



UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALFENAS

Campus Poços de Caldas

LUIS OTÁVIO SIMÕES BRANQUINHO

**ANÁLISE DE ESTABILIDADE DE BARRAGEM DE REJEITOS
EM PLANTA INDUSTRIAL DE POÇOS DE CALDAS - MG**

Poços de Caldas

2014

LUIS OTÁVIO SIMÕES BRANQUINHO

**ANÁLISE DE ESTABILIDADE DE BARRAGEM DE REJEITOS
EM PLANTA INDUSTRIAL DE POÇOS DE CALDAS - MG**

Trabalho apresentado à disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso II (ICT 218), do curso de Engenharia de Minas, na Universidade Federal de Alfenas, como requisito parcial para obtenção do grau de bacharel em Engenharia de Minas.
Orientador: Ms. Ériclis Pimenta Freire

B821a Branquinho, Luis Otávio Simões..
Análise de estabilidade de barragem de rejeitos em planta industrial de
Poços de Caldas - MG ./Luis Otávio Simões Branquinho;

Orientação de Ms. Ériclis Pimenta Freire. Poços de Caldas: 2014.
30 fls.: il.; 30 cm.
Inclui bibliografias: f. 30

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de minas) –
Universidade Federal de Alfenas– Campus de Poços de Caldas, MG.

1. Talude. 2. Barragem e rejeito. 3. Mineração. I. Freire, Ériclis Pimenta
(orient.). II. Universidade Federal de Alfenas - Unifal.
III. Título.

CDD 624.15

LUIS OTÁVIO SIMÕES BRANQUINHO

**ANÁLISE DE ESTABILIDADE DE BARRAGEM DE REJEITOS
EM PLANTA INDUSTRIAL DE POÇOS DE CALDAS - MG**

A Banca examinadora abaixo-assinada, aprova o Trabalho apresentado à disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso II (ICT 218), do curso de Engenharia de Minas, na Universidade Federal de Alfenas, como requisito parcial para obtenção do grau de bacharel em Engenharia de Minas.

Aprovada em:

Profº.

Instituição:

Assinatura:

Profº.

Instituição:

Assinatura:

Profº.

Instituição:

Assinatura:

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente o professor Ériclis Pimenta Freire pela orientação, colaboração, empenho e dedicação para com a elaboração deste trabalho. Ressalto ainda sua paciência, larga experiência e conhecimento com o assunto. Sem sua ajuda este trabalho não seria possível.

A empresa de consultoria Mégara Projetos e Consultoria Ltda. pela disponibilidade das informações relativas à barragem e disposição para esclarecer dúvidas e dados deste trabalho.

Agradeço ao núcleo de engenharia de minas da Universidade Federal de Alfenas – campus Poços de Caldas pelas orientações e esclarecimentos relativos à diversos assuntos ao longo da realização deste trabalho.

Por fim, agradeço minha família e amigos pelo apoio e incentivo durante o curso e realização deste trabalho, que foram fundamentais para vencer esta etapa da minha vida.

RESUMO

Atualmente as mineradoras que realizam o beneficiamento dos minérios explorados, muitas vezes acabam gerando resíduos que não possuem um meio viável de tratamento. Com isto há a necessidade da construção de barragens de rejeitos para a contenção destes materiais. Portanto é de fundamental importância que as barragens de rejeitos sejam operadas de maneira correta e segura. O presente estudo visa avaliar e discutir a situação de estabilidade de barragem de rejeitos em uma empresa situada no município de Poços de Caldas – Minas Gerais. Primeiramente foram levantados os dados relativos às características da barragem de rejeitos, através de laudos técnicos das empresas de vistorias de anos anteriores e ainda com visitas ao campo. Em seguida calculou-se os fatores de segurança e por fim realizou-se uma análise dos resultados obtidos. Todos os dados levantados foram tratados de acordo com as normas ambientais vigentes. Os resultados obtidos indicam condição estável (FS de 1,394), porém com recomendações de obra para elevar o “fator de segurança”.

Palavras-chave: Estabilidade de talude; Barragem de Rejeito; Mineração

ABSTRACT

Nowadays, currently mining companies who perform the processing of ores exploited, often end up generating waste that does not have a viable means of treatment. With this, it is necessary to construct tailings dams to contain these materials. Therefore it is of fundamental importance a tailing dam be operated correctly and safely. The present study aims to evaluate and discuss the situation and stability of a tailings dam of a company located in the city of Poços de Caldas - Minas Gerais. Primarily searched the data relating to the characteristics of the tailings dam, through technical reports of companies of previous years and even with field visits. Then calculated the safety factors and, finally, an analysis was made of the results obtained. All data gathered were treated in accordance with current environmental rules. The results indicate a stable condition (FS 1.394), but with recommendations of a work to raise the "safety factor".

Keywords: Slope Stability; Tailings dam; Mining

Sumário

| | |
|--|-----------|
| 1. INTRODUÇÃO | 8 |
| 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 9 |
| 2.1. LEGISLAÇÃO AMBIENTAL | 9 |
| 2.1.1. Licenciamento Ambiental | 9 |
| 2.1.2. Política Nacional de Segurança de Barragens | 11 |
| 2.1.3. Revisão Periódica de Segurança da Barragem | 12 |
| 2.1.4. Inspeções Regulares | 12 |
| 2.2. ESTABILIDADE DE BARRAGEM DE REJEITOS | 13 |
| 2.2.1. Generalidades | 13 |
| 2.2.2. Métodos de Análise de Estabilidade | 16 |
| 3. ANÁLISE DE ESTABILIDADE | 21 |
| 3.1. METODOLOGIA DOS TRABALHOS | 21 |
| 3.2. LEVANTAMENTO DE DADOS | 21 |
| 3.3. CÁLCULOS DO FATOR DE SEGURANÇA | 25 |
| 4. CONCLUSÕES | 29 |
| REFERÊNCIAS | 30 |

1. INTRODUÇÃO

No Brasil, a atividade minerária possui um papel muito importante, tanto no que diz respeito a economia, quanto no desenvolvimento e manutenção do modo de vida do ser humano moderno. Porém, a gestão e tratamento completo de todos os resíduos gerados pela mineração é um desafio. Atualmente quando não existe forma de tratamento de determinados resíduos, estes geralmente são depositados em barragens de contenção para futuramente serem reutilizados e/ou recuperados com novas tecnologias. Conseqüentemente as barragens de rejeitos devem ser tecnicamente construídas e monitoradas, pois todo o meio ambiente ao redor será impactado e muitas vezes de forma irreversível, caso haja ruptura da obra. Este trabalho irá analisar a situação de uma barragem de rejeitos do município de Poços de Caldas – MG, seu monitoramento, e sugerir melhorias para o aumento da segurança desta obra.

O trabalho desenvolvido contará inicialmente de uma revisão bibliográfica abordando a legislação vigente atual no que diz respeito à construção, controle e manutenção de barragens de rejeitos e posteriormente abordará a teoria que engloba a estabilidade de taludes e seus mecanismos de ruptura. Em seguida será feito uma análise dividida em quatro etapas: Metodologia do trabalho, levantamento de dados, cálculos e análise dos resultados. Por fim, com todos os resultados obtidos será elaborada a conclusão expondo os resultados do trabalho.

Espera-se que a barragem tenha estabilidade e conseqüentemente um fator de segurança dentro dos padrões recomendados. Caso sejam obtidos resultados mais críticos, será recomendado medidas e intervenção de engenharia para melhorar as condições atuais da barragem estudada.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. LEGISLAÇÃO AMBIENTAL

2.1.1. Licenciamento Ambiental

Atualmente, qualquer empreendimento que cause algum impacto ambiental deve se realizar o devido licenciamento ambiental para poder operar corretamente e legalmente. A regulamentação que visa o correto funcionamento do empreendimento/obra depende da magnitude do empreendimento. Ou seja, a regulamentação ambiental dependerá da importância da obra. Para aquelas que abrangem apenas uma cidade ou várias cidades, a regulamentação compete ao órgão ambiental do respectivo estado. Quando se tem uma obra que abrange dois ou mais estados, cabe ao órgão federal que no nosso caso é o IBAMA para regularizar e legalizar a obra.

No que diz respeito a barragens de rejeitos utilizadas na mineração, o primeiro passo após a elaboração do projeto, é iniciar o processo de licenciamento ambiental. No estado de Minas Gerais, o órgão competente é a SEMAD - Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável. Esta determina diversos parâmetros, critérios, entre outros fatores de licenciamento ambiental através de deliberações normativas. Em particular, a Deliberação Normativa COPAM nº 74, de 9 de setembro de 2004 estabelece critérios para classificar o porte poluidor de sua atividade e conseqüentemente se é passível de Autorização Ambiental de Funcionamento ou Licença de Operação. Os empreendimentos e atividades modificadoras de meio ambiente são enquadradas em seis classes (1-6) que conjugam o porte e o potencial poluidor do meio ambiente. Segue abaixo a tabela que correlaciona os dois fatores (Tabela 1): (SEMAD, 2004)

Tabela 1: Determinação da classe do empreendimento a partir do potencial poluidor da atividade e do porte.

| | | Potencial poluidor/degradador geral da atividade | | |
|-------------------------|---|--|---|---|
| | | P | M | G |
| Porte do Empreendimento | P | 1 | 1 | 3 |
| | M | 2 | 3 | 5 |
| | G | 4 | 5 | 6 |

Fonte: SEMAD. Deliberação Normativa COPAM nº 74, de 9 de setembro de 2004.

Barragem de rejeitos para mineração enquadra-se na “Listagem A – Atividades Minerárias; A-05-03-7 Barragem de contenção de rejeitos/resíduos”. Segue abaixo o potencial poluidor/degradador e o porte das barragens (Tabela 2). (SEMAD, 2004)

Tabela 2: Potencial poluidor/degradador e o porte das barragens.

| A-05-03-7 Barragem de contenção de rejeitos/resíduos | | | | | |
|---|--|--|--|---------|--|
| Potencial Poluidor/Degradador: Ar: P/; Água: G; Solo: G; Geral: G | | | | | |
| Porte: | | | | | |
| Categoria Classe I: | | | | Pequeno | |
| Categoria Classe II: | | | | Médio | |
| Categoria Classe III: | | | | Grande | |

Fonte: SEMAD. Deliberação Normativa COPAM nº 74, de 9 de setembro de 2004.

Para a determinação das classes de barragens de rejeitos supracitadas, deve-se consultar a Deliberação Normativa COPAM número 62, de 17 de dezembro de 2002. Esta classifica a barragem de rejeitos de acordo com 5 (cinco) características: Altura do maciço, volume do reservatório, ocupação humana a jusante da barragem, interesse ambiental a jusante da barragem e instalações a jusante da barragem. Segue abaixo a tabela que relaciona estas características (Tabela 3): (SEMAD, 2002)

Tabela 3: Classificação de Barragens.

| Altura do Maciço (H em m) | Volume do Reservatório ($V_r \times 10^6 \text{ m}^3$) | Ocupação Humana a Jusante da Barragem | Interesse Ambiental a Jusante da Barragem | Instalações a Jusante da Barragem |
|---------------------------------|--|---------------------------------------|---|-----------------------------------|
| Pequena (H<15m) V=0 | Pequena ($V_r < 0,5$) V=0 | Inesistente V=0 | Pouco Significativo V=0 | Inexistente V=0 |
| Média (15m<H<30m) V=1 | Médio ($0,5 < V_r < 5,0$) V=1 | Eventual V=2 | Significativo V=1 | Baixa Concentração V=1 |
| Alta (H>30m) V=2 | Grande ($V_r > 5$) V=2 | Grande V=3 | Elevado V=3 | Alta Concentração V=2 |

Fonte: SEMAD. Deliberação Normativa COPAM nº 62, de 17 de dezembro de 2002.

Detalhes específicos sobre os critérios podem ser verificados na Deliberação Normativa COPAM número 62, de 17 de dezembro de 2002.

Na tabela 1, observa-se que barragens de rejeitos enquadram-se nas classificações 3-6, e que, portanto o caminho para o licenciamento ambiental é através do requerimento para Licença Prévia (LP), de Instalação (LI) e de Operação (LO).

2.1.2. Política Nacional de Segurança de Barragens

Atualmente a legislação brasileira estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB) e o Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens (SNISB) através da Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010. Esta lei é aplicada a barragens que se enquadram em pelo menos 1 (um) dos critérios abaixo:

I- Possuir altura do maciço, contada do ponto mais baixo da fundação da crista, maior ou igual a 15m (quinze metros);

II- Capacidade do reservatório maior ou igual a 3.000.000 m³ (três milhões de metros cúbicos);

III – Reservatório que contenha resíduos perigosos conforme normas técnicas aplicáveis e

IV – Categoria de dano potencial associado médio ou alto; (BRASIL, 2010)

A maioria das barragens de rejeitos de mineração se enquadram nas exigências desta Lei e o órgão que as regulariza atualmente é o DNPM (Departamento Nacional de Produção Mineral). Para esta regularização, o DNPM criou através da Portaria Nº416, de 03 de Setembro de 2012 o Cadastro Nacional de Barragens de Mineração. Essa portaria especifica como, com que frequência e o que se deve elaborar para se ter uma barragem atendendo as leis brasileiras.

Inicialmente as barragens de mineração são cadastradas no RAL (Relatório Anual de Lavra) disponível no DNPM junto com os demais dados do empreendimento. Este cadastramento deve ser realizado anualmente. As barragens de mineração são classificadas de acordo com o seu risco e o dano potencial associado (classes A,B,C,D e E), que estão associadas à complexidade da obra (Tabela 4). (BRASIL, 2012)

Tabela 4: Classificação das barragens.

| Categoria de Risco | Dano Potencial Associado | | |
|--------------------|--------------------------|-------|-------|
| | Alto | Médio | Baixo |
| Alto | A | B | C |
| Médio | B | C | D |
| Baixo | C | D | E |

Fonte: BRASIL. Portaria Nº 416, de 03 de setembro de 2012. Cadastro Nacional de Barragens de Mineração.

Publicada no Diário Oficial da União em 05 de setembro de 2012.

A atualização da classificação será efetuada pelo DNPM a cada 5 (cinco) anos, ou em menor período.

2.1.3. Revisão Periódica de Segurança da Barragem

Para a elaboração do Plano de Segurança da Barragem, é necessário um responsável técnico com registro no Conselho Regional de Engenharia, Arquitetura e Agronomia – CREA, com as devidas atribuições para projeto, construção, operação ou manutenção de barragens, compatíveis com o Conselho Federal de Engenharia, Arquitetura e Agronomia – CONFEA.

A revisão periódica de Segurança de Barragem (parte integrante do PSB) tem por objetivo verificar o estado geral de segurança da barragem considerando: o atual estado da arte para critérios de projeto, a atualização dos dados hidrológicos e as alterações das condições a montante e a jusante da barragem. Portanto, este trabalho deve indicar as ações a serem adotadas pelo empreendedor para a manutenção da segurança. (BRASIL, 2012)

2.1.4. Inspeções Regulares

Os empreendedores deverão realizar, quinzenalmente ou em menor período, Inspeções de Segurança Regular de rotina na barragem, preenchendo a Ficha de Inspeção Regular de acordo com o artigo 21 (retificação DOU – 18/12/2012).

Anualmente, deve-se realizar a Inspeção Anual de Segurança Regular de Barragem, elaborando Relatório de Inspeção Regular da Barragem, emitindo a Declaração de Estabilidade da Barragem e preenchendo o Extrato da Inspeção de Segurança Regular da Barragem, observando as seguintes datas:

- I. Até o dia 20 de setembro, Relatório de Inspeção Regular da Barragem e emissão da Declaração de Estabilidade da Barragem;
- II. Até o dia 15 (quinze) ou 30 (trinta) de março do ano subsequente (dependendo do direito minerário do local), preenchimento do Extrato da Inspeção de Segurança Regular da Barragem via sistema RALWEB através da tela de barragens de mineração;

Caso seja constatada na barragem de mineração, durante as vistorias de rotina, alguma anomalia que resulte na pontuação máxima de 10 (dez) pontos, em qualquer coluna do quadro

Anexo IV da Portaria nº 416, de 03 de setembro de 2012, deverá realizar-se Inspeções de Segurança Especiais. (BRASIL, 2012)

2.2. ESTABILIDADE DE BARRAGEM DE REJEITOS

2.2.1. Generalidades

Barragens são estruturas de armazenamento de água ou qualquer outro material de acordo com a sua finalidade. Os tipos básicos de barragens são: (MASSAD, 2003)

- Barragens de concreto gravidade (concreto massa);
- Barragens de concreto estrutural com contrafortes;
- Barragens de concreto em arco de dupla curvatura;
- Barragens de terra-enrocamento;
- Barragens de enrocamento com membrana de concreto;
- Barragens em aterro hidráulico;
- Barragens de terra homogênea;

O presente trabalho refere-se apenas a barragens de terra homogênea, conforme características do caso analisado.

As primeiras barragens de terra brasileiras foram construídas no Nordeste no início do século XX visando o plano de obras de combate à seca e foram projetadas levando-se em consideração apenas os conhecimentos empíricos. Já em 1938, em Curema-Paraíba, contava-se com os novos conhecimentos da Mecânica dos Solos. Somente em 1947 na construção da barragem do Vigário, atual barragem Terzaghi localizada no estado do Rio de Janeiro considerou-se a moderna técnica de projeto e construção de barragens de terra no Brasil. Esta obra foi um marco, pois pela primeira vez, Terzaghi empregou o filtro vertical ou chaminé como elemento de drenagem interna de barragens de terra. Atualmente centenas de barragens de terra e terra-enrocamento estão em operação no país, inclusive de enrocamento com face de concreto, como a barragem de Foz do Areia (PR), com 156 m de altura sendo por sua grande maioria projetadas e construídas por brasileiros. (MASSAD, 2003)

Existem dois tipos de barragens de terra: Barragens homogêneas e barragens zoneadas. As barragens de terra homogêneas são as mais comuns, devido às condições topográficas (por exemplo, vales muito abertos) e da disponibilidade de material terroso no Brasil. Este tipo de barragem tolera fundações mais deformáveis, sendo possível sua construção sobre solos moles. Quanto as barragens zoneadas geralmente possuem um núcleo impermeável, existem duas zonas externas de material granular, mais permeável e mais resistente ao deslizamento. Segue abaixo um esquema geral dos tipos de barragens (Figura 1):

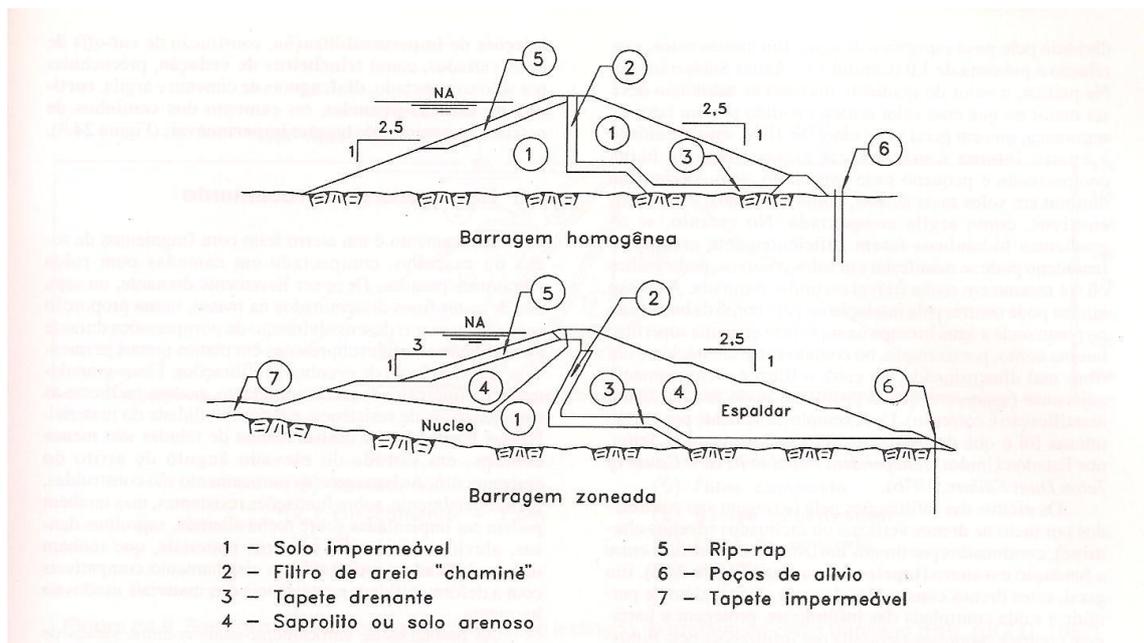


Figura 1: Barragens homogêneas e zoneadas.

Fonte: MASSAD (2003).

A avaliação correta de segurança de uma barragem deve levar em consideração uma análise criteriosa e exata de sua estabilidade, tendo como fundamental os parâmetros de resistência, coesão e ângulo de atrito do solo que foi utilizado para a construção desta. A construção das barragens de terra com seção homogênea e altura entre 10-15m são executadas com taludes de jusante e montante com inclinações 2:1 e 3:1. Levando isto em consideração, raramente a inclinação dos taludes é baseada em parâmetros criteriosos de projeto obtidos tanto para o aterro quanto para sua fundação. (Carvalho, Paschoalin, 2004)

Uma barragem possui diferentes solicitações durante as diversas etapas de sua vida útil (durante e após sua construção e no ato de enchimento total de seu reservatório). Considerando

estes aspectos é importante verificar os fatores de segurança em cada etapa. As situações críticas que devem ser consideradas são: fim da construção, fluxo em regime permanente com o reservatório cheio e esvaziamento rápido do reservatório. Neste trabalho tem-se como situação crítica apenas o segundo item relacionado à percolação de água (fluxo permanente) em que sua pressão é favorável à estabilidade do talude de montante e desfavorável à do talude de jusante. Os outros dois itens não são críticos neste estudo, porque a barragem já foi construída e não existem planos de esvaziamento do reservatório.

Durante a vida útil de uma barragem, diversos mecanismos de acidentes podem ocorrer devidos a elaboração de projeto, execução e manutenção. São estes:

- Galgamento (overtopping);
- Deslizamento de taludes;
- Erosão interna (piping);
- Fissuramento.

O problema que mais preocupa um projetista é o Piping (“Erosão subterrânea Retrogressiva”), quando o gradiente de saída iguala-se ao peso específico do subsolo, e pode ocorrer no próprio corpo da barragem ou nas suas fundações. Este é provocado pela ausência de filtros, condições de compactação do maciço terroso, transição inadequada entre solo e material granular e presença de fundação arenosa. Segue abaixo alguns exemplos que provocam o piping (Figura 2): (MASSAD, 2003)

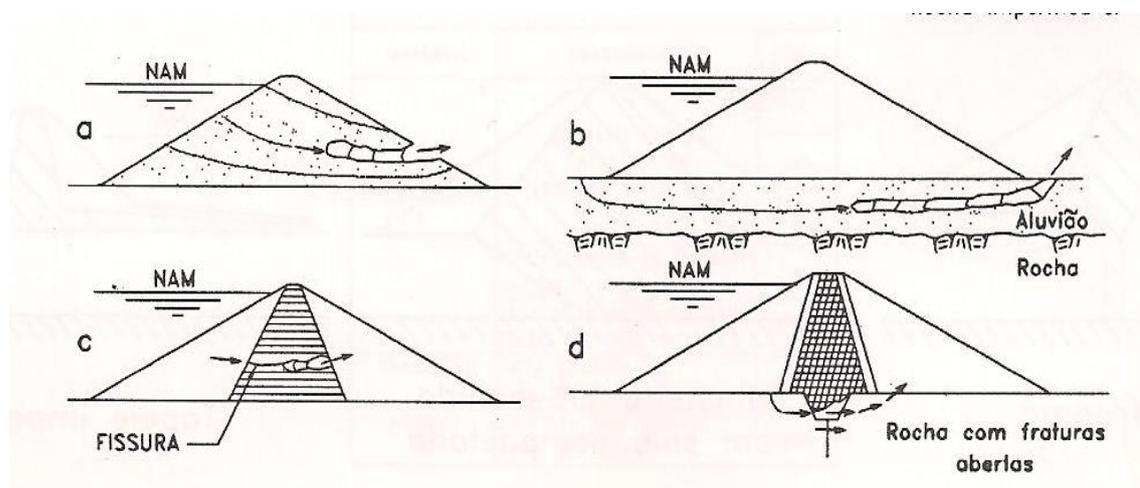


Figura 2: Ocorrências de Piping.

Fonte: MASSAD (2003).

Para a correção deste problema podem ser utilizados os seguintes recursos técnicos, que visam a interrupção do fluxo de água (Figura 3):

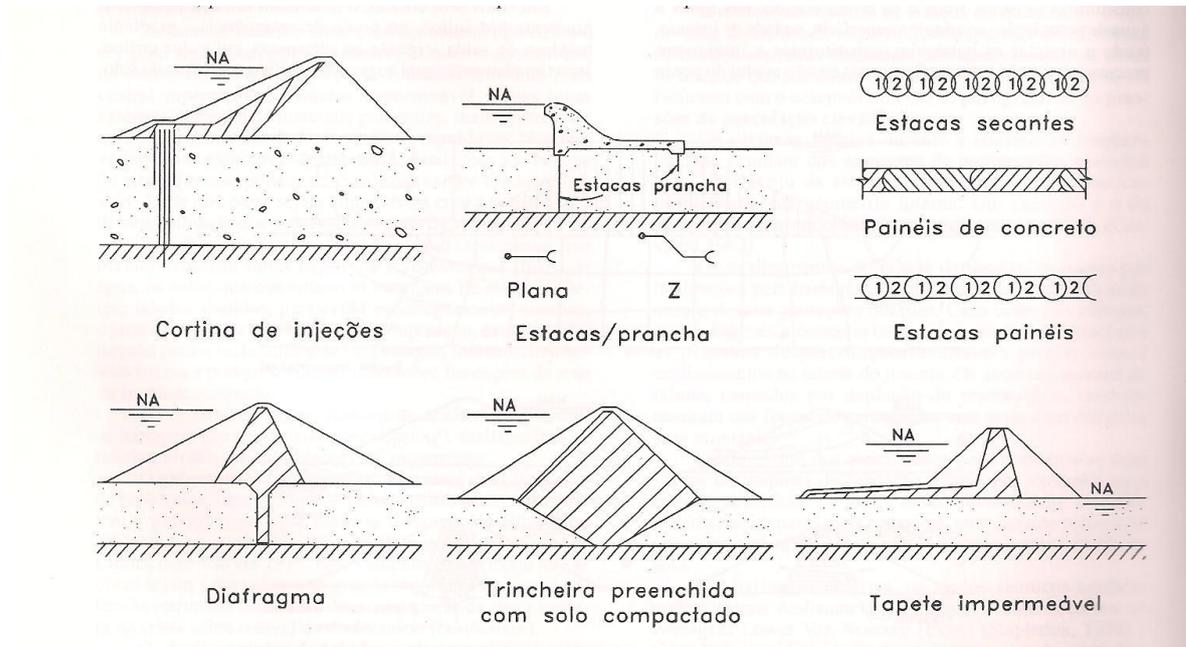


Figura 3: Recursos técnicos de interrupção de fluxo de água.

Fonte: MASSAD (2003).

2.2.2. Métodos de Análise de Estabilidade

As superfícies de ruptura múltiplas e variáveis que podem ocorrer em um talude de solo são: Escorregamentos Translacionais e Rotacionais.

Nos Escorregamentos Translacionais, os mecanismos de ruptura estão relacionados à maciços impermeáveis, camada de intemperismo delgada, rede de fluxo paralela à superfície, maciços extremamente fraturado, fluxo vertical e diminuição dos parâmetros de resistência do solo. Segue abaixo os fatores e variáveis que influenciam os escorregamentos translacionais:

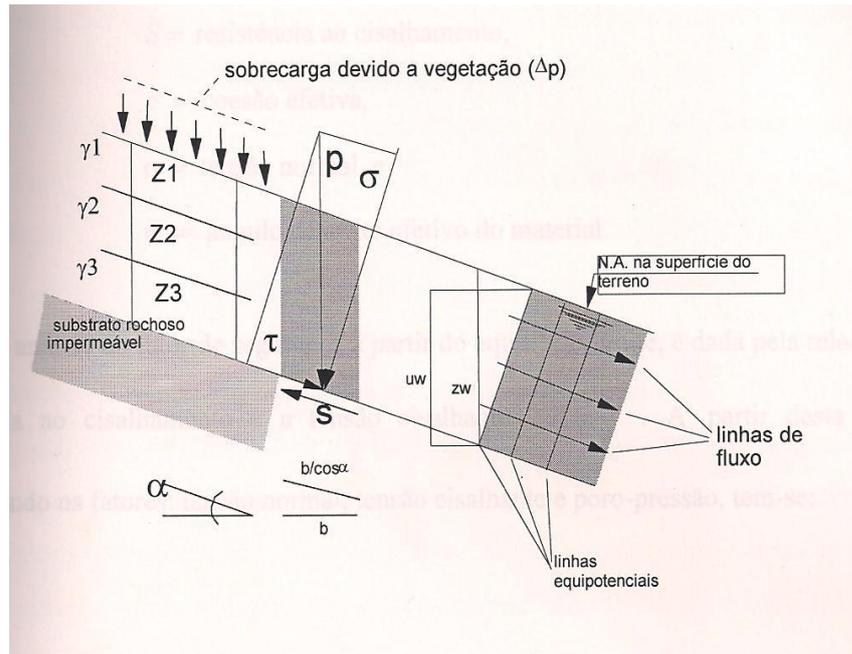


Figura 4: Escorregamento Translacional. Modificado.

Fonte: FREIRE (2005).

A estabilidade de talude é geralmente analisada a partir do fator de segurança. Este é definido como a razão entre a resistência média ao cisalhamento e a tensão média ao cisalhamento ao longo da superfície potencial de ruptura. Portanto o fator de segurança neste caso é dado por:

$$FS = \frac{\tau}{\sigma} \quad (1)$$

Substituindo as variáveis e considerando o “Modelo de Análise de Morh Coulomb” tem-se:

$$FS = \frac{C' + (\gamma Z + \Delta p - \gamma_w Z_w) \cos^2 \alpha \tan \phi}{(\gamma Z + \Delta p) \operatorname{sen} \alpha \cos \alpha} \quad (2)$$

Em que,

C' : Coesão efetiva do material (kPa)

Γ : Peso específico (kN/m³);

Z : Espessuras da camada de solo;

Δp : sobrecarga (vegetação ou equipamento);

γ_w : Peso Específico da água;

Z_w : Espessura da camada de água (rede de fluxo);

$\text{Cos}^2\alpha$: componente da força peso e largura da fatia analisada;

$\text{Tan } \phi$: tangente do ângulo de atrito do material

$\text{sen}\alpha$: componente da forma peso;

$\text{cos } \alpha$: componente referente a largura da fatia analisada.

A equação 2 possibilita o cálculo do fator de segurança para um possível escorregamento translacional do talude a ser analisado. (MASSAD, 2003)

O segundo mecanismo de ruptura é o de movimento rotacional. A Figura 5 ilustra as variáveis e fatores que este mecanismo leva em consideração.

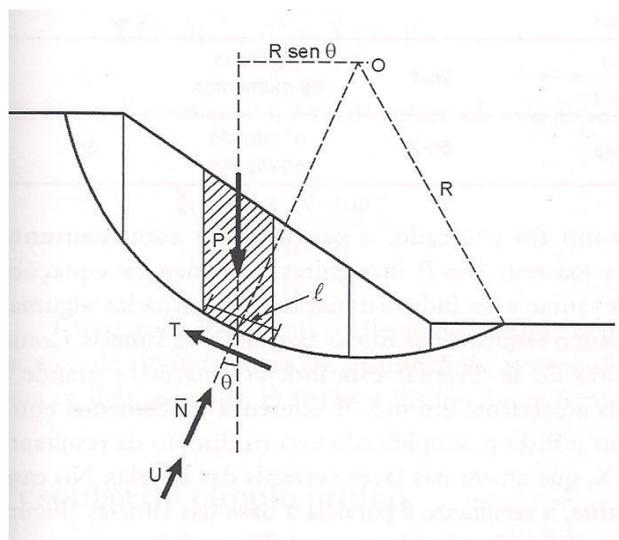


Figura 5: Movimento rotacional e sua divisão de fatias.

Fonte: MASSAD (2003).

Os fatores considerados são: geometria, resistência do solo e a distribuição de pressão neutra na base da fatia.

Conforme a figura acima, este método analisa diversas superfícies de ruptura, e para aquela que apresentar o menor fator de segurança deverá realizar-se o cálculo. Segue abaixo os fatores e variáveis que são analisados em cada fatia (Figura 6): (MASSAD, 2003)

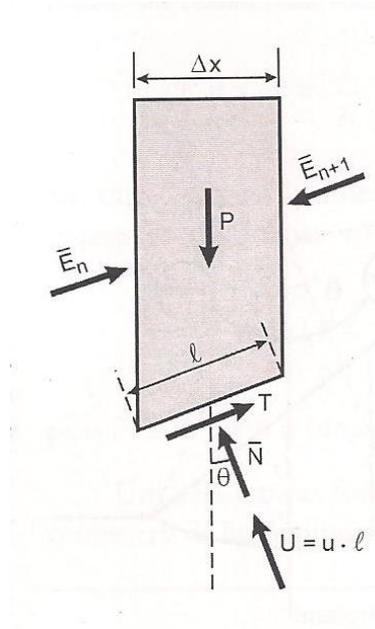


Figura 6: Análise de uma fatia.

Fonte: MASSAD (2003).

Portanto, o fator de segurança no mecanismo de ruptura rotacional é dado por:

$$FS = \frac{\sum c' + (P \cdot \cos\theta - \mu \cdot \Delta x \cdot \sec\theta) \cdot \tan\phi'}{\sum (P \cdot \sin\theta)} \text{ na superfície crítica investigada.} \quad (3)$$

Atualmente existem diversos métodos para determinar o fator de segurança de uma determinada superfície. Segundo Calle (2000), a seleção do modo de ruptura possível deve-se basear no conhecimento da geologia in situ e do perfil do solo intemperizado. Normalmente são utilizadas superfícies circulares para facilitar a solução dos casos. Existem diversos métodos para o cálculo do fator de segurança de uma superfície como: Fellenius (1936), Bishop (1955), Bishop simplificado, Janbu (1973), Morgenstern & Price (1965), Spencer (1967), Madej (1971) e Sarma (1973). Segue abaixo algumas considerações sobre cada método: (Calle, 2000)

- O método de Fellenius (1936) não considera as forças entre fatias (circular).
- Bishop simplificado: apresenta a resultante das forças entre fatias na horizontal e o fator de segurança é determinado à partir da consideração de equilíbrio de momentos.
- Janbu simplificado: Resultante das forças entre fatias é horizontal. Um fator de correção empírico é usado para levar em conta os efeitos das forças tangenciais. O fator de segurança é determinado a partir do equilíbrio de forças.

- Janbu Generalizado: Neste método a localização da força normal entre fatias é definida por uma linha de empuxo arbitrária. O fator de segurança é determinado à partir do equilíbrio de forças e de momentos.
- Spencer: Resultantes das forças entre fatias têm inclinações constantes através da massa do solo. É um método muito semelhante ao de Morgenstern & Price.
- Morgenstern & Price: Direção da resultante das forças entre fatias são definidas usando uma função arbitrária $f(x)$. A parcela de $f(x)$ necessária para satisfazer o equilíbrio de forças e de momentos é calculada. As fatias possuem uma espessura infinitesimal.
- Sarma: Resistência interna entre fatias é mobilizada. A incógnita λ é introduzida. A distribuição das resultantes das forças tangenciais entre fatias são definidas com base em uma função arbitrária. A porcentagem da função λ necessária para satisfazer o equilíbrio de forças e momentos é calculada.

Whitman & Baley (1967) e Wright (1969) realizaram estudos comparativos dos métodos e chegaram as seguintes conclusões: (Calle, 2000)

- Os valores do FS calculados pelos métodos Morgenstern&Price e o Janbu generalizado são bem próximos;
- No método simplificado de Bishop, os valores de FS calculados são muitas vezes comparáveis com aqueles obtidos pelos métodos que satisfazem todas as condições de equilíbrio limite. As diferenças encontradas variam de 0 a 6 % levando-se em consideração uma ampla variedade de condição de inclinação de talude, pressão neutra e resistência ao cisalhamento;
- Geralmente, os valores de FS calculados pelo método de Fellenius são menores que aqueles obtidos pelos métodos que satisfazem todas as condições de equilíbrio e também menores que aqueles calculados pelo método simplificado Bishop.

3. ANÁLISE DE ESTABILIDADE

3.1. METODOLOGIA DOS TRABALHOS

Para a realização deste trabalho, optou-se por dividir as atividades em 3 (três) etapas: Levantamento de dados, cálculos do fator de segurança e análise dos resultados. Na primeira etapa, foi realizado a seleção dos dados necessários para o cálculo da estabilidade dos taludes da barragem de rejeitos da empresa. A segunda etapa constou da execução dos cálculos utilizando diversos métodos para a avaliação da estabilidade da barragem, variando a altura e o comprimento, executou-se estudo paramétrico do Fator de Segurança. Por fim, com os resultados obtidos, estabeleceu-se uma relação entre porte da barragem e fator de segurança com a variação dos seus dados geométricos (montante, jusante, berma, altura e comprimento).

3.2. LEVANTAMENTO DE DADOS

Inicialmente selecionaram-se os fatores determinantes na estabilidade:

- Peso específico: peso do material por unidade de volume;
- Ângulo de atrito: medida de resistência ao cisalhamento dos solos decorrente do atrito entre as partículas;
- Coesão: medida de resistência decorrente da ação de forças cimentantes presentes entre as partículas dos solos;
- Dados geométricos das barragens: forma, dimensão e geometria da barragem;
- Rede de fluxo da água: água percolando na barragem.



Figura 7: Ensaio de campo para determinação de parâmetros de resistência do solo.

Fonte: MÉGARA PROJETOS E CONSULTORIA (2007).



Figura 8: Determinação da coesão do solo pelo ensaio de “Palheta” (Vane Test).

Fonte: MÉGARA PROJETOS E CONSULTORIA (2007).



Figura 9: Verificação do “NA” (nível da água) através de medidor.

Fonte: MÉGARA PROJETOS E CONSULTORIA (2007).

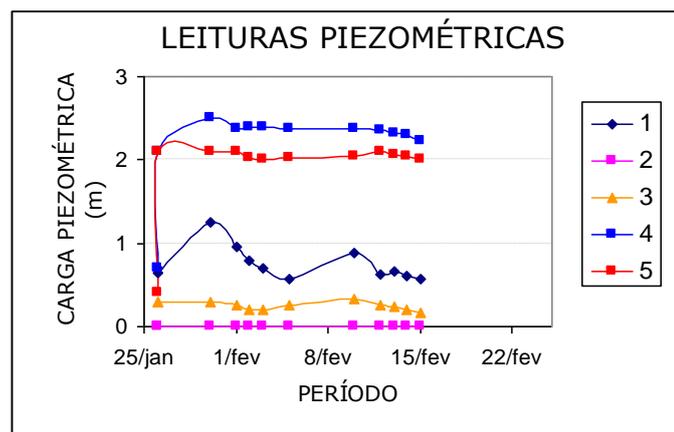


Figura 10: Dados de campo.

Fonte: MÉGARA PROJETOS E CONSULTORIA (2007).

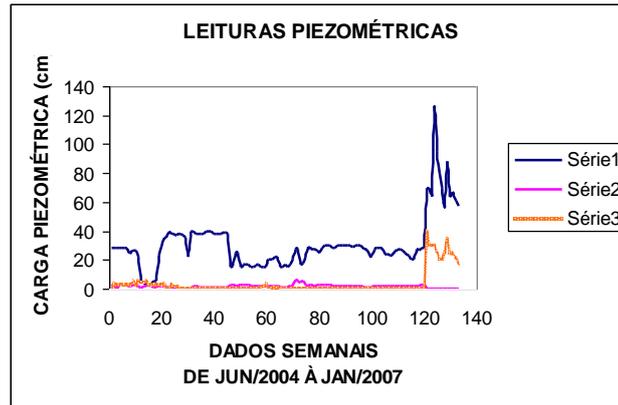


Figura 11: Dados de campo.

Fonte: MÉGARA PROJETOS E CONSULTORIA (2007)

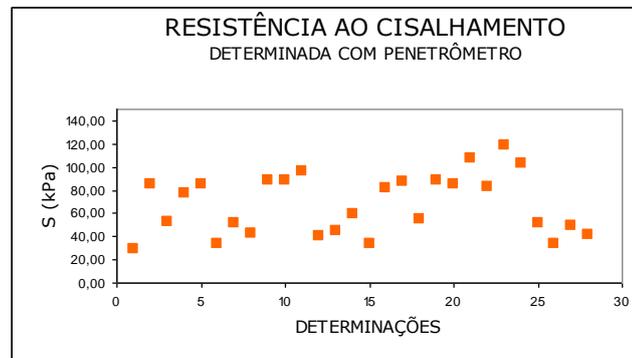


Figura 12: Dados de campo.

Fonte: MÉGARA PROJETOS E CONSULTORIA (2007)

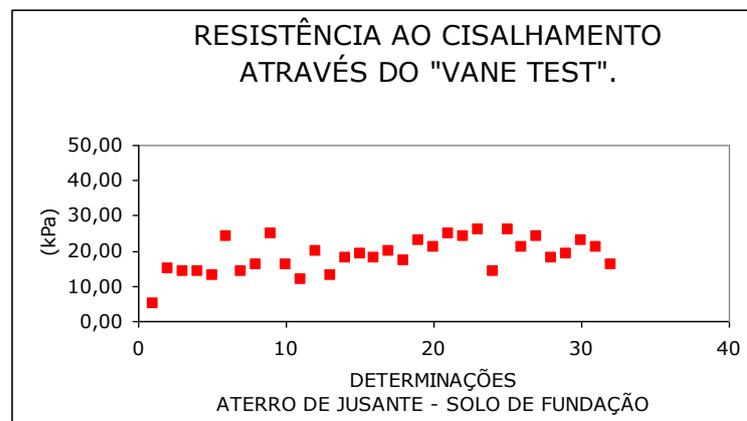


Figura 13: Dados de campo.

Fonte: MÉGARA PROJETOS E CONSULTORIA (2007)

Os dados foram obtidos inicialmente através de laudos técnicos arquivados pelas empresas que prestam consultoria, com objetivo de monitorar e regularizar a situação das barragens ao longo dos anos como exige o DNPM e SEMAD. A barragem apresenta as seguintes características:

O talude da montante apresenta 18 metros de altura total, dividido em dois taludes, em que o primeiro, mais abaixo, possui 13 metros de altura, uma crista com berma de 5 metros de comprimento. O segundo talude possui 5 metros de comprimento. Os dois taludes possuem inclinação 2:1 e presença de rip-rap (revestimento com blocos de pedra). A berma possui 10 metros de comprimento.

O talude da jusante consta de 15 metros de altura total e no segundo metro apresenta enrocamento em forma de trapézio com dimensões de base maior igual a 4,5 m, base menor de 1,5 m e altura de 1,5 m. Neste enrocamento existe uma camada de 0,4 m de brita granulada revestindo este enrocamento e 0,4 m, proveniente do filtro horizontal. Segue abaixo (Figura 14) a barragem plotada no programa GeoStudio:

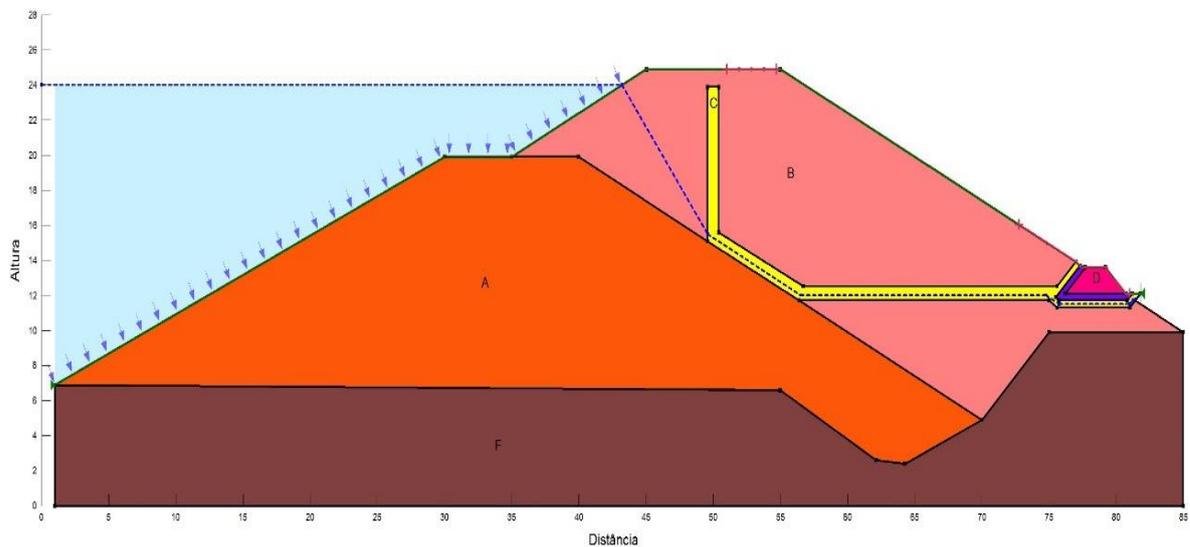


Figura 14: Barragem plotada no programa GeoStudio.

Os dados referentes aos materiais foram obtidos através de uma vistoria ocorrida na barragem conforme consta e determina o DNPM, por uma empresa especializada. Segue abaixo os dados (Tabela 5):

Tabela 5: Características dos materiais da barragem.

| Empresa C | | | | | |
|--------------------------------------|--------------------|----------|------------|---------------|---------------------|
| Típos de materiais | Argila Siltosa - A | Argila B | Filtro - C | Enrocamento D | Brita Granulada - E |
| Peso Específico (kN/m ³) | 21 | 21 | 19 | 22 | 20 |
| Ângulo de Atrito (°) | 18 | 18 | 45 | 45 | 42 |
| Coesão (kPa) | 12 | 18 | 0 | 0 | 0 |

O material de fundação da barragem é rocha sã e impermeável. Por isto não foi informado seus valores de peso específico, ângulo de atrito e coesão.

O nível de água da barragem foi definido como 1 metro do topo do talude a montante da barragem.

3.3. CÁLCULOS DO FATOR DE SEGURANÇA

Para o cálculo do fator de segurança foi utilizado o programa computacional GeoStudio 2007 versão estudante, para calcular e comparar os diversos métodos citados na revisão bibliográfica: Fellenius (1936), Bishop (1955), Bishop simplificado, Janbu (1973), Morgenstern & Price (1965), Spencer (1967), Madej (1971) e Sarma (1973). Os dados utilizados estão expressos no item b – LEVANTAMENTO DE DADOS. Segue abaixo o cálculo do fator de segurança da barragem (Figura 15):

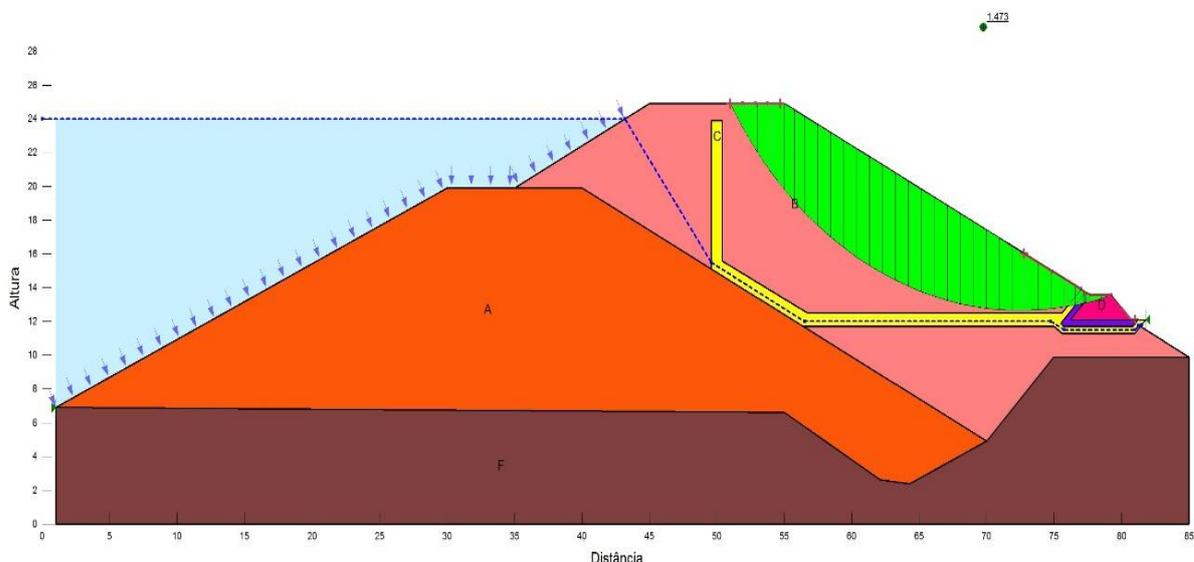


Figura 15: Cálculo do fator de segurança.

Segue abaixo uma ampliação com foco na ruptura circular mais provável (Figura 16):

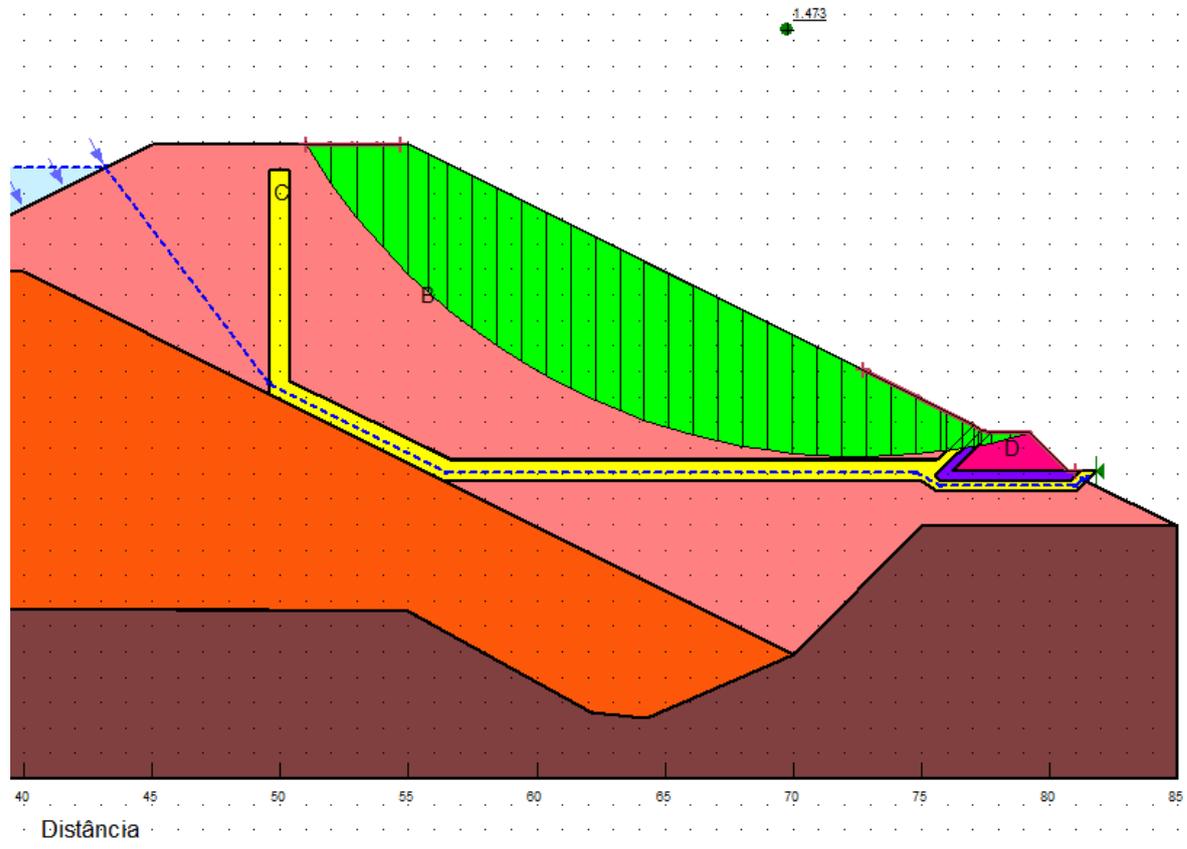


Figura 16: Superfície com menor fator de segurança.

O programa utilizado calcula o fator de segurança através dos métodos citados na revisão bibliográfica. Segue abaixo os valores obtidos (Tabela 6):

Tabela 6: Fatores de segurança obtidos.

| Empresa C | | | | | |
|---------------------------|----------|--------|-------|-------------------|---------|
| | Ordinary | Bishop | Janbu | Morgenstern-Price | Spencer |
| Fator de Segurança | 1,394 | 1,47 | 1,373 | 1,473 | 1,485 |

A barragem apresenta um fator de segurança maior que 1 em todos os métodos utilizados, o que nos permite dizer que a barragem é estável. Porém, por se tratar de uma obra de altos impactos ambientais, risco e grande complexidade pelo seu porte, recomenda-se alguma medida para elevar este fator de segurança. Por exemplo, pode ser construída uma berma no pé do talude a jusante para aplicar um peso nesta área e conseqüentemente aumentar o fator de segurança.

Comparando os métodos utilizados, tem-se uma variação de 0,1 no fator de segurança.

Durante os estudos deste trabalho, notou-se uma semelhança e relação entre fatores de segurança maiores em barragens com menores dimensões, principalmente altura. Visando verificar melhor esta relação, realizou-se um estudo utilizando as características da barragem, variando apenas as suas dimensões, com foco na altura e mantendo suas proporções.

Primeiramente realizou-se o cálculo do fator de segurança igual ao realizado na barragem, mas com variação de altura de 19 m até 23m (talude a montante) com intervalos de 1 m. Notou-se que o fator de segurança variou linearmente de 1,437 para 1,342, com variação de -0,139. Com isto, definiu-se para esta mesma barragem, uma altura de 30 m (talude a montante) e obteve-se um fator de segurança 1,221, apresentando variação de -0,121 em relação à barragem com 23 m de altura. Segue abaixo os dados (Tabela 7):

Tabela 7: Dados relacionando fator de segurança e altura.

| Barragem C e suas variações | | | | | | | |
|-----------------------------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Altura (m) | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 30 |
| Fator de Segurança | 1,481 | 1,437 | 1,419 | 1,382 | 1,358 | 1,342 | 1,221 |
| Variação do FS | - | -0,044 | -0,018 | -0,037 | -0,024 | -0,016 | -0,121 |

Esta variação nos permite concluir que, nesta faixa de altura da barragem, tem-se um comportamento linear da diminuição do fator de segurança.

Em seguida calculou-se o fator de segurança da barragem com alturas menores: 15 m, 13 m, 10 m, 7 m, 5 m, 3 m e 2 m. Na barragem com dimensão de 15 m, tem-se um fator de segurança de 1,594, que apresenta uma variação de +0,113 em relação a barragem com 18 m de altura. Segue abaixo uma tabela relacionando altura, fator de segurança e variação do “FS” (Tabela 8):

Tabela 8: Relação de altura de barragem e fator de segurança.

| Barragem C e suas variações | | | | | | | | |
|-----------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Altura (m) | 2 | 3 | 5 | 7 | 10 | 13 | 15 | 18 |
| Fator de Segurança | 4,928 | 3,647 | 2,691 | 2,231 | 1,893 | 1,693 | 1,594 | 1,481 |
| Variação do FS | 1,281 | 0,956 | 0,46 | 0,338 | 0,2 | 0,099 | 0,113 | - |

Com a diminuição da altura da barragem, tem-se o aumento do fator de segurança. O comportamento desta relação pode ser verificado no gráfico seguinte (Figura 17):

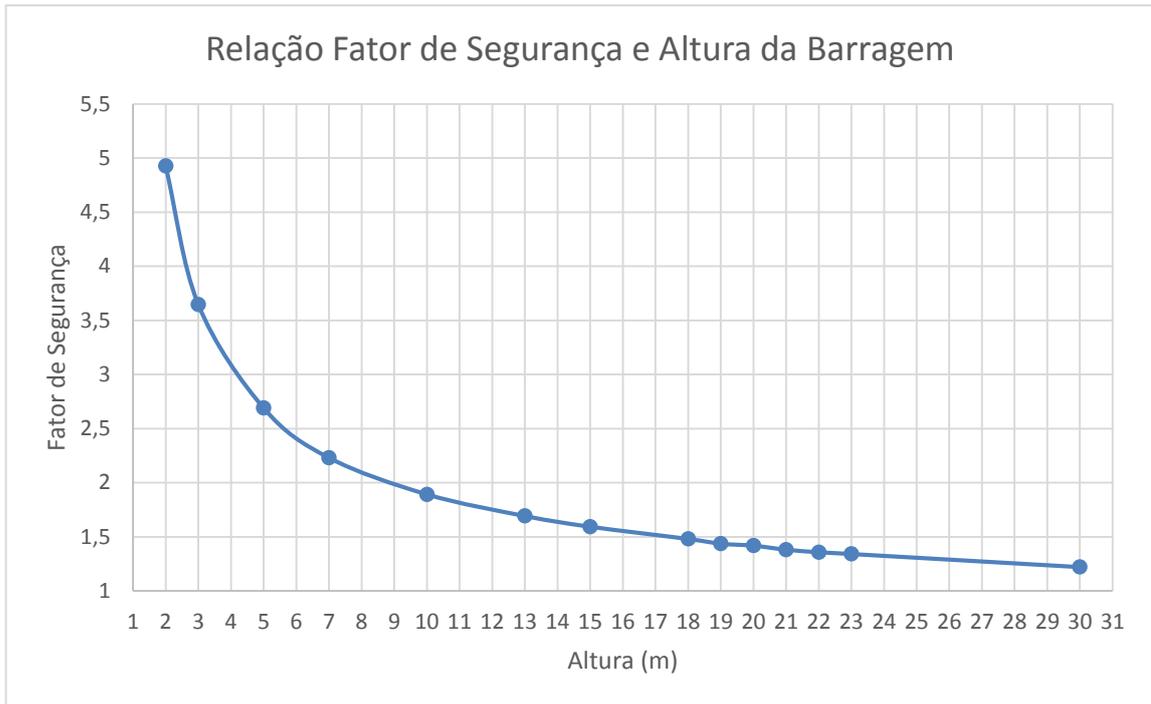


Figura 17: Gráfico Fator de Segurança x Altura da Barragem.

Na análise do gráfico, observa-se claramente que o fator de segurança relacionado ao tamanho da barragem apresenta um comportamento exponencial. Isto pode ser explicado considerando que o fator de segurança é a relação entre a resistência ao cisalhamento do solo pela tensão cisalhante atuante. Ou seja, a resistência é influenciada pela coesão, ângulo de atrito e tensão normal. Já a tensão cisalhante atuante é basicamente influenciada exclusivamente pela tensão normal e a altura do material multiplicado pelo seu peso específico. Conseqüentemente, com alturas menores, os fatores de coesão e ângulo de atrito possuem uma influência maior, aumentando exponencialmente o fator de segurança. Com o aumento da altura, o fator tensão normal e o produto altura do material por peso específico assumem maiores valores, por isto têm-se o comportamento linear da relação fator de segurança x altura.

4. CONCLUSÕES

As barragens de rejeitos desempenham um papel fundamental para que as empresas possam operar de maneira correta e viável. Por isso, é essencial que estes empreendimentos estejam de acordo com a legislação vigente atual, e estáveis. Neste contexto, o presente trabalho avaliou o comportamento de barragem de rejeitos e estabeleceu relação entre o “FS” e o porte do empreendimento.

Os estudos realizados indicam a condição de estabilidade da barragem, porém deve-se considerar que devido ao potencial poluidor, ou a catástrofe no caso de ruptura, deve-se realizar obras que eleve o “FS” para patamares superiores a 2,0.

Analisou-se também neste estudo a relação entre altura da barragem e “FS”, para um mesmo grupo de fatores geotécnicos, mostrando que a relação fator de segurança por porte da barragem apresenta um comportamento exponencial.

Considera-se finalmente que o presente trabalho abordou satisfatoriamente o tema, desde os conceitos até a aplicação tecnológica no estudo de caso.

REFERÊNCIAS

BRASIL. **Lei Nº 12.334**, de 20 de setembro de 2010. Publicada no Diário Oficial da União em 21 de setembro de 2010.

BRASIL. **Portaria Nº 416**, de 03 de setembro de 2012. Cadastro Nacional de Barragens de Mineração. Publicada no Diário Oficial da União em 05 de setembro de 2012.

CALLE, J. A. C. **Análise de Ruptura de Talude em Solo não Saturado**. 156f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Escola de Engenharia de São Carlos, USP, São Carlos, 2000.

CARVALHO DD, FILHO PASCHOALIN JA. **Estudo da estabilidade de pequenas barragens de terra compactadas em três teores de umidade**. Exacta, 2004. Disponível em: <<http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=81000205>>. Acesso em: 17 ago. 2013.

FREIRE, E. P. **Análise de Estabilidade de Taludes em Solo nos Morros da Cidade de Santos**. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Universidade de Brasília, UNB, Brasília – DF, 1995.

GEO-SLOPE. **Slope/W: User's Guide**. Calgary, Alberta, Canada, 1991-2002. Disponível em: <http://www.cgm.polymtl.ca/civ3302/Hiver%202003/Slopewh03/pdf&filename=slp_man.pdf> Acesso em: 17 ago. 2013.

MASSAD, F. **Obras de Terra: Curso Básico de Geotecnia**. São Paulo: Oficina de Textos, 2003. 170 p.

MÉGARA Projetos e Consultoria Ltda. **Auditoria de Barragem de Rejeitos**. Poços de Caldas – MG, 2007

Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável de Minas Gerais. **Deliberação Normativa COPAM nº 62**, de 17 de dezembro de 2002.

Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável de Minas Gerais. **Deliberação Normativa COPAM nº 74**, de 9 de setembro de 2004.

YOMURA D, VOGT V. **Introdução ao Geostudio/Geoslope**. Universidade Federal do Paraná, UFPR, 2011. Disponível em: <http://www.cesec.ufpr.br/docente/andrea/TC066/Aula_sobre_GeoSlope.pdf>. Acesso em: 17 ago. 2013.