

ANÁLISE DE ESTABILIDADE DE BARRAGEM ZONEADA – ESTUDO DE CASO

Juliano Possamai Della (1), Adailton Antonio dos Santos (2);

UNESC – Universidade do Extremo Sul Catarinense
(1) julianodella@hotmail.com (2) adailtongeo@msn.com

RESUMO

A segurança de uma barragem é um fator de suma importância, pois, expõe vidas e a economia a jusante em risco. Portanto, a sua concepção e procedimentos executivos deverão garantir que seja minimizado este risco. A região carbonífera conta com um sistema de abastecimento de água que possui em sua construção para a captação desse recurso a Barragem do Rio São Bento, na localidade de São Pedro, município de Siderópolis, a mesma é composta por três eixos barráveis, um em concreto compactado a rolo (CCR), e dois com núcleo de argila e espaldares em cascalho. O objetivo principal do estudo é analisar a estabilidade do Dique Principal e avaliar o comportamento de permeabilidade do mesmo. Para tanto, determinou-se o fator de segurança para as seguintes condições de carregamento: término da construção, antes do enchimento do reservatório, percolação permanente com o reservatório na cota máxima normal, esvaziamento rápido do nível, e avaliação do comportamento de permeabilidade do Dique Principal. Os valores de FS_{\min} obtidos para as condições de carregamento, não atenderam os valores estabelecidos pelo CBGB. Para enquadrar os referidos fatores de segurança dentro dos limites estabelecidos pelo CBGB, optou-se pela suavização dos taludes e modificação do material de enrocamento. E quanto à avaliação do comportamento de permeabilidade observou-se a concordância entre a modelagem matemática e o monitoramento *in situ*.

Palavras-Chave: Barragem de Terra e Enrocamento, Instrumentação, Análise de Estabilidade.

1 INTRODUÇÃO

A segurança de uma barragem está intimamente relacionada aos aspectos de projeto, construção, instrumentação/inspeção, operação e manutenção. Na fase de projeto, as barragens necessitam de grande quantidade de investigação geotécnica, e nas fases executiva e operacional, respectivamente, as mesmas devem ser monitoradas através de instrumentação, a qual desempenha um papel fundamental na avaliação do comportamento de sua estrutura. A barragem do Rio São Bento tem como função principal garantir e fornecer o abastecimento de água para consumo humano, industrial e agrícola, atendendo os municípios de Criciúma, Siderópolis,

Forquilha, Içara, Maracajá e Nova Veneza, bem como na contenção de cheias. Possui uma área de inundação no nível máximo normal de 4,5 km² e contribuição a montante, de 113,79 km². A cota máxima de operação se situa a 157,50 metros sendo o volume, para esta cota de 58,5 hectômetros cúbicos de água.

Esta localizada no estado de Santa Catarina, município de Siderópolis, e inserida na bacia hidrográfica do Rio São Bento, sendo definida como uma sub-bacia da bacia hidrográfica do rio Araranguá.

As estruturas do empreendimento se caracterizam por três obras distintas, sendo que a barragem principal é caracterizada como mista, de concreto compactado a rolo, do tipo gravidade no centro, e nas ombreiras de enrocamento com espaldares em cascalho compactado, com núcleo impermeável de argila, e duas barragens do tipo zoneada, com núcleo em argila compactada, e espaldares em cascalho (Figura 1).

Como objetivo buscou-se analisar a estabilidade do dique principal determinado os fatores de segurança para as condições de carregamento e avaliar o comportamento de permeabilidade do mesmo.

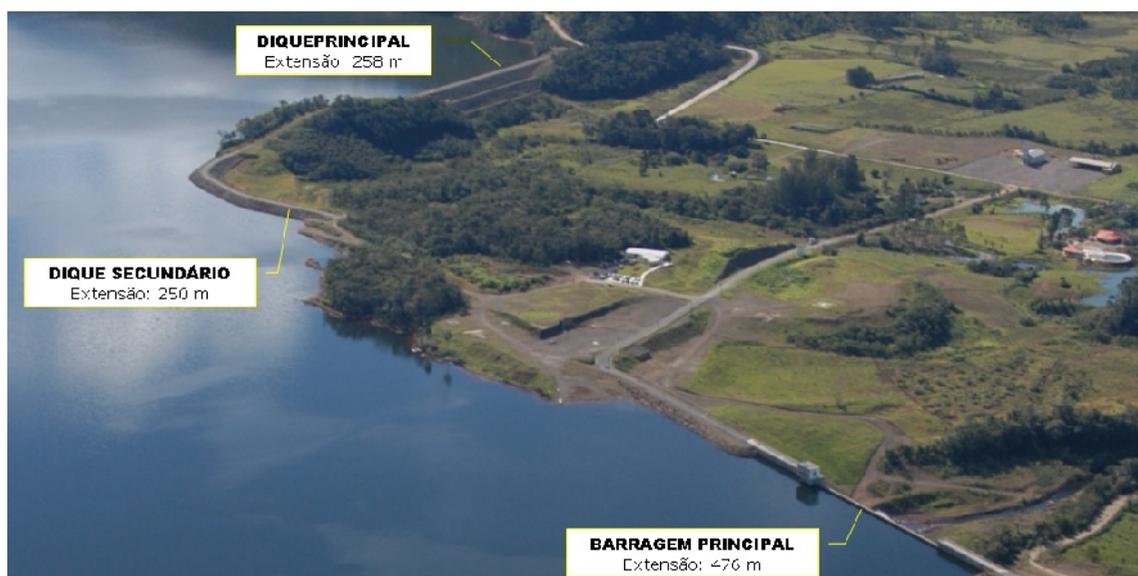


Figura 1 - Identificação dos Barramentos na Barragem do Rio São Bento

1.1 DIQUE PRINCIPAL

A seção objeto de análise pertence ao Dique Principal da Barragem do Rio São Bento (Figura 2), o qual é formado por uma barragem zoneada com espaldares em

cascalho com núcleo impermeável de argila compactada. Esta estrutura encontra-se situada na margem esquerda do Rio Serrinha, implantada sobre um ponto de fuga e possui 258 metros de comprimento de crista, com 6 metros de largura, sendo sua altura máxima sobre a fundação de 25 metros e cota de coroamento 160,00 metros. (CASAN, 2004). Esta localizada sobre solo coluvionar, logo a sua fundação encontra-se apoiada em partes menos espessas sobre rocha, e nas partes mais profundas (ombreiras) houve a necessidade de remoção do material coluvionar e projetou-se trincheiras de vedação, *cut-off*, para assentamento do núcleo argila sobre a rocha diminuindo a infiltração (CASAN, 2004).



Figura 2 - Dique Principal

1.2 GEOLOGIA E GEOMORFOLOGIA

A área onde encontra-se implantada a barragem, objeto de estudo, é constituída por rochas sedimentares em uma zona de topo da formação Serra Alta e base da formação Teresina.

Um resumo do perfil geológico da região partindo do topo se caracteriza por rocha basáltica da formação Serra Geral sobreposta ao arenito da formação Botucatu subsequente nas encostas encontram-se arenitos, siltitos e folhelhos da formação Rio do Rastro seguido por rocha do subgrupo Estrada Nova. (CASAN, 2001).

As rochas ígneas possuem sua representação por basaltos e ocorrência de *sill* de diabásios intrudido em seqüência de rochas gonduânicas. Geralmente pouco alterada a sã.

As características principais sob a visão da geomorfologia da região em estudo são:

- Escarpas íngremes, relativamente jovens;
- Afloramento de *sill* de diabásio nos eixos dos barramentos;
- Deposição de solos aluviais com a predominância de seixos rolados com variados diâmetros;
- Formação de solos residuais e mantos coluviais junto às encostas das elevações, devido à grande declividade e ações intempéricas.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Foram utilizados manuais técnicos, projetos, livros técnicos, catálogos, memoriais das empreiteiras que desenvolveram a execução e que realizaram o projeto e fontes de confiança que validaram as informações realizadas no presente trabalho. Os instrumentos em que foram feitas as coletas dos dados são: Piezômetro Casagrande e Piezômetro Pneumático. As leituras dos mesmos foram realizadas por equipe técnica da CASAN, especialmente treinada e capacitadas para esta finalidade. Estes equipamentos já estão instalados nos locais estabelecidos em projeto e suas informações estão sendo coletadas desde o início do enchimento do reservatório. A frequência de leitura dos instrumentos foi executada de acordo com o manual de operação do reservatório da Barragem do Rio São Bento (semanalmente). Todas as leituras foram documentadas em planilhas de monitoramento e repassadas ao programa de armazenamento dos dados, do qual posteriormente se obteve as informações para o desenvolvimento do artigo. A seção da barragem analisada, assim como a disposição dos materiais, foram retirados do projeto *as built*, o qual apresenta inclinação dos taludes de montante e jusante de 1(V):1,5(H). Os parâmetros geotécnicos dos materiais que constituem a barragem foram obtidos do Projeto Executivo – Volume I – Memorial Descritivo. De posse das informações citadas anteriormente, procedeu-se a realização da análise de estabilidade, para determinação dos fatores de segurança em diferentes condições de solicitação do reservatório. Os referidos fatores de segurança embasaram a avaliação dos riscos, que estarão sujeitos a população à jusante, e o próprio sistema de abastecimento de água, caso ocorra à ruptura do Dique Principal.

Para análise de estabilidade do talude, utilizou-se do *software Slide 5.0* do grupo *Rocscience*, fornecido pela empresa GN Consult Ltda, utilizando o método do Bishop Simplificado.

2.1 PARÂMETROS GEOTÉCNICOS

A Tabela 1 apresenta os parâmetros geotécnicos dos materiais que constituem o Dique Principal (Figura 3), dos quais foram retirados do Projeto Executivo – Volume I – Memorial Descritivo.

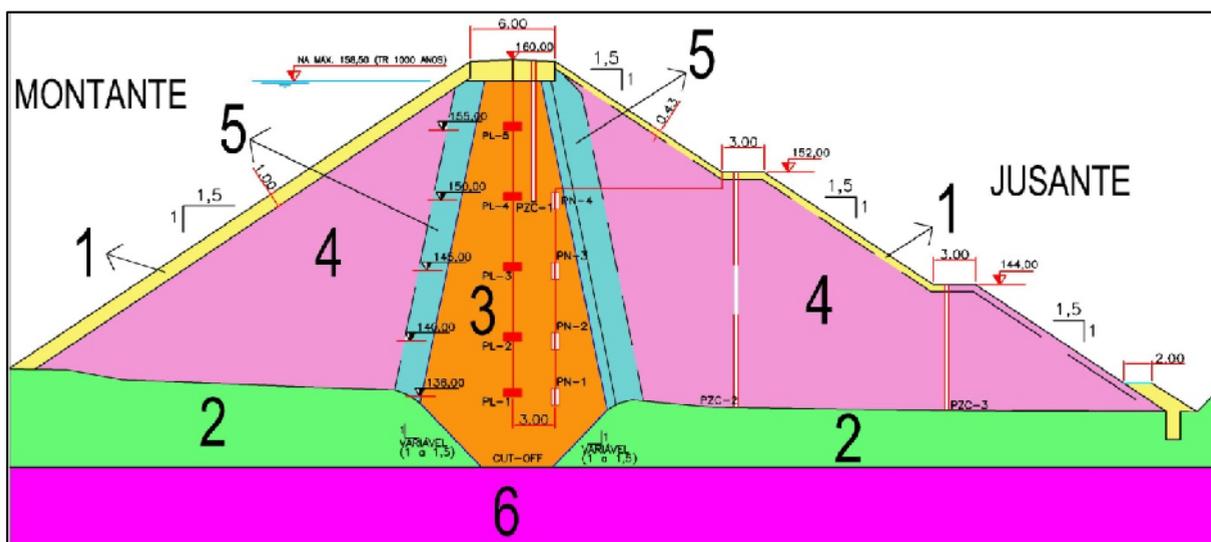


Figura 3 - Materiais que Constituem a Seção

Tabela 1 - Propriedades Geotécnicas dos Materiais - Final da Construção

Nº	MATERIAL	Peso Específico Natural (kN/m ³)	Peso Específico Submerso (kN/m ³)	Ângulo de Atrito (graus)	Coesão (kPa)	B
1	Cascalho (Fundação)	20	10	36	0	--
2	Solo de Alteração	17	11	23	25	--
3	Argila Compactada	18	11	31	10	0,15
4	Cascalho Compactado	21	11	41	0	--
5	Transições Montante e Jusante	19	9	38	0	--
6	Rocha (fundação)	23	23	45	1000	--

Fonte: Casan, 2001, p.45

2.2 PERMEABILIDADE

A Tabela 2 apresenta os coeficientes de permeabilidade dos materiais que constituem o Dique Principal (Figura 3).

Tabela 2 - Coeficiente de Permeabilidade dos Materiais do Perfil

Material	Coeficiente de Permeabilidade (cm/s)
Argila Compactada	1×10^{-7}
Cascalho Compactado	1×10^{-3}
Alteração de rocha	5×10^{-2}
Rocha de Fundação	$6,5 \times 10^{-5}$

Fonte: Casan

2.3 COEFICIENTES DE SEGURANÇA ESTABELECIDOS

Para avaliação dos riscos, que estarão sujeitas a população à jusante e o próprio sistema de abastecimento de água, caso ocorra à ruptura do Dique Principal, foram determinados os fatores de segurança nas condições de solicitação especificadas pelo CBGB (1999), cujos valores deverão atender os mínimos estabelecidos pelo referido comitê (Tabela 3).

Tabela 3 - Coeficientes de Segurança, Avaliação Estática

Condições de Carregamento	Coeficiente Mínimo de Segurança	Talude
Percolação permanente com o reservatório na cota máxima normal	1,5	Jusante
Esvaziamento rápido	De 1,2 a 1,3	Montante
Término da construção, antes do enchimento do reservatório	De 1,25 a 1,3	Jusante e Montante

Fonte: CBGB, 1999, p. 55

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 ANÁLISES DAS CONDIÇÕES DE CARREGAMENTO

De posse da geometria (Figura 3) e dos parâmetros geotécnicos (Tabela 1) dos materiais que constituem a seção de análise do Dique Principal, determinou-se os fatores de segurança mínimos (FS_{\min}), pelo Método de Bishop Simplificado (1955), para as condições de solicitação a seguir.

3.1.1 Término da Construção, Antes do Enchimento do Reservatório

As Figura 4 e Figura 5 apresentam as superfícies de ruptura com FS_{\min} , obtidas nos taludes de montante e jusante respectivamente.

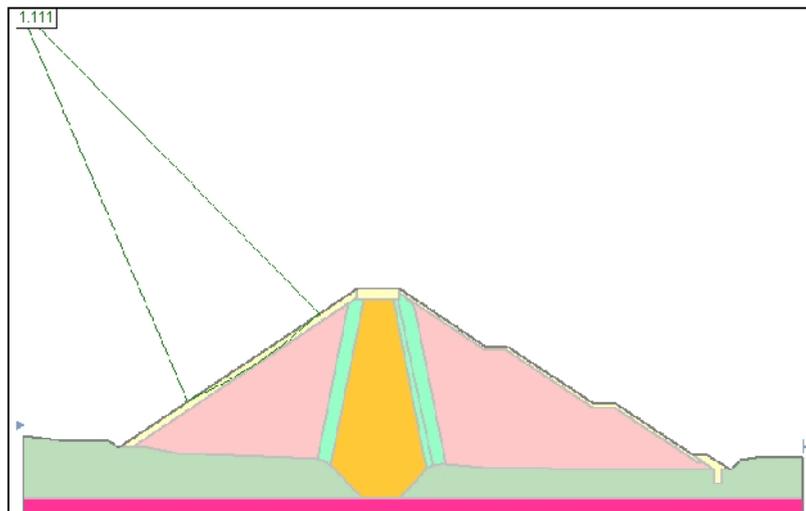


Figura 4 – Talude de montante: FS_{\min} de 1,111

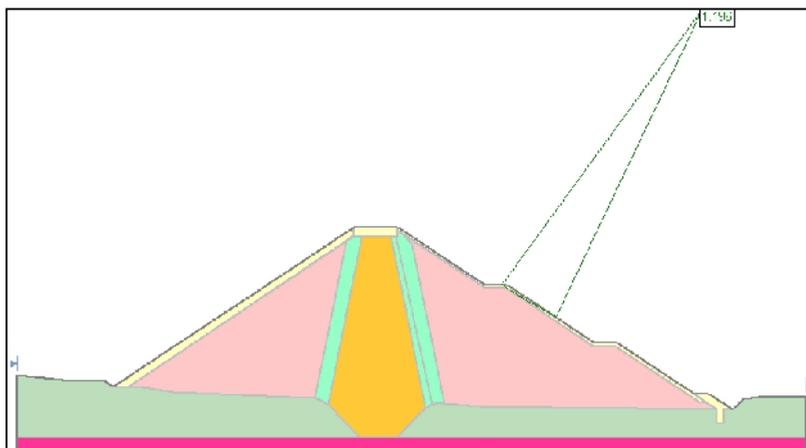


Figura 5 – Talude de jusante: FS_{\min} de 1,196

Os valores de FS_{\min} são menores que os valores de FS_{\min} especificados pelo CBGB. Observa-se que as superfícies de ruptura são superficiais, no entanto, temos que trabalhar com valores que atendam aos citados anteriormente. Logo, uma das opções analisadas para deixar os fatores de segurança dos taludes de montante e de jusante, dentro das faixas especificadas pelo CBGB, foi à suavização da inclinação dos referidos taludes, cujos resultados da análise de estabilidade estão apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 - Fator de Segurança Conforme Inclinação - Término da Construção

Inclinação Talude (Graus)	Fator de Segurança	
	Montante	Jusante
34	1,111	1,196
33	1,147	1,161
32	1,183	1,196
31	1,221	1,223
30	1,293	1,271

As Figura 6 e Figura 7 apresentam às superfícies de ruptura com FS_{\min} , obtidas nos taludes de montante e jusante respectivamente.

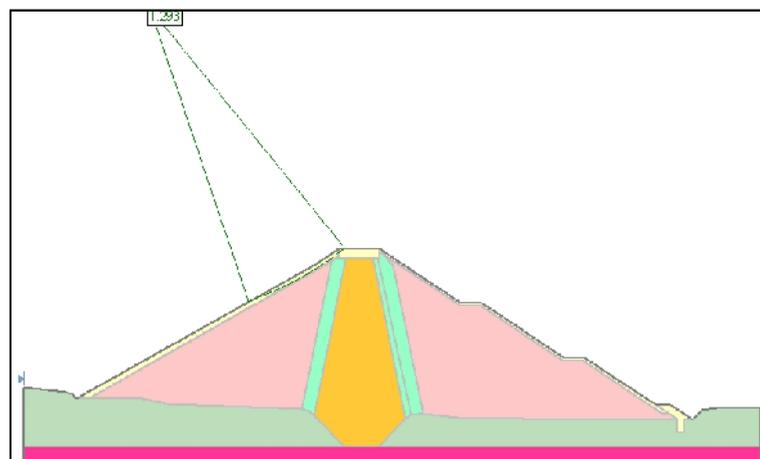


Figura 6 – Talude de montante: FS_{\min} de 1,293

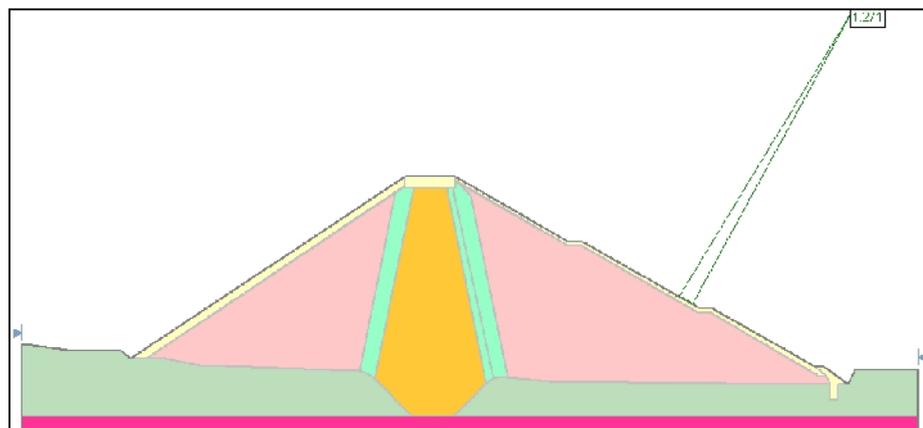


Figura 7 – Talude de jusante: FS_{\min} de 1,271

Com base na análise desenvolvida observou-se que ocorreram rupturas superficiais devido à falta de coesão do material que compõe a face externa do talude.

3.1.2 Percolação Permanente, Reservatório na Cota Máxima Normal

O reservatório em sua cota máxima normal de operação possui volume de 58,5 hectômetros cúbicos estabelecendo-se na cota 157,50 metros.

A Figura 8 apresenta a superfície de ruptura onde o FS_{\min} é de 1,110 obtida no talude de jusante.

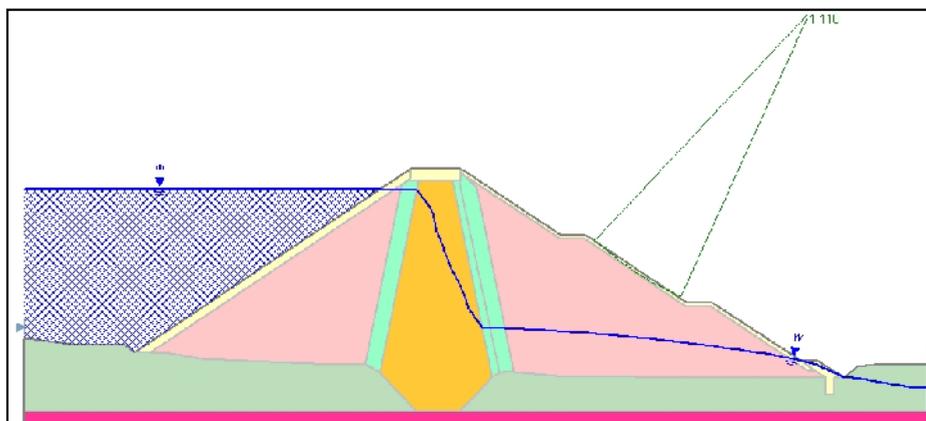


Figura 8 - FS_{\min} de 1,110

Diante do valor do FS_{\min} apresentado, conclui-se que se encontram valores inferiores aos estabelecidos pelo CBGB, sendo o mesmo acima de 1,50 para a situação de percolação permanente com o reservatório na cota máxima normal.

Os valores de FS_{\min} que são inferiores ao estabelecido não produzem rompimento do talude, fato de extrema importância, pois todos os FS_{\min} possuem valores superiores a 1,00.

A solução inicialmente adotada, para que o FS_{\min} do talude se enquadrasse dentro dos parâmetros geotécnicos estabelecidos pelo CBGB, foi a redução da inclinação do mesmo. Solução que isoladamente, não se mostrou eficiente, até a redução da inclinação para 30° (redução máxima), uma vez que, o FS_{\min} obtido para esta condição foi inferior ao estabelecido pelo CBGB. A Tabela 5 apresenta os FS_{\min} obtidos para redução da inclinação do talude até o limite máximo de 30° .

Tabela 5 - Fator de Segurança Conforme Inclinação - Percolação Permanente

Inclinação Talude (Graus)	Fator de Segurança
	Característica do Solo Atual
34	1,110
33	1,128
32	1,200
31	1,223
30	1,293

Partiu-se então para substituição do material a jusante do talude, isto é, substituiu-se o cascalho por cascalho compactado. Solução que associada à redução da inclinação do talude para 30°, se mostrou eficiente, uma vez que, o FS_{\min} (1,521) obtido para esta condição de análise foi superior ao estabelecido pelo CBGB. A Tabela 6 apresenta um resumo dos resultados alcançados na referida análise.

Tabela 6 – Fator de Segurança Conforme Inclinação – Solo Modificado

Inclinação Talude (Graus)	Fator de Segurança
	Característica do Solo Modificado
34	1,318
33	1,349
32	1,428
31	1,458
30	1,521

Figura 9 apresenta a superfície de ruptura com FS_{\min} de 1,521.

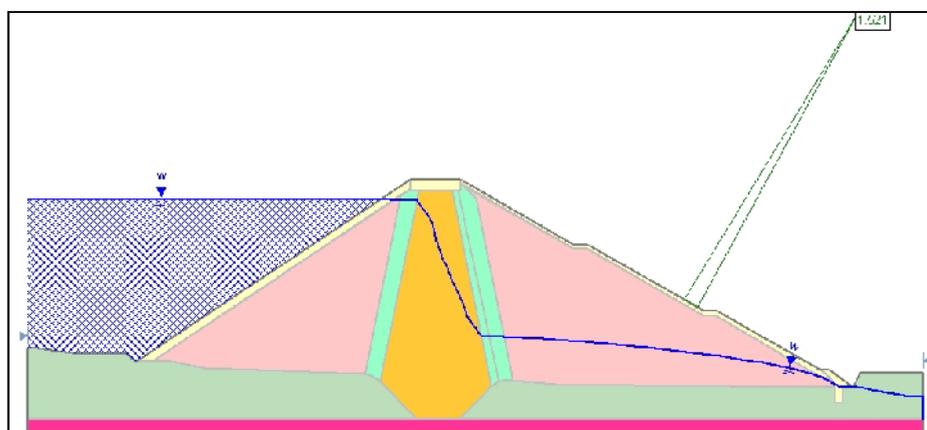


Figura 9 - FS_{\min} de 1,521

3.1.3 Esvaziamento Rápido

O rebaixamento rápido acontecerá quando ocorrer uma variação decrescente da cota 157,5 metros para 139,5 metros, o que corresponde a uma redução de volume 51,8 hectômetros cúbicos.

Para que ocorresse o evento de esvaziamento rápido do Reservatório do Rio São Bento seria necessária a abertura máxima dos dispositivos controladores de descarga por um período de 22 dias, considerando o nível do mesmo na cota 157,5 metros, o que geraria uma vazão máxima de esvaziamento de 28,1983 m³/s. A

Figura 10 ilustra a superfície de ruptura correspondente ao $FS_{\min} = 0,000$ calculado para esta condição de análise.

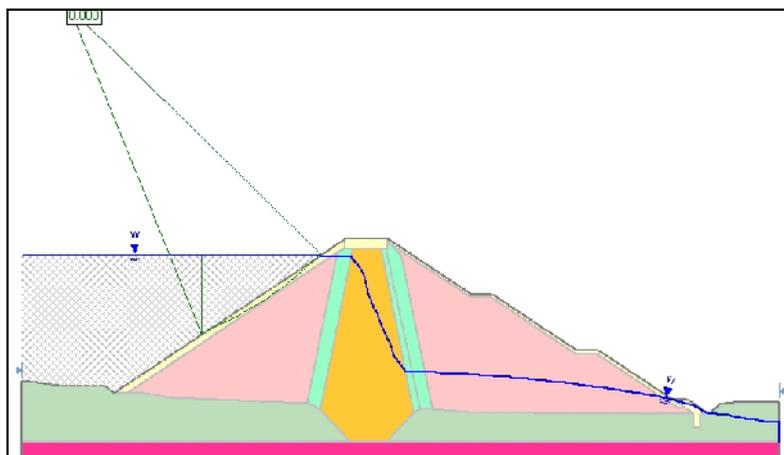


Figura 10 - FS_{\min} de 0,000

O FS_{\min} (0,000) obtido não condiz com a situação real do talude, uma vez que, o rebaixamento do NA, na camada de cascalho compactado ocorrerá simultaneamente ao rebaixamento do NA do reservatório. Isto se justifica pelo fato da camada de cascalho compactado possuir coeficiente de permeabilidade alto ($k = 1 \times 10^{-3}$ cm/s). Logo, conclui-se que o software adotado na análise, não levou em consideração as características de permeabilidade dos materiais que constituem o Dique Principal.

No entanto, em função do núcleo de argila compactada ($k = 1 \times 10^{-7}$ cm/s), foi feita uma análise, com o intuito de verificar a influência da mesma no fator de segurança, uma vez que a camada drenante rebaixaria simultaneamente ao nível do reservatório, mas o núcleo argiloso manteria o nível do lençol freático elevado. Portanto foram realizadas análises com o nível do reservatório na cota 157,5 metros, 150,5 metros e 140,5 metros conforme apresentado nas Figura 11, Figura 12 e Figura 13 respectivamente.

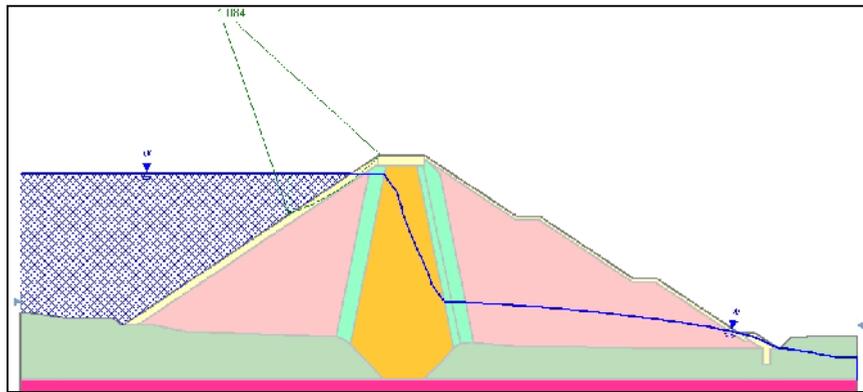


Figura 11 - FS_{\min} de 1,084

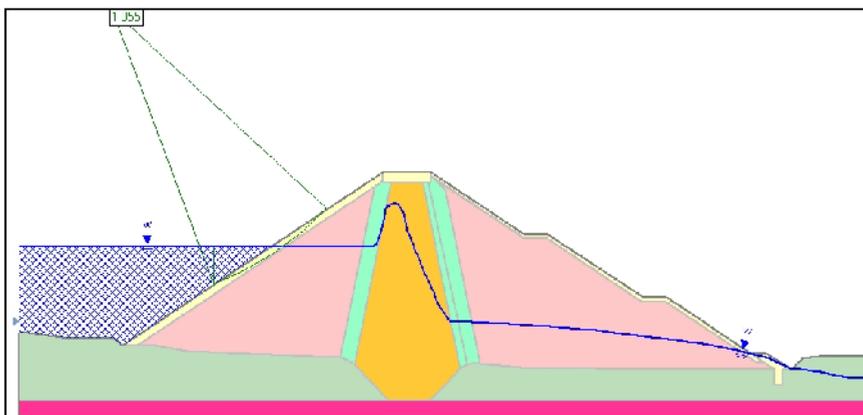


Figura 12 - FS_{\min} de 1,055

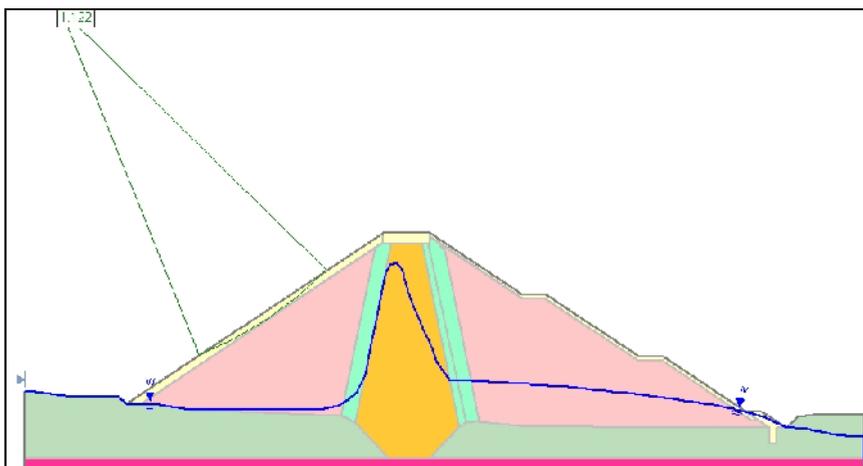


Figura 13 - FS_{\min} de 1,122

Os valores dos FS_{\min} estão expressos na Tabela 7 demonstrada para diferentes níveis de cotas.

Tabela 7 - Relação Nível Reservatório x Fator de Segurança

Nível do Reservatório (metros)	Fator de Segurança
157,5	1,084
150,5	1,055
140,5	1,122

O mesmo possui valor do FS_{\min} inferior a 1,20 conforme a CBGB.

Conforme Tabela 8 consegue-se visualizar os FS_{\min} conforme a inclinação e o nível do reservatório.

Tabela 8 - Fator de Segurança x Inclinação

Inclinação do Talude (Graus)	Fator de segurança		
	Cota 157,5 m	Cota 150,5 m	Cota 140,5 m
34	1,072	1,055	1,120
33	1,118	1,089	1,155
32	1,162	1,132	1,186
31	1,208	1,217	1,208

A simulação realizada demonstra na cota de 140,5 metros que diminuindo a inclinação do talude a montante de 34 graus para 31 graus de inclinação o mesmo se encontrará nas condições aceitáveis da norma, conforme Figura 14.

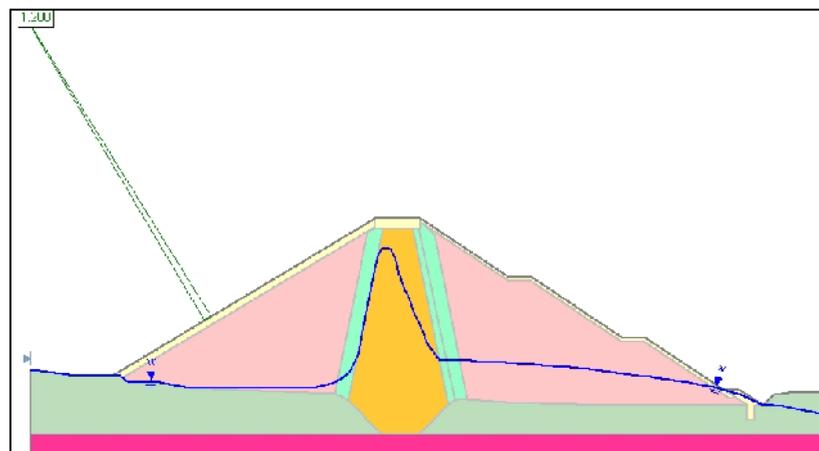


Figura 14 – FS_{\min} de 1,208

3.2 Avaliação do Comportamento de Permeabilidade do Dique Principal

De posse da geometria (Figura 3) e dos coeficientes de permeabilidade (Tabela 2), determinou-se computacionalmente o nível freático, para dar suporte a pesquisa, como demonstrado a seguir. O nível freático *in loco* foi determinado a partir das leituras dos piezômetros PZC-1, PZC-2 e PZC-3, obtidas no período compreendido de 15 de dezembro de 2004 a 31 de dezembro de 2010 e estão demonstrados sobrepostos na Figura 15.

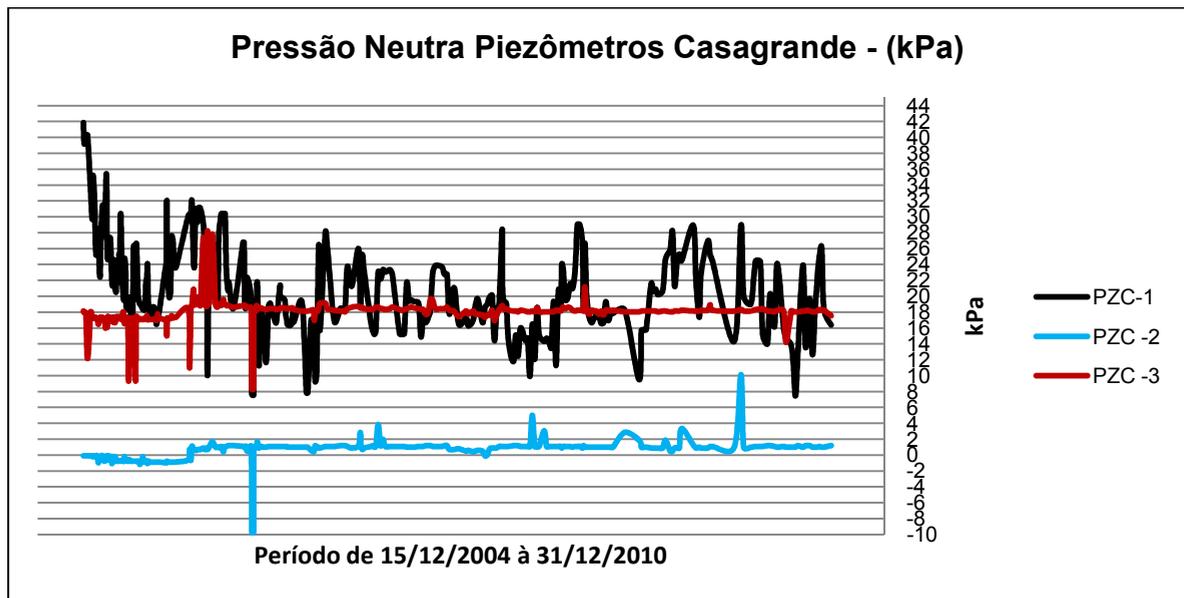


Figura 15 - Leituras dos Piezômetros

Quando compara-se o nível piezométrico estabelecido computacionalmente com o nível piezométrico estabelecido pelos instrumentos na cota 157,50 metros, observa-se uma grande semelhança no desenvolvimento da linha do lençol freático nas duas situações, demonstrando coerência entre os valores analisados como visualizado na Figura 16.

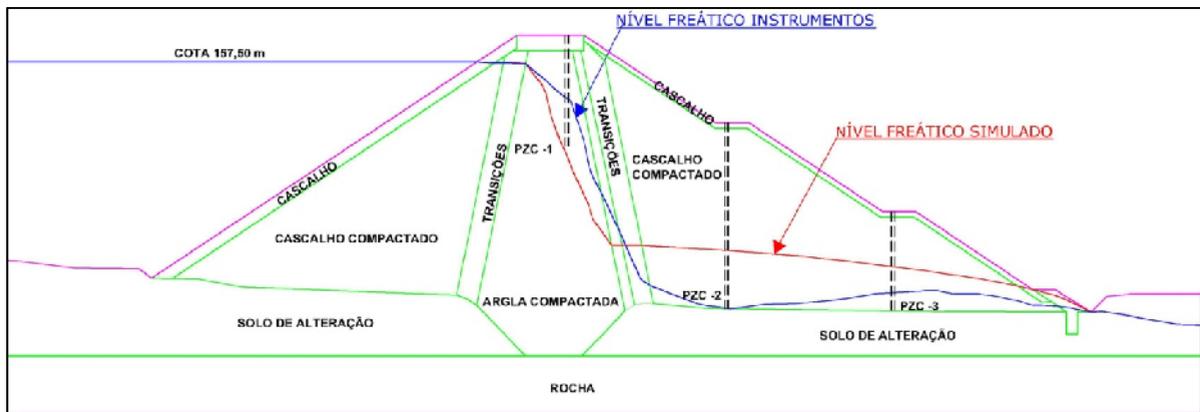


Figura 16 – Níveis Freáticos - Cota 157,50m

Também quando compara-se o nível piezométrico estabelecido computacionalmente na cota 153,85 metros (nível mínimo de operação), com o nível piezométrico estabelecido pelos instrumentos, observa-se uma grande semelhança no desenvolvimento na linha do lençol freático nas duas situações, demonstrando

coerência nos valores encontrados computacionalmente como visualizado na Figura 17.

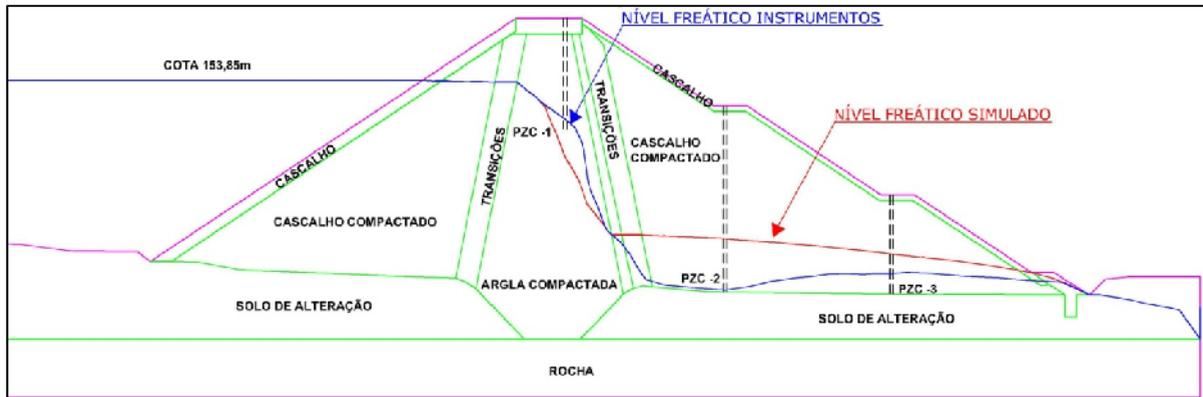


Figura 17 - Níveis Freáticos - Cota 153,85m

As avaliações comparativas realizadas acima demonstram o comportamento anormal do PZC-2, quando se compara as leituras piezométricas do mesmo (constante) com as do PZC-3 (variável). O comportamento esperado era que o nível freático no PZC-2 (montante) ficasse acima, ou no máximo próximo ao nível freático do PZC-3 (jusante), já que os mesmos encontram-se inseridos no mesmo tipo de material. Com base nesta constatação realizou-se o ajuste do nível freático do instrumento PZC-2 tomando-se como referência o PZC-3 conforme Figura 18.



Figura 18 – Ajuste do Nível Freático Instrumentado – Cota 157,50m

A análise da Figura 18 demonstra a semelhança de comportamento do nível freático determinado a partir das leituras dos instrumentos, com o nível freático determinado computacionalmente, isso significa que o comportamento de permeabilidade

determinado *in situ* esta condizente com o comportamento de permeabilidade determinado computacionalmente.

4 CONCLUSÕES

Os valores de FS_{\min} obtidos para condição de projeto, apesar de não estarem atendendo os valores estabelecidos pelo CBGB, foram considerados aceitáveis, não implicando, em prejuízos materiais e perdas de vidas humanas a jusante do barramento. Esta afirmação se deve ao fato dos FS_{\min} obtidos, se referirem a superfícies de rupturas, que encontram-se limitadas a camada do *rip-rap*. No entanto, por se tratar de uma obra cujo projeto é regido pelas especificações do CBGB, conclui-se que estas especificações têm que ser atendidas na íntegra. Cabe ressaltar que os valores de FS_{\min} encontram-se muito próximo de 1,00, dependendo apenas de um fator externo para reduzir este valor, como por exemplo, a ocorrência a montante de ondas provocadas por ventos, fato este que provocaria a ruptura da camada de *rip-rap*.

A solução apresentada no trabalho para deixar os FS_{\min} calculados dentro dos limites estabelecidos pelo CBGB, para as condições de análise preconizadas pelo mesmo, foi a substituição do material do *rip-rap*, por cascalho compactado, associada a redução dos taludes de montante e de jusante do Dique principal para 30°.

Constatou-se que a determinação do FS_{\min} , para condição de rebaixamento rápido, através do *software* computacional, no caso de taludes constituídos por materiais que possuem permeabilidade elevada ($k \geq 1 \times 10^{-3}$ cm/s), como no presente caso, não condiz com a realidade. Isto se justifica pelo fato adotado na análise de não levar em consideração as características de permeabilidade dos materiais que constituem o Dique Principal. Este fato serve de alerta para quem usa softwares computacionais, sem um conhecimento aprofundado das teorias de cálculo inseridas nos mesmos.

Também foram encontrados alguns valores discrepantes em relação às leituras das instrumentações, podendo ser erros de leituras, tanto em coleta em campo quanto na digitação.

Constatou-se o comportamento anormal do PZC-2, quando se compara as leituras piezométricas do mesmo (constante) com as do PZC-3 (variável). O comportamento

esperado era que o nível freático no PZC-2 (montante) ficasse acima, ou no máximo próximo ao nível freático do PZC-3 (jusante), já que os mesmos encontram-se inseridos no mesmo tipo de material. Só que ocorreu o inverso. Este fato pode ser justificado por um bloqueio na ponta do PZC-2 impossibilitando a entrada de água no tubo, pois a leitura deveria apresentar alguma elevação de pressão no ponto estudado, o que não ocorreu.

5 REFERÊNCIAS

CASAN - COMPANHIA CATARINENSE DE ÁGUAS E SANEAMENTO (MAGNA). **Projeto Básico da Barragem do Rio São Bento**. Siderópolis, SC, 1999. 122 p. Vol. I.

_____. COMPANHIA CATARINENSE DE ÁGUAS E SANEAMENTO (MAGNA). **Projeto Executivo – Volume I – Memorial Descritivo**. Santa Catarina, 2001. Relatório Técnico.

_____. COMPANHIA CATARINENSE DE ÁGUAS E SANEAMENTO. **Programa de gerenciamento de risco da barragem São Bento**. Santa Catarina, 2004. Relatório Técnico.

CBGB - Comitê Brasileiro de Grandes Barragens – Guia Básico de Segurança de Barragens. **Comissão Regional de Segurança de Barragens**. Núcleo Regional de São Paulo, 1999. 77p.