção da tensão principal maior fosse vertical. Foi escolhido um ponto a montante e outro a jusante do eixo da barragem. Os resultados mostram pequenas diferenças entre os valores calculados e previstos pelo programa. Para avaliar se estas diferenças poderiam ser minimizadas, foram testadas alternativas de convergência automática e manual, não tendo sido encontradas diferenças significativas.

Tabela 36. Comparação entre estados de tensão teórico e previsto pelo programa

Região	Cota (m)	$(\sigma_y)_{\text{teórico}}$ (kPa)	$(\sigma_y)_{\text{previsto}}$ (kPa)	$(u)_{\text{teórico}}$ (kPa)	$(u)_{\text{previsto}}$ (kPa)
Montante (SP 423)	33,537	516,06	512,38	342,20	326,48
Jusante (SP 2101)	44,252	230,44	241,44	97,48	102,88

Nota: σ_y = tensão vertical, u =poropressão ($\gamma_w = 10\text{kN/m}^3$)

O programa Plaxis permite a obtenção de um fator de segurança, utilizando a técnica de redução dos parâmetros de resistência (Matsui e San, 1991). A Figura 107 mostra a superfície de ruptura, para a condição atual da barragem, a qual está associada a um FS = 1,57. A superfície potencial de

ruptura prevista pelo programa é aproximadamente circular e está de acordo com a encontrada pelo método de equilíbrio limite (Bishop Simplificado). Entretanto, no topo do talude, há uma pequena variação entre as superfícies previstas pelos dois métodos. Observações semelhantes foram reportadas na literatura por Rojas (1999), Águas (1999) e Matsui e San (1991).

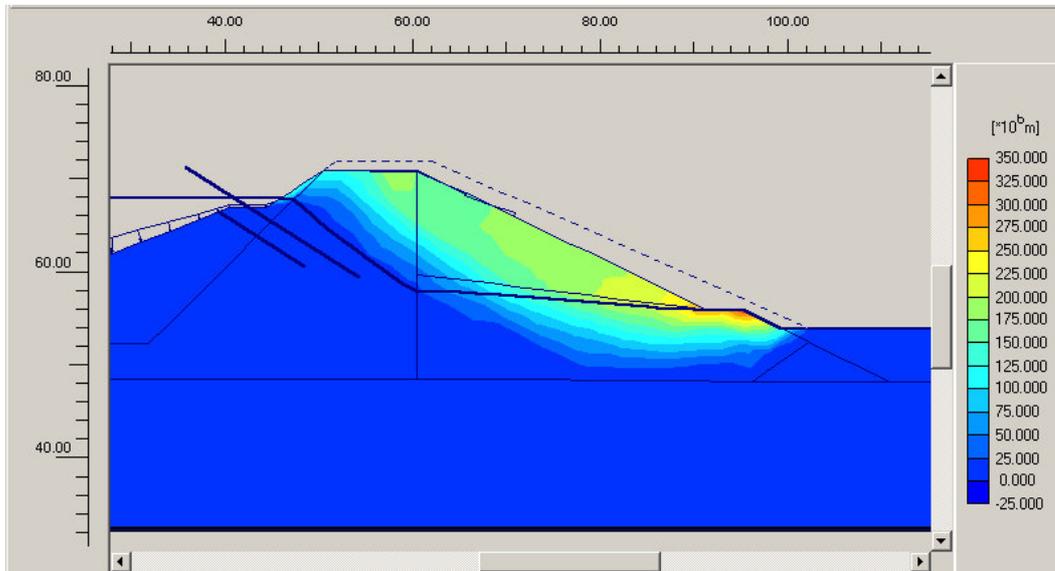


Figura 107 - Superfície de ruptura na condição atual da barragem

As análises também indicaram rupturas localizadas na berma do talude de jusante, entre as cotas 56,0m e 54,0m, justamente onde há surgência de água. Este fato foi igualmente identificado nas análises de equilíbrio limite. A instabilidade desta região provocaria danos de pequena gravidade, se comparados à ruptura global da barragem, pois o volume de solo deslocado não seria significativo e haveria a possibilidade de recuperação da estrutura.

Elevação do nível do reservatório

A elevação de 1,5m nível do reservatório acarreta mudanças reduzidas no estado de tensão total, conforme mostra a Figura 108.

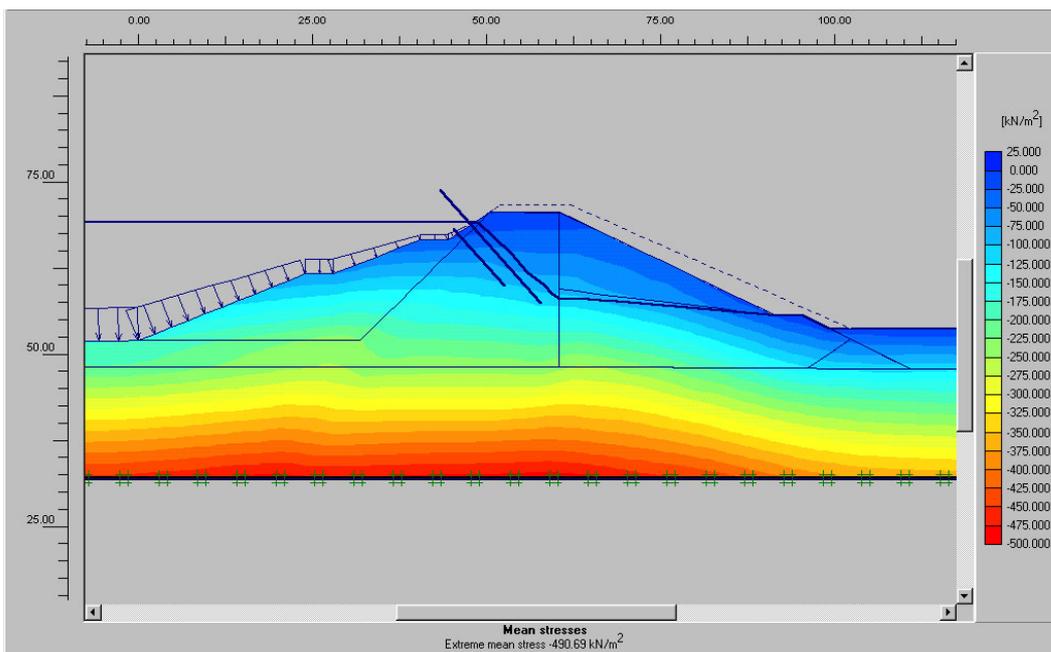


Figura 108 - Estado de tensão total para nível do reservatório na cota 69,5m

Para a determinação dos deslocamentos causados pela elevação do reservatório, primeiramente utilizou-se a opção do programa de mudança da carga piezométrica. Nesta opção, impôs-se uma alteração da cota da linha do reservatório de 68,0m para 69,5m. Os resultados indicaram um deslocamento ascendente da crista da barragem, o que seria fisicamente incoerente. Observou-se, também, que apesar de ser um único estágio de carregamento, os valores de deslocamentos totais eram diferentes dos incrementos de deslocamento, demonstrando claramente um funcionamento inadequado do programa para este tipo de simulação.

Devido à constatação de erros na simulação numérica, foram feitas várias análises adicionais de um aterro hipotético com diferentes condições de carregamento e de condições de fluxo. Constatou-se que sempre que é utilizada a opção de geração automática de poropressão, seja através da definição de linha freática ou de cargas de pressão nos contornos, o deslocamento total é diferente do somatório dos incrementos dos estágios de construção.

Face a esta dificuldade, optou-se por simular a elevação do nível do reservatório utilizando uma sobrecarga equivalente à carga de 1,5m de água. Foram utilizados 2 carregamentos uniformemente distribuídos, um aplicado no tapete impermeável de valor 15kPa e outro aplicado no talude de montante com valor médio de 7,5kPa. O programa não dispõe da alternativa de carregamento distribuído de valor variável, assim como restringe a 2 o número de carregamentos externos.

Com esta metodologia, verificou-se que os incrementos de deslocamentos totais são iguais aos incrementos de deslocamentos, como seria esperado para uma única etapa de carregamento. Estes deslocamentos totais, apresentados na Figura 109, Figura 110 também se mostraram mais coerentes. Nesta figura observa-se ainda a tendência de geração de duas superfícies de ruptura: no talude de jusante e numa pequena região no topo do talude de montante. No talude de montante, a colocação de “rip-rap” seria suficiente para melhorar as condições de estabilidade nesta região.

Os maiores deslocamentos ocorrem no talude de montante com um valor máximo da ordem de 9mm.

Ressalta-se que neste caso a linha freática adotada continuou sendo a correspondente às condições iniciais, ou seja, na cota 68,0m. Porém, com a elevação do nível do reservatório, a linha freática deveria assumir uma posição mais elevada ao longo do corpo da barragem. Esta diferença teria influência nos pesos específicos e nos níveis de poropressão. Entretanto, como mostrado na Figura 84, esta elevação é reduzida e portando a não consideração da posição real da linha freática não deve afetar os resultados de modo significativo. Note-se que os deslocamentos apresentados no núcleo e aba de montante que indicam uma deformação circular, são provocadas por limitações do programa. Ressalta-se que os deslocamentos apresentados pelo programa são inferiores à 1mm.

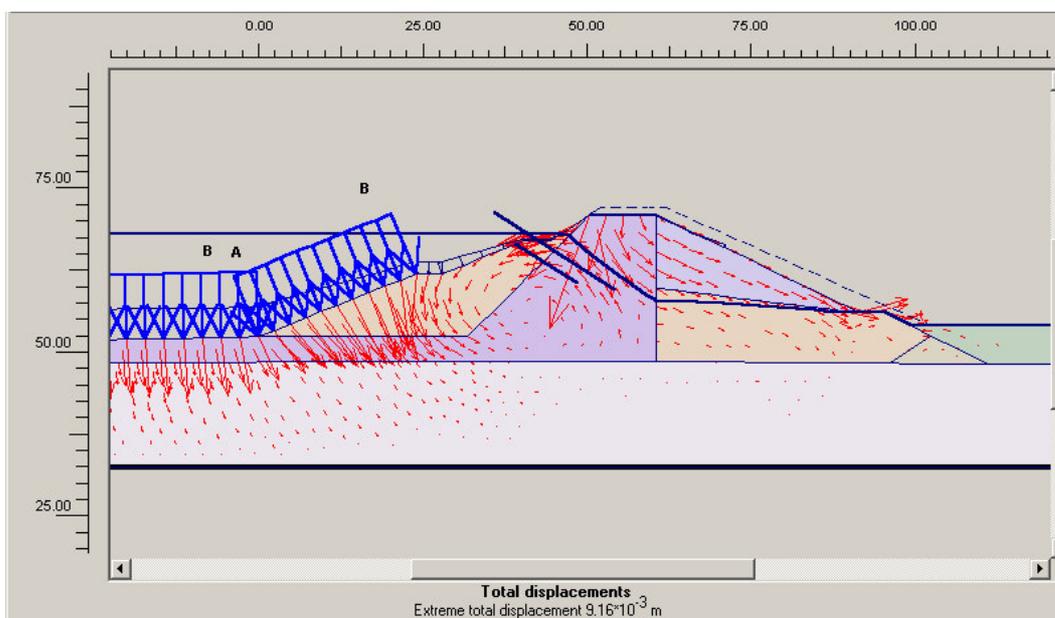


Figura 109 - Deslocamentos totais com reservatório na cota 69,5m

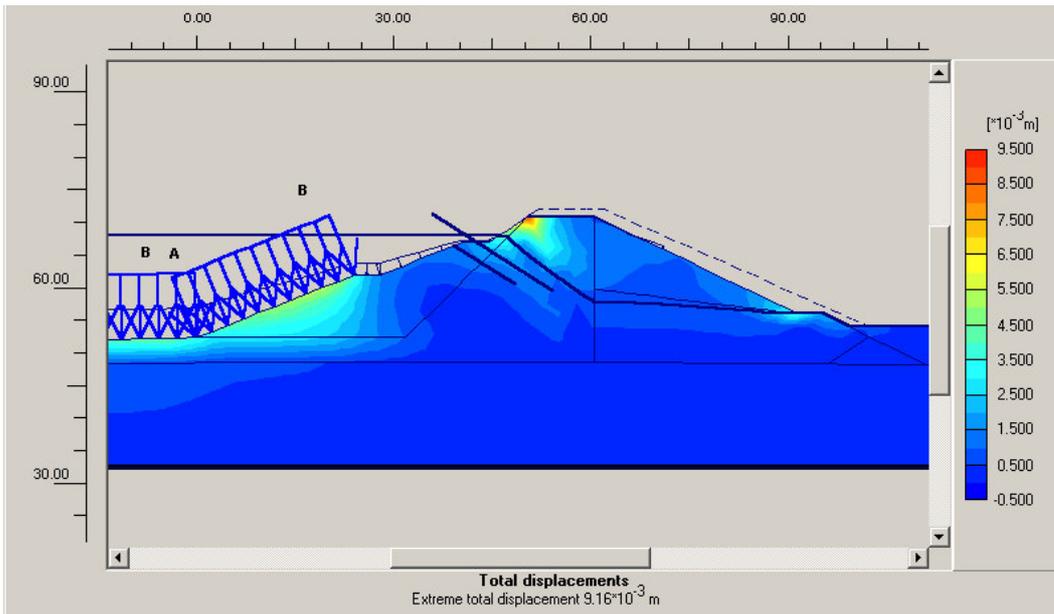


Figura 110 - Deslocamentos totais com nível do reservatório na cota 69,5m

Para a condição de elevação do nível do reservatório, a superfície potencial de ruptura (Figura 111) foi semelhante à obtida para condição atual, assim como o valor do FS = 1,54. Este resultado reflete o fato das condições de poropressão não terem se alterado, apesar da elevação do nível do reservatório.

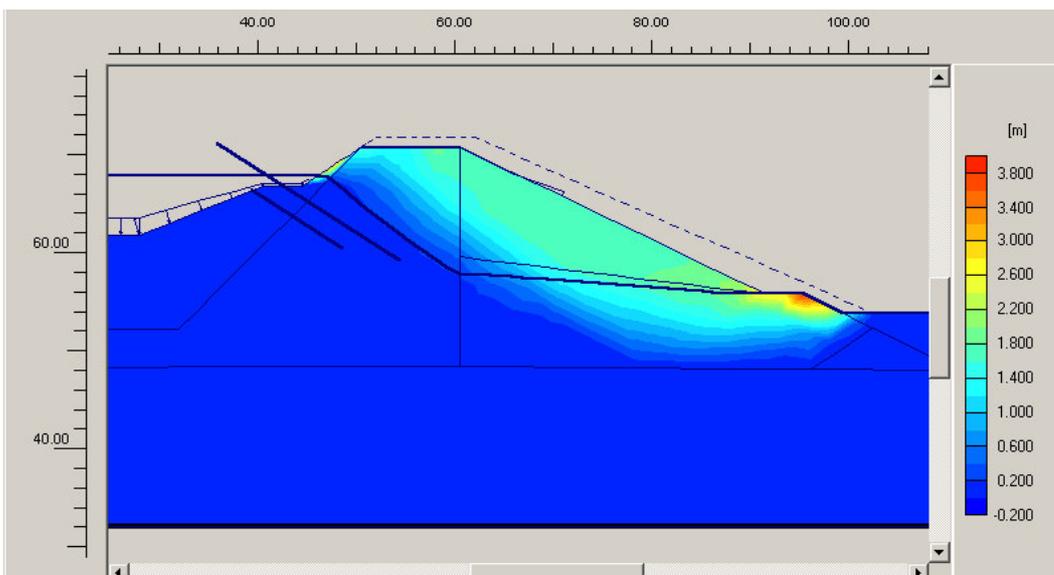


Figura 111 - Superfície de ruptura para elevação do nível do reservatório para cota 69,5m

Alteamento e elevação do nível do reservatório

A Figura 112 mostra o estado de tensão total após o alteamento e a elevação de 1,5m do nível do reservatório. Os resultados indicam um aumento nos níveis de tensão de aproximadamente 4% em relação à condição atual.

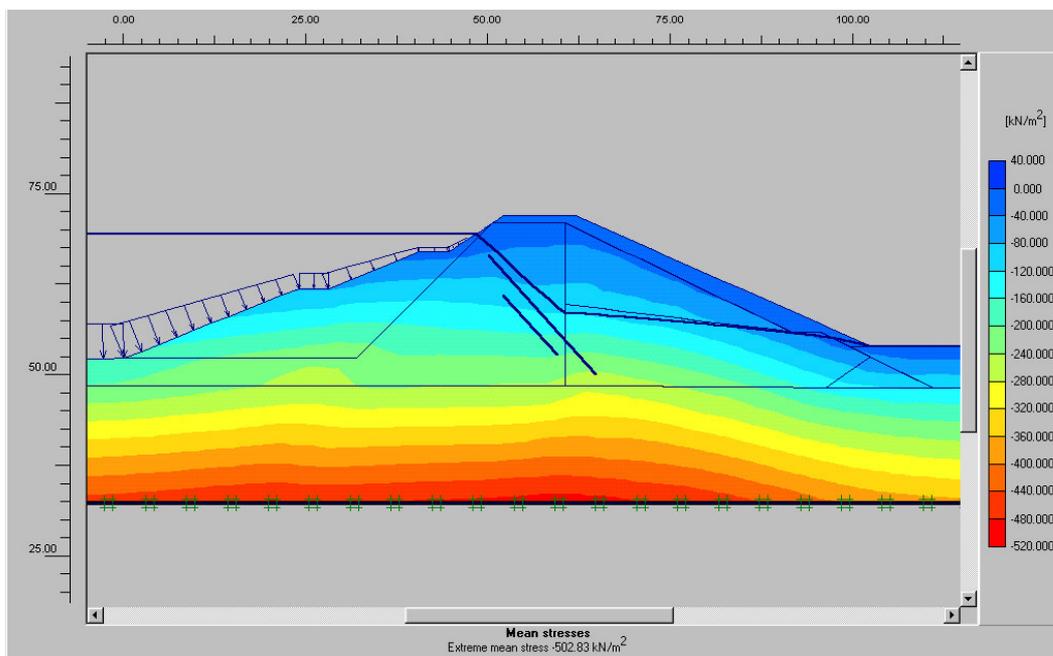


Figura 112 - Estado de tensão total após elevação do nível do reservatório para a cota 69,5m e alteamento da barragem

Os deslocamentos totais para esta condição estão apresentados na Figura 113 e Figura 114. A análise foi executada em 2 estágios de carga. Inicialmente impunha-se o alteamento da crista e em seguida ativava-se o carregamento distribuído correspondente à elevação do nível do reservatório. Nesta análise observou-se uma pequena diferença entre os deslocamentos totais apresentados e a soma dos incrementos dos estágios de carregamento. Os maiores deslocamentos ocorrem no talude de montante com um valor máximo da ordem de 37mm.

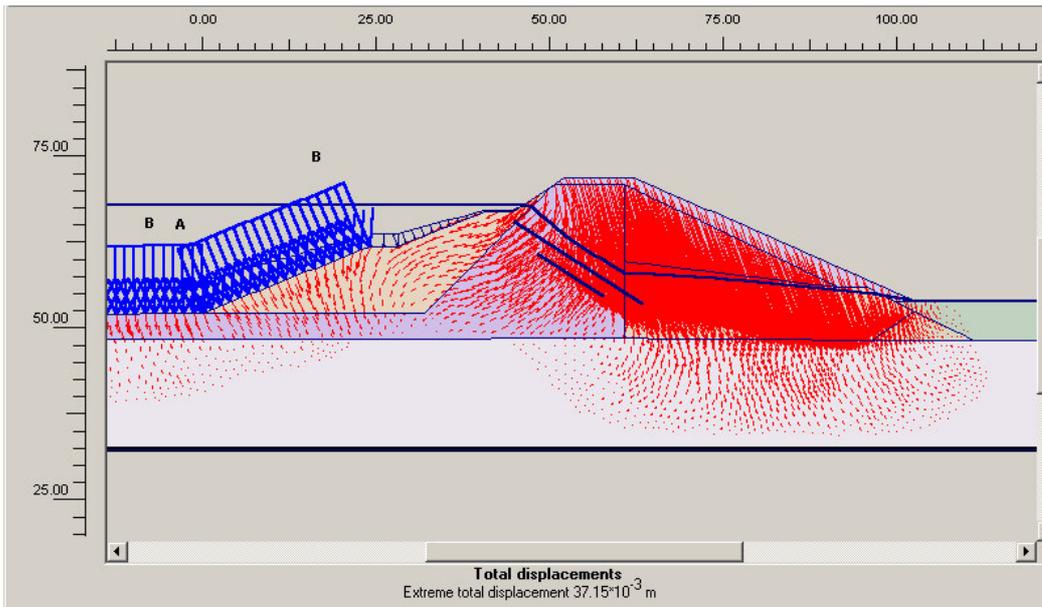


Figura 113 - Deslocamentos totais com alteamento e elevação do reservatório para 69,5m

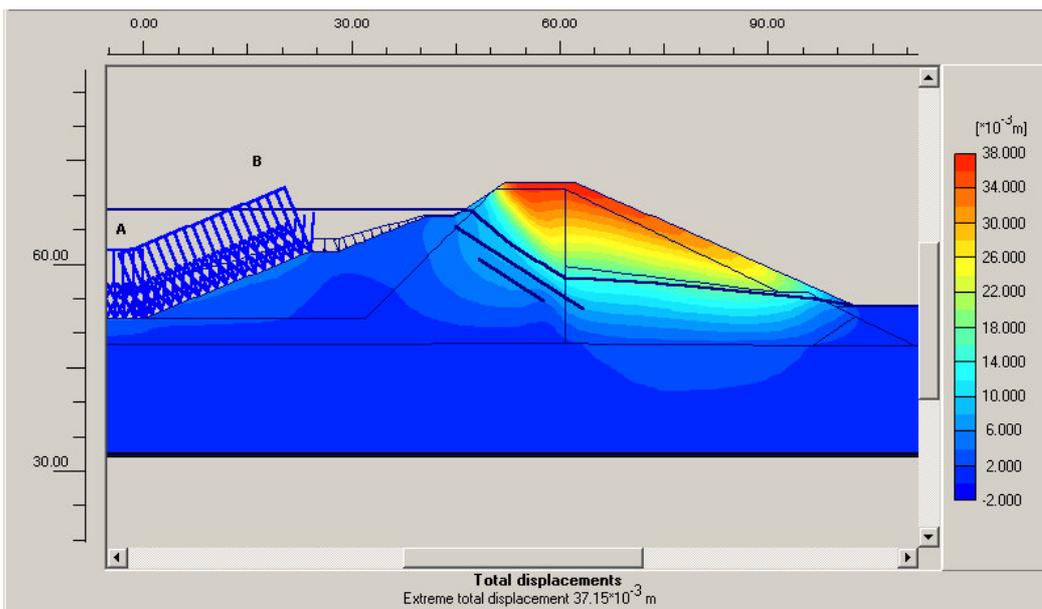


Figura 114 - Deslocamentos totais com reservatório na cota 69,5m e alteamento da barragem

A superfície potencial de ruptura prevista para condição final da barragem está apresentada na Figura 115, a qual está associado um $FS = 1,64$. Verifica-se que com o talude de jusante suavizado não há o desenvolvimento de ruptura localizada na berma, próxima ao pé da barragem. Porém, a possibilidade de ruptura localizada no topo do talude de montante, decorrente da elevação do nível do reservatório, é mais uma vez observada. Neste caso, a colocação de “rip-rap” nesta região seria possivelmente adequada para melhorar as condições de estabilidade.

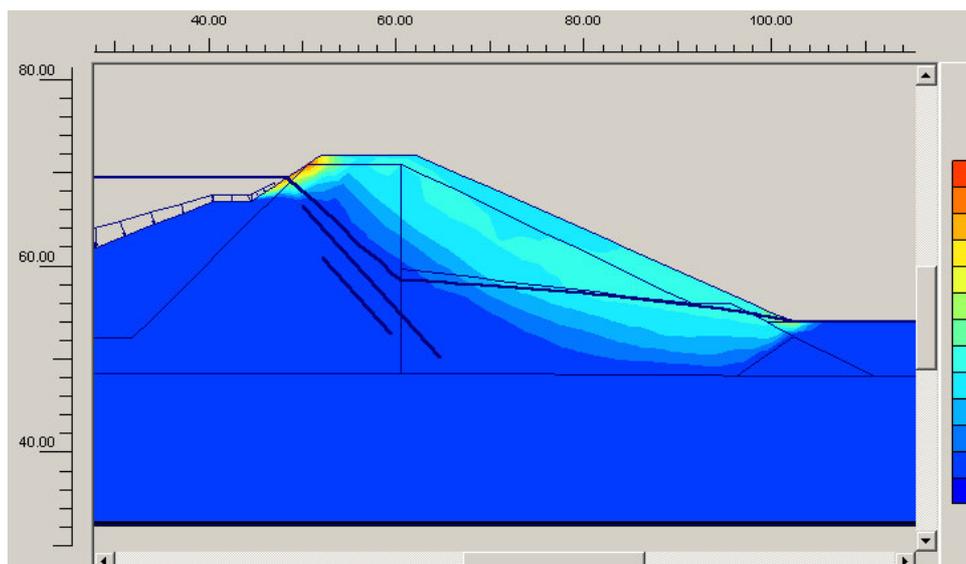


Figura 115 - Superfície de ruptura para alteamento e elevação do nível do reservatório

5.7. Considerações finais

A Tabela 37 apresenta um resumo dos resultados encontrados para as condições atuais de operação e condições futuras de alteamento do nível do reservatório e elevação da crista. Os resultados indicam que a simples elevação de 1,5m do nível atual do reservatório pode ser executada, já que os fatores de segurança permanecem dentro da faixa de segurança considerada normal.

Tabela 37 - FS e deslocamentos da barragem

Condição do reservatório	FS _{Talren}	FS _{Plaxis}	Deslocamento vertical máximo (mm)	Deslocamento horizontal máximo (mm)	Deslocamento total máximo (mm)
Atual (cota 68,0m)	1,54	1,57	-	-	-
Cota 69,5m	1,46	1,54	- 6,3	13,8	13,9
Cota 69,5m + alteamento	1,66	1,64	- 30,3	21,1	35,5

Quanto à ferramenta de análise do comportamento tensão-deformação, verificou-se que o programa Plaxis apresenta uma série de condicionantes:

- i. imprecisão no cálculo das tensões totais e das tensões efetivas, porém, a ordem de grandeza da diferença encontrada não é significativa;
- ii. a opção de geração automática de propressão acarreta em resultados não confiáveis;

- iii. imprecisão na previsão da distribuição de deformações verticais no caso de simulação da construção em estágios. Nestas situações, o programa prevê deslocamentos máximos ocorrendo no topo do aterro. Na realidade, os deslocamentos máximos ocorrem no interior da massa de solo, como resultado dos acréscimos de tensão. Na superfície, o acréscimo de tensão é nulo, portanto, os deslocamentos nesta região deveriam ser também nulos. Apesar da distribuição dos deslocamentos acarretar uma função decrescente com a profundidade, a experiência tem mostrado que as magnitudes previstas podem ser consideradas aceitáveis.