

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ  
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE CONSTRUÇÃO CIVIL  
CURSO ENGENHARIA CIVIL

RODRIGO JOSÉ DE ALMEIDA TORRES FILHO  
VANESSA CORRÊA DE ANDRADE

**COMPARAÇÃO ENTRE ANÁLISES DETERMINÍSTICAS E  
PROBABILÍSTICAS DE ESTABILIDADE DE TALUDES EM  
BARRAGENS: estudo de caso**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CURITIBA  
2015

RODRIGO JOSÉ DE ALMEIDA TORRES FILHO  
VANESSA CORRÊA DE ANDRADE

**COMPARAÇÃO ENTRE ANÁLISES DETERMINÍSTICAS E  
PROBABILÍSTICAS DE ESTABILIDADE DE TALUDES EM  
BARRAGENS: estudo de caso**

Trabalho de Conclusão de  
Curso de Graduação, apresentado como  
requisito parcial à obtenção do título de  
Bacharel em Engenharia Civil, do  
Departamento Acadêmico de Construção  
Civil, da Universidade Tecnológica  
Federal do Paraná.

Orientador: Prof. D.Sc. Ronaldo Luis S.  
Izzo

CURITIBA  
2015

---

## **FOLHA DE APROVAÇÃO**

### ***COMPARAÇÃO ENTRE ANÁLISES DETERMINÍSTICAS E PROBABILÍSTICAS DE ESTABILIDADE DE TALUDES EM BARRAGENS: ESTUDO DE CASO***

Por

**RODRIGO JOSÉ DE ALMEIDA TORRES FILHO  
VANESSA CORRÊA DE ANDRADE**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Civil, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, defendido e aprovado em 23 de fevereiro de 2015, pela seguinte banca de avaliação:

---

Prof. Orientador – Ronaldo Luis dos Santos Izzo, Dr.  
UTFPR

---

Profa. Amanda Dalla Rosa Johann, Dra.  
UTFPR

---

Prof. Rogério Francisco Kuster Puppi, Dr.  
UTFPR

## **AGRADECIMENTOS**

Agradecemos a Deus pela presença em nossa vida, e por todas as bênçãos recebidas.

Aos nossos queridos pais, por todo o apoio e dedicação em nossa formação, por acreditarem em nossos sonhos e pela ajuda recebida em todos nossos projetos.

Aos nossos irmãos, pelas conversas e conselhos.

Ao Professor Ronaldo Izzo, pela orientação, amizade e ajuda para o desenvolvimento deste trabalho.

Aos professores da banca examinadora pela atenção e contribuição dedicadas a este estudo.

Aos professores da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, pela formação recebida.

À Intertechne Consultores e seus projetistas, pelo apoio com softwares e também pelo auxílio técnico e disponibilidade, nosso muito obrigado.

A todos que contribuíram de alguma maneira para o desenvolvimento deste trabalho e também àqueles que estiveram ao nosso lado durante toda a caminhada, nosso muito obrigado!

## RESUMO

TORRES FILHO, R. J. A.; ANDRADE, V. C. **Comparação entre análises determinísticas e probabilísticas na estabilidade de taludes em barragens: estudo de caso.** 2015. 83 pp. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2015.

Tendo em vista a grande importância econômica, social e ambiental assim como a magnitude das obras de barragens, torna-se cada vez mais necessário o estudo mais acurado de suas características para seu melhor desempenho. Atualmente, as análises determinísticas são utilizadas com grande frequência para a obtenção do fator de segurança de taludes. Estes métodos apesar de altamente difundidos e grande utilização, possuem limitações quanto à sua capacidade de considerar as incertezas associadas às variabilidades dos parâmetros de resistência dos materiais componentes envolvidos nas análises. As análises probabilísticas permitem resolver este problema, porém, são pouco difundidos no meio técnico. Visando superar estas dificuldades, apresenta-se neste trabalho comparações entre análises determinísticas, pelos métodos de Bishop Simplificado e Spencer, e probabilísticas, pelo Método de Monte Carlo, através do estudo de caso de uma barragem nos regimes de final de construção, operação normal, operação normal com sismo e rebaixamento rápido, utilizando o software Geoslope. Também são feitas comparações dos resultados com normas nacionais e internacionais a fim de que seja avaliado o desempenho da barragem, analisando se os fatores estão dentro dos limites estabelecidos, se há risco de rompimento, ou ainda, se há um superdimensionamento do empreendimento. Verificou-se que a barragem possui seus fatores de segurança dentro dos limites estabelecidos por norma em todas as simulações. Verificou-se também a facilidade de utilização do método probabilístico, desde que existam dados suficientes disponíveis para que estas análises sejam efetuadas.

**Palavras chave:** Barragem. Estabilidade de taludes. Análise determinística. Análise Probabilística. Método de Monte Carlo.

## ABSTRACT

TORRES FILHO, R. J. A.; ANDRADE, V. C. **Comparison between deterministic and probabilistic analysis of slope stability dams:** case study. 2015. 83 pp. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) - Federal Technology University - Paraná. Curitiba, 2015.

Considering the great economic, social and environmental importance and the magnitude of dams, more and more necessary becomes an accurate study of its features for its best performance. Currently, deterministic analyses are very frequently used for obtaining the slope factor of safety. These methods although highly extensive and widespread use, have limitations on their ability considering uncertainties associated with variability of the strength parameters of the component materials involved in the analysis. The probabilistic analyses provide a solution to this problem, however, are less known in technical means. In order to overcome these difficulties, we present in this paper comparison between deterministic analysis, by Bishop Simplified and Spencer methods, and probabilistic, the Monte Carlo simulation, through the case study of a dam in the end-of-construction stability, long-term, earthquake and rapid drawdown, using the Geoslope software. There was also made comparisons of results with national and international standards so that the dam performance is assessed by analyzing the factors within the limits established, if there is collapse danger, or if there is oversizing of the enterprise. It was verified if the dam has its safety factor within the limits set by the standard in all simulations. The simplicity of the application of the probabilistic method, provided that there are available data, was also verified.

**Key words:** Dam. Slope Stability. Deterministic Analysis. Probabilistic Analysis. Monte Carlo Simulation.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Seção transversal de uma barragem de terra .....	18
Figura 2 - Seção transversal de uma barragem de enrocamento .....	19
Figura 3 - Ruptura por Queda .....	21
Figura 4 – Ruptura por tombamento .....	22
Figura 5 - Escorregamento rotacional .....	23
Figura 6 - Escorregamento Translacional .....	24
Figura 7 - Espalhamento Lateral .....	24
Figura 8 - Ruptura por rastejo .....	25
Figura 9: Elementos do Círculo de Mohr.....	26
Figura 10: Traçado da envoltória linear de ruptura.....	27
Figura 11: Variação do ângulo de atrito em função da tensão normal .....	28
Figura 12 – Fatia genérica com as forças atuantes no sistema (Método de Bishop) 31	
Figura 13 - Fatia genérica com as forças atuantes no sistema (Método de Spencer) .....	32
Figura 14: Gráfico para obtenção do FS. ....	33
Figura 15 – Comparação entre dois casos de distribuição do fator de segurança ....	35
Figura 16: Probabilidade de ruptura em função do índice de confiabilidade para uma distribuição normal de fator de segurança. ....	36
Figura 17: Seção representativa da barragem BSMTIT. ....	40
Figura 18: Curva de Distribuição dos Valores de Coesão.....	43
Figura 19: Curva de Distribuição dos Valores de Ângulo de Atrito.....	43
Figura 20: Curva de Distribuição dos Valores de Massa Específica .....	44
Figura 21 – Método de Bishop - Final de Construção – Montante .....	51
Figura 22 – Método de Bishop - Final de Construção – Jusante.....	51
Figura 23 – Método de Bishop – Operação Normal .....	52
Figura 24 – Método de Bishop – Operação Normal com Sismo $a_v=0,03g$ e $a_h=0,05g$ .....	52
Figura 25 – Método de Bishop – Operação Normal com Sismo $a_v=-0,03g$ e $a_h=-$ $0,05g$ .....	53
Figura 26 – Método de Bishop – Rebaixamento Rápido – NA El.302,00m a El.292,00m .....	53
Figura 27 – Método de Spencer - Final de Construção – Montante .....	55

Figura 28 – Método de Spencer - Final de Construção – Jusante .....	55
Figura 29 – Método de Spencer – Operação Normal.....	56
Figura 30 – Método de Spencer – Operação Normal com Sismo $a_v=0,03g$ e $a_h=0,05g$ .....	56
Figura 31 – Método de Spencer – Operação Normal com Sismo $a_v=-0,03g$ e $a_h=-0,05g$ .....	57
Figura 32 – Método de Spencer – Rebaixamento Rápido – NA El.302,00m a El.292,00m .....	57
Figura 33 – Método de Bishop - Final de Construção – Montante - FS.....	59
Figura 34 – Método de Bishop - Final de Construção – Montante – Distribuição de Frequência .....	60
Figura 35 – Método de Bishop - Final de Construção – Jusante - FS.....	60
Figura 36 – Método de Bishop - Final de Construção – Jusante – Distribuição de Frequência .....	61
Figura 37 – Método de Bishop – Operação Normal - FS .....	61
Figura 38 – Método de Bishop - Operação Normal – Distribuição de Frequência.....	62
Figura 39 – Método de Bishop – Operação Normal com Sismo $a_v=0,03g$ e $a_h=0,05g$ - FS .....	62
Figura 40 – Método de Bishop - Operação Normal com Sismo $a_v=0,03g$ e $a_h=0,05g$ – Distribuição de Frequência.....	63
Figura 41 – Método de Bishop – Operação Normal com Sismo $a_v=-0,03g$ e $a_h=-0,05g$ - FS.....	63
Figura 42 – Método de Bishop - Operação Normal com Sismo $a_v=-0,03g$ e $a_h=0,05g$ – Distribuição de Frequência.....	64
Figura 43 – Método de Bishop – Rebaixamento Rápido – NA El.302,00m a El.292,00m - FS .....	64
Figura 44 – Método de Bishop – Rebaixamento Rápido – NA El.302,00m a El.292,00m – Distribuição de Frequência.....	65
Figura 45 – Método de Spencer - Final de Construção – Montante - FS .....	66
Figura 46 – Método de Spencer - Final de Construção – Montante – Distribuição de Frequência .....	66
Figura 47 – Método de Spencer - Final de Construção – Jusante - FS.....	67
Figura 48 – Método de Spencer - Final de Construção – Jusante – Distribuição de Frequência .....	67

Figura 49 – Método de Spencer – Operação Normal - FS .....	68
Figura 50 – Método de Spencer - Operação Normal – Distribuição de Frequência ..	68
Figura 51 – Método de Spencer – Operação Normal com Sismo $a_v=0,03g$ e $a_h=0,05g$ - FS .....	69
Figura 52 – Método de Spencer - Operação Normal com Sismo $a_v=0,03g$ e $a_h=0,05g$ – Distribuição de Frequência.....	69
Figura 53 – Método de Spencer – Operação Normal com Sismo $a_v=-0,03g$ e $a_h=0,05g$ - FS .....	70
Figura 54 – Método de Spencer - Operação Normal com Sismo $a_v=-0,03g$ e $a_h=0,05g$ – Distribuição de Frequência.....	70
Figura 55 – Método de Spencer – Rebaixamento Rápido – NA El.302,00m a El.292,00m - FS .....	71
Figura 56 – Método de Spencer – Rebaixamento Rápido – NA El.302,00m a El.292,00m – Distribuição de Frequência.....	71

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO.....</b>	<b>11</b>
1.1 DELIMITAÇÃO DO TEMA.....	12
1.2 PROBLEMAS E PREMISSAS.....	13
1.3 OBJETIVO GERAL .....	13
1.4 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	13
1.5 JUSTIFICATIVA.....	14
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRAFICA.....</b>	<b>16</b>
2.1 TIPOS DE BARRAGENS.....	16
2.1.1 Barragem de Terra.....	17
2.1.2 Barragem de Enrocamento .....	18
2.2 ESTABILIDADE DE TALUDES.....	20
2.2.1 Modos de ruptura.....	20
2.2.2 Envoltórias de Resistência.....	26
2.3 ANÁLISE DETERMINÍSTICA.....	28
2.3.1 Método do Equilíbrio Limite de Bishop.....	30
2.3.2 Método do Equilíbrio Limite de Spencer.....	32
2.4 ANÁLISE PROBABILÍSTICA.....	34
2.4.1 Método de Monte-Carlo.....	36
<b>3. METODOLOGIA .....</b>	<b>39</b>
3.1 SEÇÃO TRANSVERSAL .....	39
3.2 PARÂMETROS GEOTÉCNICOS.....	41
3.3 DIMENSIONAMENTO .....	45
3.3.1 Condições de Carregamento .....	45
3.3.2 Critérios de Aceitação .....	46
3.3.3 Procedimentos Computacionais.....	47
<b>4. RESULTADOS.....</b>	<b>50</b>

4.1 ANÁLISE DETERMINÍSTICA.....	50
4.1.1 Método de Bishop Simplificado .....	50
4.1.2 Método de Spencer .....	54
4.2 ANÁLISE PROBABILÍSTICA.....	58
4.2.1 Método de Bishop Simplificado .....	59
4.2.2 Método de Spencer .....	65
<b>5. CONCLUSÕES.....</b>	<b>73</b>
<b>6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>75</b>

## 1. INTRODUÇÃO

Dentre as obras de infraestrutura fundamentais para o desenvolvimento humano, as barragens estão entre as mais antigas, e se mantêm, até a atualidade, essenciais para o desenvolvimento humano.

Barragens podem ser construídas com diversas finalidades, dentre elas pode-se citar reservatórios de água para geração de energia, irrigação, regularização de vazão, lazer, transporte, desvio de rios dentre outros.

Dentre as aplicações citadas chama-se atenção para a importância das usinas hidrelétricas na matriz energética mundial. Em 2010 16,8% de toda energia gerada no mundo, vinha desta fonte (EPE, 2013).

O Brasil encontra-se em nono lugar dentre os maiores produtores de energia elétrica no mundo, com uma capacidade instalada de 112,4GW sendo que destes, 80,7GW são provenientes de hidrelétricas (EPE, 2013), ou seja, quase 72% da energia gerada no país está associada a construção de barragens.

Algumas barragens chegam a alcançar grandes dimensões, existindo algumas da ordem de até centenas de metros, Rumei na China terá 340m de altura e 800m de comprimento (Cruz, *et al.*, 2009). Obviamente barragens como essas acumulam uma quantidade muito grande de água e é de suma importância garantir a segurança da estrutura sob pena de se incorrer em grandes gastos com manutenção, perda de equipamentos e até mesmo o rompimento da barragem que pode acarretar a perda de vidas humanas. Por outro lado, grandes barragens exigem a mobilização intensa de recursos durante o projeto e execução, não sendo viável economicamente executar este tipo de empreendimento superdimensionando sua estrutura de modo inconsequente.

Com base nestes conceitos, considera-se então imprescindível que o projeto seja feito da forma mais econômica possível sem que se comprometa a segurança da obra. Para isso é necessário que se faça, antes de tudo, uma investigação criteriosa das características da região onde se deseja implantar a barragem. Esta investigação é essencialmente multidisciplinar e abrange a hidrologia, a hidráulica, a geologia, a geotecnia, a topografia dentre outros.

De acordo com as características do local, que são obtidas através de ensaios de campo e de laboratório, pode-se decidir qual dos tipos de barragem

melhor se adéqua à região para atender os objetivos do empreendimento com o orçamento disponível. Dentre as alternativas podem-se destacar as barragens de concreto gravidade, concreto com contrafortes, em arco, enrocamento com face de concreto, enrocamento com núcleo (argila ou asfalto) e barragens de terra.

Para aquelas construídas com enrocamento ou terra, dentre outras características, é necessário garantir a estabilidade dos taludes que formam a barragem. Para a averiguação desta estabilidade tem-se dois métodos disponíveis, os métodos determinísticos e os probabilísticos.

Atualmente é comum a utilização de métodos determinísticos para a análise de estabilidade de taludes em barragens. Este método é baseado em um fator de segurança, cujo cálculo se dá a partir de parâmetros fixos dos materiais, fato que influencia diretamente na qualidade dos resultados obtidos, devido à variabilidade natural que tais parâmetros apresentam. Outra questão quanto aos métodos determinísticos são as limitações geradas quando se trata da confiabilidade dos resultados, já que não há uma análise que identifique a probabilidade de ruptura do talude.

Em face dessas restrições, surge a alternativa de lançar mão de uma análise probabilística, que tem como característica a utilização de um método determinístico para o seu desenvolvimento, no qual o fator de segurança pode ser avaliado através de uma distribuição de probabilidade, podendo-se, então, obter um fator de segurança médio e também valores associados aos seus riscos.

## 1.1 DELIMITAÇÃO DO TEMA

Neste trabalho será feita a comparação entre análises de estabilidade de taludes pelos métodos determinísticos de equilíbrio limite, com hipótese de ruptura circular, utilizando os métodos de Spencer e Bishop simplificado, e o método probabilístico de Monte Carlo em uma barragem de terra, chamada BSMTIT. Para cada uma dessas análises serão consideradas as condições de Operação, Final de Construção e Rebaixamento Rápido.

A geometria da barragem em estudo assim como seus materiais com suas respectivas características serão apresentados nos capítulos seguintes.

## 1.2 PROBLEMAS E PREMISSAS

Os fatores motivadores deste trabalho foram:

- A escassez de dados comparativos que indiquem a confiabilidade dos métodos estatísticos de estabilidade de taludes;

Apesar de as análises estatísticas gerarem informações que permitem uma análise mais aprofundada em relação aos métodos determinísticos, não são muito utilizadas comercialmente, pois são mais recentes e menos consagradas.

- A baixa incerteza sobre a precisão das análises determinísticas;

Devido à falta de confiabilidade sobre a exatidão das análises determinísticas, gerada pela variabilidade dos parâmetros de dimensionamento, se faz necessário um aumento do fator de segurança mínimo aceitável da barragem na tentativa de torná-la segura. Porém, Esta solução pode levar a duas situações desfavoráveis. Por vezes pode tornar a construção mais robusta, aumentando assim, o custo final da obra. Por outro lado, este aumento no fator pode vir a ser ainda insuficiente, devido à grande variabilidade dos parâmetros do solo, dando a falsa impressão de segurança.

## 1.3 OBJETIVO GERAL

O objetivo deste trabalho é comparar os fatores de segurança obtidos pelos métodos determinísticos com os obtidos pelos métodos probabilísticos para a estabilidade dos taludes da seção típica da barragem em estudo.

## 1.4 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- Obtenção, organização e análise dos dados da barragem;
- Aplicação do método determinístico de Spencer;
- Aplicação do método determinístico de Bishop Simplificado;
- Aplicação do método probabilístico de Monte Carlo;
- Comparação e análise dos resultados obtidos pelos diferentes métodos;
- Comparação com resultados de outros autores.

## 1.5 JUSTIFICATIVA

É de suma importância assegurar a estabilidade de uma barragem devido ao que ela representa sob o ponto de vista econômico, social e ambiental. Para tanto, é necessário que haja um estudo aprofundado a respeito das características do local, dos materiais envolvidos na sua construção e das incertezas envolvidas nos métodos de cálculo considerados. Com um maior conhecimento das variáveis envolvidas é possível conhecer melhor os riscos e escolher o perfil mais adequado à situação em estudo.

Os métodos mais tradicionalmente utilizados para este fim são os Métodos de Equilíbrio Limite (MEL), que tem como fundamento a relação entre as forças resistentes e as forças atuantes de um dado material. Para que haja estabilidade, esta relação deve ser igual ou superior a 1. Os métodos que se baseiam no Equilíbrio Limite são determinísticos, ou seja, a partir de um conjunto de dados, obtém-se uma média, para então, a partir deste valor se obter um fator de segurança adequado para aquela estabilidade. Entretanto, ao adotar um valor fixo para cada variável estes métodos não consideram as variações que ocorrem no meio estudado. Por este motivo, os fatores de segurança associados a estes métodos apresentam muitas incertezas, podendo acarretar um subdimensionamento ou superdimensionamento significativo do empreendimento.

Os fatores de segurança apresentados pelas normas vigentes são bem consolidados, mas em uma obra que extrapole as características utilizadas na sua determinação, por exemplo, tem-se um custo excessivo, caso o valor esteja superdimensionado ou risco de ruptura, caso esteja subdimensionado.

Alternativamente, pode-se lançar mão dos métodos estatísticos, que utilizam um método determinístico definido pelo projetista como base de cálculo, com a diferença de que associam funções de distribuição de probabilidade às variáveis envolvidas no problema, tais como coesão, ângulo de atrito e peso específico dos materiais, resultando, deste modo, em uma infinidade de fatores de segurança como resposta da análise. Este fator de segurança também se distribui em uma função e dela se pode obter um fator de segurança médio e a probabilidade de ruptura da estrutura em análise.

O método estatístico envolve termos e conceitos que não são familiares para muitos engenheiros e, portanto, não é muito difundido no meio prático

(DUNCAN, 2005). Apesar disso, para obras de grande porte, a possível economia gerada pelo uso de um fator de segurança adequado pode compensar o maior gasto com análises geotécnicas.

Tendo em vista essa perspectiva, este trabalho se propõe a comparar os resultados entre as análises determinísticas e estatísticas.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRAFICA

### 2.1 TIPOS DE BARRAGENS

Barragem pode ser definida como sendo um elemento estrutural, construída transversalmente à direção de escoamento de um curso d'água, destinada à criação de um reservatório artificial de acumulação de água (MARANGON, 2004).

Segundo Cruz (2004) a construção de barragens é verificada em quase todas as culturas e se dá paralelamente à história da humanidade, tendo como objetivo a reserva de água para consumo e irrigação. De acordo com o autor, apesar de a prática de construção ser antiga, houve um aumento significativo tanto em quantidade quanto em altura das barragens somente no século XX.

Hoje em dia barragens podem ter diversas finalidades, servindo para navegações, turismo, formação de reservatórios para hidrelétricas, contenção de águas e controle de enchentes. Em todos estes casos, as tecnologias e conhecimentos para construção de barragens evoluíram e deram origem a dois grandes grupos: o das barragens convencionais, que são mais utilizadas e cujo mecanismo é objeto de pesquisas, e o das barragens não convencionais, que inclui barragens que são pouco utilizadas ou que caíram em desuso (COSTA, 2013).

Há diversas formas de classificação de barragens. Quintas (2002) apresenta em sua tese de mestrado uma possível forma de classificação por tipos, sendo estes:

- Barragem de Gravidade, que tem sua estabilidade garantida pelo peso da estrutura de concreto;
- Barragem em Arco, construídas em concreto e caracterizadas por sua grande esbeltez;
- Barragem de Contrafortes, que são barragens de concreto que usam os contrafortes para estabilizar a barragem e economizar material;
- Barragem de Aterro, construídas em terra e/ou enrocamento.

Nos itens a seguir são apresentadas algumas subdivisões e caracterizações mais aprofundadas acerca das propriedades das barragens de aterro, que são objeto deste trabalho.

### 2.1.1 Barragem de Terra

As Barragens de Terra fazem parte do grupo das Barragens de Aterro, que inclui também as Barragens de Enrocamento e as Barragens Mistas, e são assim designadas dado serem constituídas principalmente com solos ou mistura de solos com pequenos fragmentos de rocha (QUINTAS, 2002).

Conforme Costa e Lança (2001), as barragens de terra podem ser construídas em condições menos favoráveis para fundações e devido à evolução das técnicas de terraplenagem, seus materiais exigem menos rigor quanto às suas propriedades. Em outras palavras, sua concepção pode incluir uma grande diversidade, tanto de materiais quanto de fundações, o que faz desse tipo de barragem uma opção mais flexível.

Quanto à algumas características construtivas, de acordo com Quintas (2002), as barragens de terra possuem geometria trapezoidal, sendo constituídas homogeneamente por terra ou com faixas ou zonas de materiais. Ainda segundo o autor, para que a barragem tenha um desempenho satisfatório de sua função durante a vida útil da estrutura é necessário que se garantam algumas condições, sendo elas:

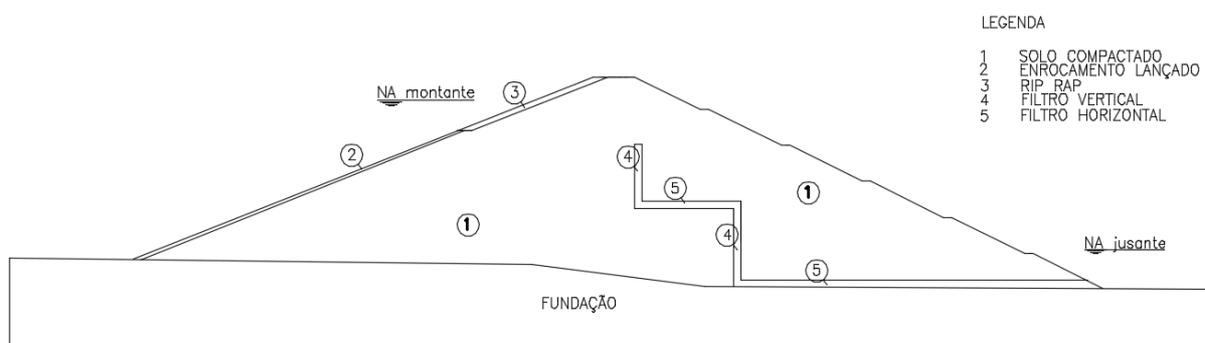
- Baixa permeabilidade, a fim de que seja assegurada a estanqueidade da estrutura. Essa condição é válida tanto para a barragem quanto para a sua fundação.
- Estabilidade do corpo da barragem, verificada através de sua geometria;
- Proteção contra ondas, a montante da barragem;
- Proteção a jusante, de acordo com as condições climáticas do local da construção da barragem;
- Drenagem eficiente, para evitar subpressões;
- Controle de recalques;

Quanto aos fatores de construção e manutenção, FAO (2011) discorre sobre as principais vantagens e desvantagens das barragens de terra. Dentre as vantagens citadas estão a possibilidade de utilização de materiais naturais locais, a boa distribuição de cargas na fundação devido à sua base larga e a melhor capacidade de resistência em comparação à estruturas mais rígidas, como, por

exemplo, uma barragem de concreto, quando assentadas em locais onde há incidências mais frequentes de movimentos do solo.

Quanto às desvantagens, o autor chama a atenção sobre os problemas provenientes durante a construção, como, por exemplo, a necessidade de um controle de compactação das camadas para evitar uma barragem estruturalmente frágil, com consequentes pontos preferenciais de infiltração e problemas de erosão. Outra questão levantada por FAO (2011) é a obrigação de uma contínua manutenção nos espaldares, a fim de se reparar estragos feitos por animais assim como evitar crescimentos de vegetais no corpo da barragem.

A Figura 1 apresenta um exemplo de seção transversal de uma barragem de terra juntamente com seus componentes típicos.



**Figura 1 – Seção transversal de uma barragem de terra**  
**Fonte: Autoria própria**

### 2.1.2 Barragem de Enrocamento

De acordo com Divino (2010), o emprego de enrocamentos em barragens iniciou-se em 1850, com a finalidade de se reservar água. Na ocasião, mineiros da região de Sierra Nevada, Califórnia, aliaram o enrocamento abundante da região juntamente com suas técnicas de remoção deste material, tornando, então, possível a sua utilização. Segundo o autor, as técnicas de compactação na época ainda não eram empregadas, entretanto, já se conhecia a noção de resistência do material rochoso. Por fim, a madeira era utilizada como material vedante da barragem.

Como descrito por Costa (2013), as barragens de enrocamento são compostas por frações de rocha compactadas em seus espaldares e por um núcleo vedante, ou, no lugar do núcleo podem possuir vedação em sua face de montante.

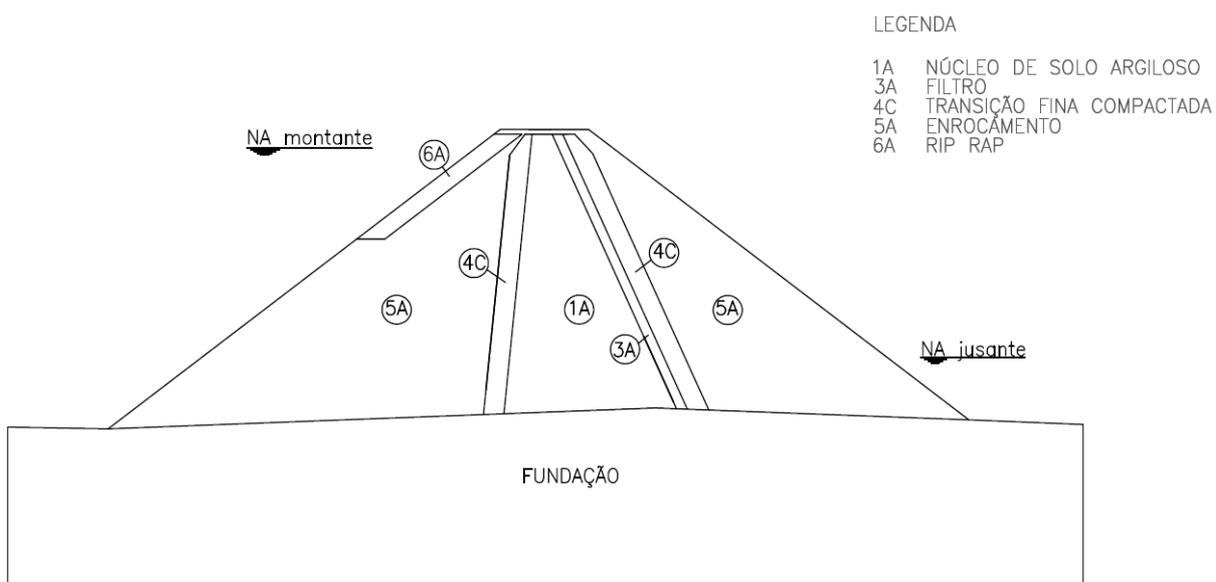
Fernandes (2007) caracteriza barragem de enrocamento com núcleo de argila como sendo um tipo de estrutura na qual utiliza-se a argila como material

impermeável no núcleo e o enrocamento em seus espaldares com função de fornecer estabilidade à estrutura. De acordo com o autor, por possuir maior ângulo de atrito, a utilização do enrocamento possui algumas vantagens em relação à barragem de terra, como por exemplo, o emprego de menor quantidade de materiais e também a construção de taludes do núcleo vedante mais verticalizado. Por fim, Fernandes alerta sobre a necessidade de disponibilidade dos materiais nas proximidades do local da obra para esta opção de barragem.

Observa também Divino (2010), que uma preocupação importante acerca das barragens de enrocamento com núcleo são as compatibilizações entre as deformações do enrocamento e do núcleo vedante, a fim de se evitar a formação de fissuras no núcleo. Outra questão abordada pelo autor é a constante atenção com relação à formação de trincas e fissuras em barragens de enrocamento em geral, tendo como principal foco o cuidado com a segurança estrutural.

Com a evolução dos métodos de compactação de enrocamentos, trincheiras de vedação e impermeabilização das juntas, houve uma crescente utilização da barragem de enrocamento com face de concreto na última década, sendo utilizada, inclusive, nas barragens maiores que 100 metros de altura (MARANGON, 2004).

A Figura 2 apresenta uma seção típica de barragem de enrocamento.



**Figura 2 - Seção transversal de uma barragem de enrocamento**  
 Fonte: Adaptado de BSMTIT (2014)

## 2.2 ESTABILIDADE DE TALUDES

Compreende-se por taludes quaisquer superfícies inclinadas que limitam um maciço de terra, de rochas ou ambos. Podem ser naturais, como as encostas, ou artificiais, como os taludes de aterros (SILVA, 2013).

Os taludes artificiais são utilizados em obras que exijam terraplenagem como rodovias, ferrovias e edificações e em obras que necessitam de um barramento contra água, solo ou rocha como canais e represas. Com o avanço da sociedade aumentam as demandas humanas por obras deste tipo devido ao crescimento urbano e a consequente exploração de novas áreas, por isso o estudo da estabilidade de taludes tem ganhado cada vez mais relevância (FERREIRA, 2012).

Por outro lado, à medida que aumentam as proporções das obras, as incertezas quanto ao grau de segurança associadas podem traduzir-se em custos muito elevados e, aliado a isso, tem-se o aumento da complexidade dessas análises. Segundo Silva (2013), o maciço de terra por apresentar grande heterogeneidade juntamente com o seu histórico de tensões torna-se algo difícil de ser analisado.

Para se compreender o comportamento de um talude é necessário que se conheça os tipos de ruptura e como cada um deles deve ser tratado, no tópico a seguir são apresentadas as classificações dos modos de ruptura.

### 2.2.1 Modos de ruptura

Há uma infinidade de autores com diferentes classificações para os movimentos de massa de terra. Estas classificações levam em consideração algumas características como, por exemplo, o material, a profundidade da ruptura, as velocidades e direção do movimento, profundidade de raio de alcance, superfície de ruptura, estado de tensões e potencial destrutivo (FERNANDES, 2010).

De acordo com Tominaga *et al.* (2009), uma das classificações mais empregadas internacionalmente é a classificação de Varnes (1978), devido à sua simplicidade. Essa classificação leva em consideração o tipo de movimento e as características do material da massa conduzida.

Na tabela abaixo apresenta-se um resumo da classificação proposta por Varnes (1978).

**Tabela 1: Classificação de Varnes (1978)**

MODOS DE RUPTURA	TIPO DE MATERIAL		
	ROCHA	SOLOS GRANULARES	SOLOS COESIVOS
Queda	Queda rochosa	Quedas de detritos	Quedas de terra
Tombamento	Tombamento rochoso	Tombamento de detritos	Tombamento de terra
Escorregamento	Rotacional	Escorregamento rochoso	Escorregamento de detritos
	Translacional		
Espalhamento lateral	Espalhamento rochoso	Espalhamento de detrito	Espalhamento de terra
Fluxo	Rastejo rochoso		Rastejo de solo
Complexo	Combinação de dois ou mais tipos de ruptura		

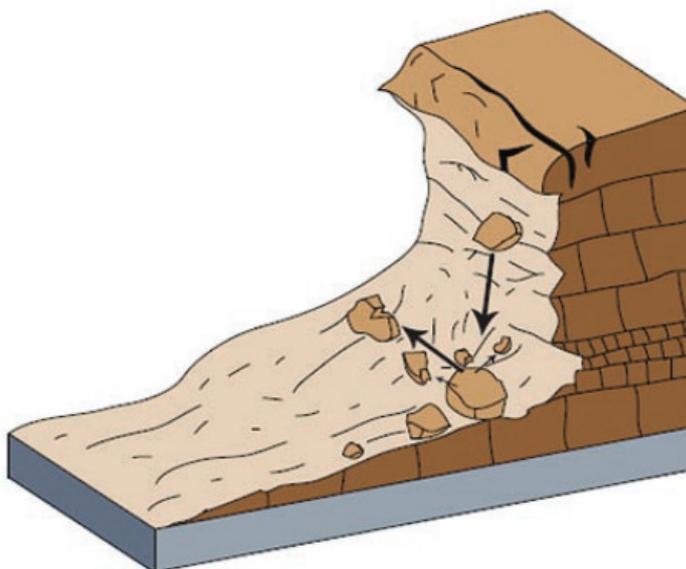
**Fonte: Adaptada de Varnes (1978)**

Nos tópicos a seguir são abordadas as características de cada um dos tipos de ruptura na visão de vários autores, tomando-se como base a classificação proposta por Varnes (1978).

- Quedas

Segundo Fernandes (2010), neste tipo de ruptura o solo ou a rocha se desagregam do talude para, posteriormente, romper por queda, salto ou rolamento. O autor complementa que a movimentação neste tipo de ruptura é bastante veloz e que antes da desagregação do maciço de origem pode ou não ocorrer movimentos mais amenos.

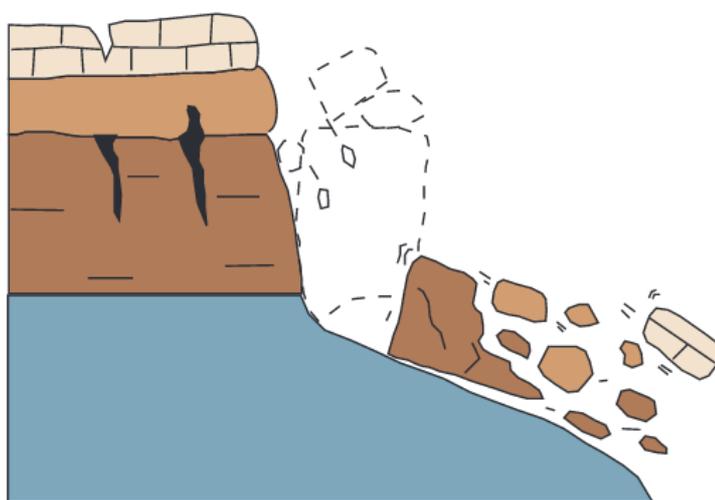
Para Augusto Filho (1992) os movimentos podem ser do tipo queda livre ou em plano inclinado, sem planos de deslocamento e com geometria variável.



**Figura 3 - Ruptura por Queda**  
**Fonte: Highland e Bobrowsky (2008)**

- Tombamento

Neste tipo de movimento ocorre rotação em torno de um ponto abaixo do centro de gravidade de um ou vários blocos, ou por meio de forças aplicadas por blocos vizinhos, ou ainda por fluidos passantes nas fissuras. Dependendo da inclinação do talude e da orientação de suas discontinuidades, pode culminar ou não com a queda ou deslizamento. Pode incidir em diversos tipos de rochas, solos granulares ou coesivos, podendo movimentar desde algumas centenas até a milhares de metros cúbicos de material (FERNANDES, 2010).



**Figura 4 – Ruptura por tombamento**  
Fonte: Highland e Bobrowsky (2008)

- Escorregamentos

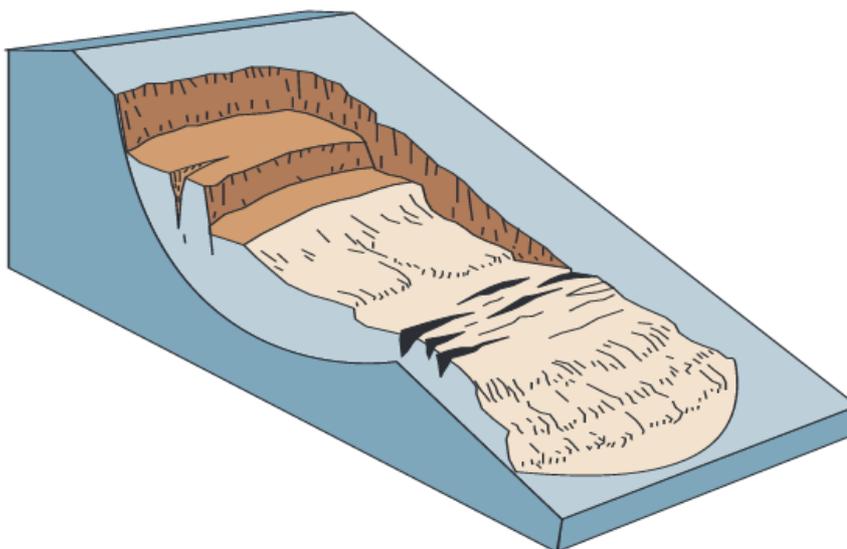
Ocorre sobre superfícies delgadas e com intensa deformação por cisalhamento, em declive. Pode ocorrer com massa de solo ou rocha. Caracteriza-se por aumentar progressivamente a partir de uma massa de material inicialmente deslocado (HIGHLAND;BOBROWSKY, 2008).

Segundo Augusto Filho (1992) as velocidades neste tipo de ruptura são médias a altas, podem deslocar pequenos ou grandes volumes de material e com poucos planos de deslocamento.

De acordo com Varnes (1978) esse tipo de escorregamento pode ser subdividido entre rotacional e translacional. Podendo ocorrer em rocha, solos granulares e solos coesivos.

Para Highland e Bobrowsky (2008) no escorregamento rotacional a superfície de ruptura é curvada e o movimento que o caracteriza é o circular em torno de um eixo paralelo ao contorno do talude.

Augusto Filho (1992) complementa que estão sujeitos a escorregamentos circulares solos espessos e homogêneos e rochas muito fraturadas.

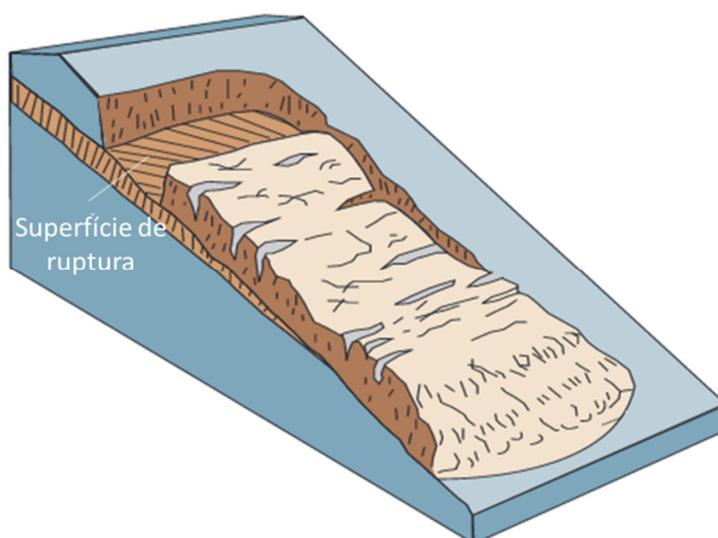


**Figura 5 - Escorregamento rotacional**  
Fonte: Highland e Bobrowsky (2008)

Conforme Augusto Filho (1992) o escorregamento planar ocorre em solos pouco espessos e solos e rochas com um plano de fraqueza.

Para Tominaga *et al.* (2009) esse tipo de ruptura é o mais comum dentre todos os movimentos de massa e é diretamente causado pela heterogeneidade dos solos e descontinuidade de rochas. No caso de rochas, os movimentos se dão nos planos de fraqueza devido à própria estrutura geológica do maciço, tais como estratificação, xistosidade, falhas, juntas de alívio, dentre outros. Já no caso de solos, o autor comenta que os movimentos ocorrem em uma superfície plana, moldada pelo substrato, e que em linha gerais o movimento é de curta duração, grande velocidade e altamente destrutivo.

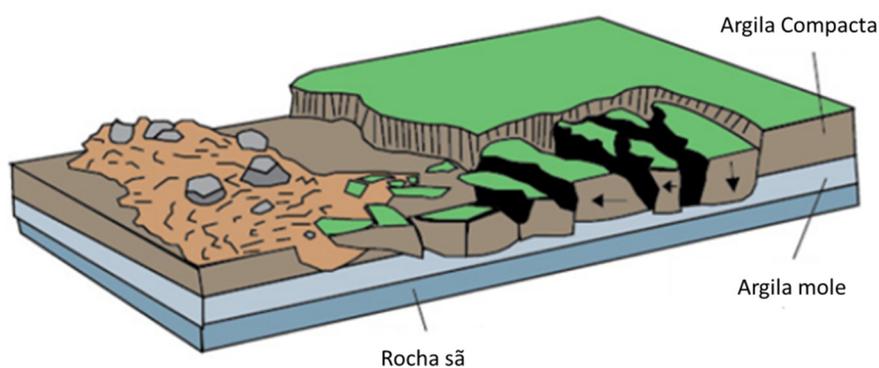
De acordo com Highland e Bobrowsky (2008), escorregamentos planares podem alcançar grandes distâncias, dependendo da inclinação da superfície de ruptura.



**Figura 6 - Escorregamento Translacional**  
 Fonte: Adaptado de Highland e Bobrowsky (2008)

- Espalhamento

O espalhamento é caracterizado pela ruptura e espalhamento de solos e rochas que se encontram próximo à materiais que sofreram colapso, o que acarreta um alívio de tensões temporário na interface entre esses materiais. O material próximo pode sofrer vários tipos de ruptura, como por exemplo, rotação, translação, escoamento e desintegração (FERNANDES, 2010).

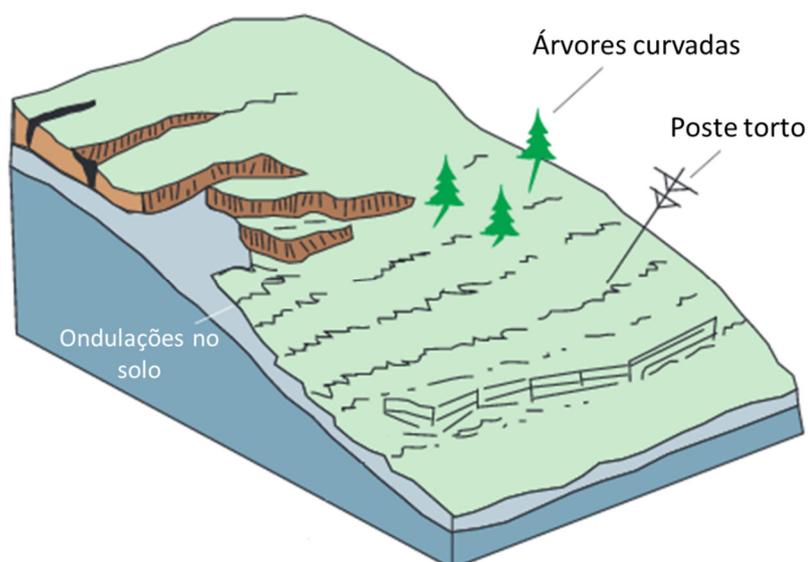


**Figura 7 - Espalhamento Lateral**  
 Fonte: Adaptado de Highland e Bobrowsky (2008)

- Fluxos lentos de terra

Rastejo ou *creep* é o nome informal dado ao fluxo lento de terra e consiste de um movimento vagaroso, imperceptível e contínuo, para baixo do solo que forma o talude (HIGHLAND; BOBROWSKY, 2008).

De acordo com Augusto Filho (1992), essa forma de movimento se dá em vários planos de deslocamento, com velocidade muito baixas, da ordem de centímetros por ano, podendo ainda serem decrescentes à medida em que se encontram mais profundas. Os movimentos podem ser sazonais, constantes ou intermitentes, ocorrendo com geometria indefinida em solos, depósitos e rochas fraturadas.



**Figura 8 - Ruptura por rastejo**  
 Fonte: Adaptado de Highland e Bobrowsky (2008)

- Movimentos complexos

Movimentos complexos, como explicitado por Varnes (1978), são combinações de dois ou mais tipos de movimentos.

Para Fernandes (2010) esta forma de ruptura é mais comum do que qualquer tipo de movimento isoladamente, com destaque para as combinações do tipo queda e rolamento de blocos a escoamentos de materiais granulares ou escorregamentos e escoamentos de solos e detritos.

- Avalanches ou erosões violentas

Em complemento aos fluxos, Massad (2003) discorre sobre avalanches ou erosões violentas, também comumente conhecido como “desastres naturais”, devido ao seu alto poder destrutivo. Tradicionalmente ocorrem após longos períodos de chuva, têm curta duração, grandes velocidades e são altamente catastróficos. Podem transportar desde lama e areia até árvores e blocos de rocha a longas distâncias.

A barragem abordada neste trabalho está sujeita à ruptura do tipo escorregamento rotacional, pois possui no seu espaldar uma camada espessa e homogênea de solo coesivo sem a presença de plano de fraqueza. A estabilidade de taludes regidos por esse tipo de ruptura pode ser feita segundo as análises determinísticas e estatísticas. Ambas serão tratadas no tópico seguinte.

## 2.2.2 Envoltórias de Resistência

A resistência ao cisalhamento do solo pode ser entendida como sendo a resistência interna mobilizada pelo solo, por unidade de área, para suportar rupturas em quaisquer planos no seu interior (BRAJA, 2007). Segundo o autor, para que haja compreensão de problemas tais como a estabilidade, é necessário que se tenha conhecimento acerca deste assunto.

Neste trabalho serão apresentadas duas envoltórias de resistência, sendo elas a Envoltória de Mohr- Coulomb (envoltória linear) e a Envoltória de Leps (envoltória não linear).

- Envoltória de Mohr- Coulomb

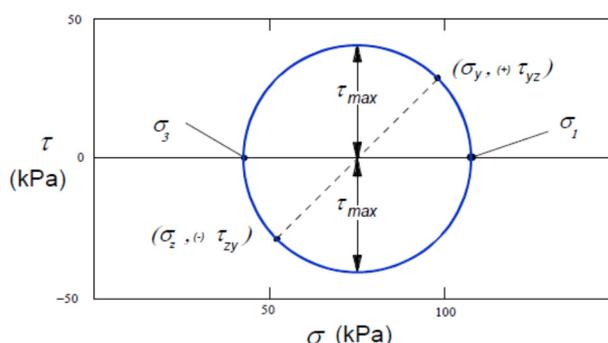
O Círculo de Mohr é uma representação gráfica do estado de tensão em um ponto do meio contínuo, extremamente útil para todos os problemas de tensão e deformação (ORTIGÃO, 2007).

O critério de ruptura de Mohr- Coulomb segue a seguinte equação:

$$\tau' = c' + \sigma' \operatorname{tg}\Phi' \quad (1)$$

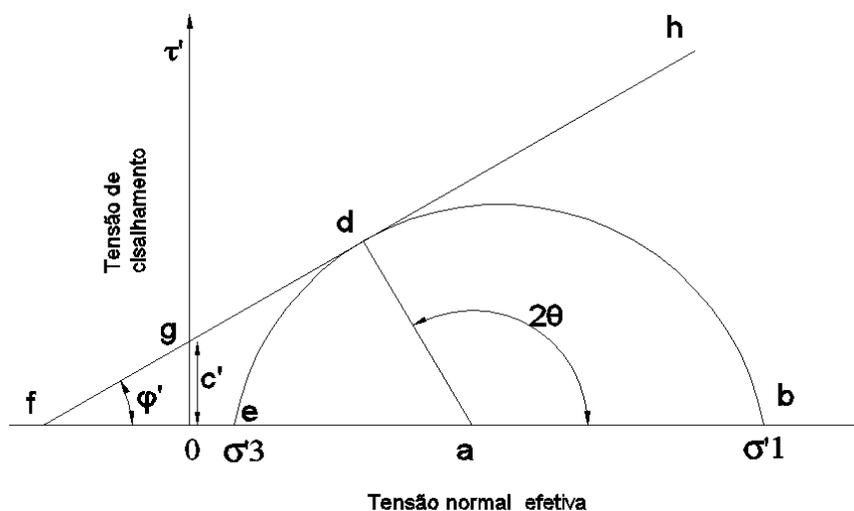
Em que  $\tau'$  é a resistência ao cisalhamento,  $c'$  é a coesão,  $\sigma'$  é a tensão normal ao plano de ruptura e  $\Phi'$  é o ângulo de atrito interno do material.

Na figura abaixo são representados o Círculo de Mohr e seus elementos



**Figura 9: Elementos do Círculo de Mohr**  
Fonte: Ortigão (2007)

O traçado da envoltória de ruptura é representada através da figura abaixo, pela reta  $\overline{fh}$ .



**Figura 10: Traçado da envoltória linear de ruptura**  
 Fonte: Adaptado de Braja (2007)

Segundo Braja (2007) é possível obter os parâmetros de resistência ao cisalhamento através de ensaios laboratoriais, tais como os ensaios de cisalhamento direto, cisalhamento simples, triaxial, triaxial de deformação plana e de cisalhamento anular (*ring shear*).

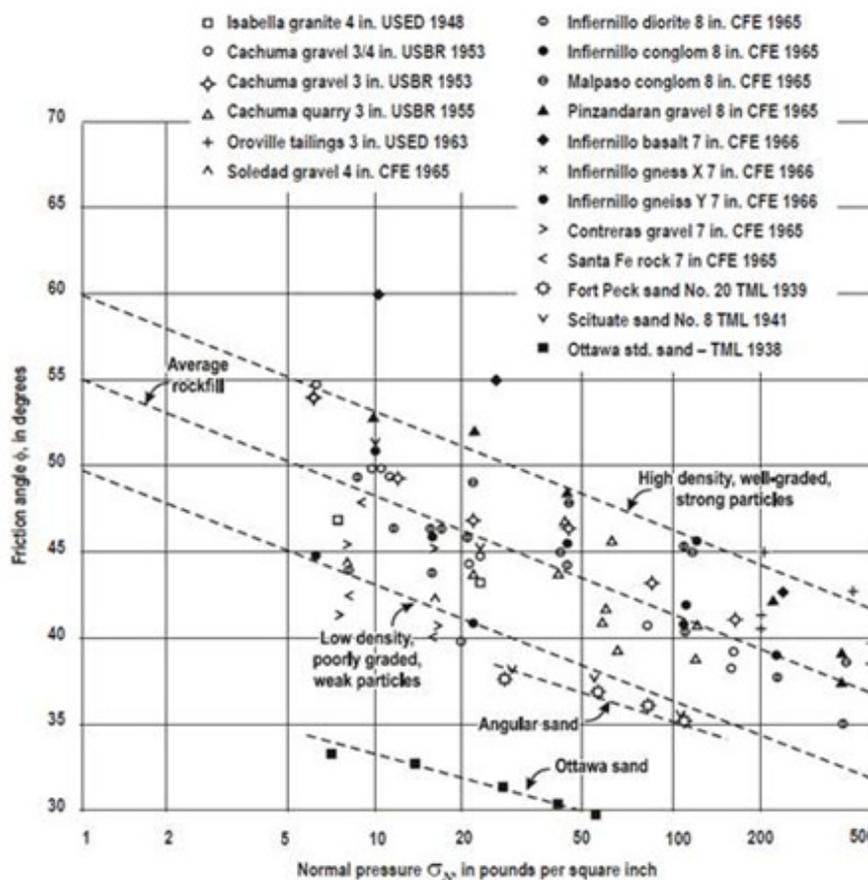
Encontrados os parâmetros pode-se, então, traçar o Círculo de Mohr e encontrar a envoltória de resistência do material.

- Envoltória de Leps

Como descrito por Maia (2001), Thomas M. Leps realizou na década de setenta 100 ensaios triaxiais empregados em 15 tipos de rochas diferentes para obter as tensões e sua relação na resistência ao cisalhamento destes materiais.

A Envoltória de Leps, assim como a envoltória de Mohr Coulomb, também serve para representar a resistência do material, porém, de forma não linear servindo para taludes em enrocamento.

Na figura abaixo apresenta-se o gráfico proposto por Leps para a obtenção da envoltória de resistência típica.



**Figura 11: Variação do ângulo de atrito em função da tensão normal**  
**Fonte: Leps (1970)**

### 2.3 ANÁLISE DETERMINÍSTICA

Análise determinística é a análise quantitativa expressa sob a forma de um coeficiente ou fator de segurança. A definição mais usada para o fator de segurança (FS) de estabilidade de taludes é (DUNCAN, 2005):

$$FS = \frac{\text{resistência ao cisalhamento do solo}}{\text{tensão de cisalhamento requerida para o equilíbrio}} \quad (2)$$

O fator de segurança, sob esta definição, expressa portanto, o quão menor pode ser a resistência ao cisalhamento considerada de modo que o talude continue estável. Para um fator de segurança igual a 1,0 as forças de desestabilização são iguais às forças de resistência ao escorregamento, estando o maciço, então, no limite do seu equilíbrio. Já para fatores maiores que 1,0 o talude apresenta-se estável, ao passo que para fatores menores do que 1,0 não há um significado físico.

A análise determinística de estabilidade de taludes é composta por dois grandes grupos. De um lado temos os métodos baseados em análise de

deslocamentos, representado principalmente pelo método dos elementos finitos. Do outro, tem-se os métodos que se baseiam no estado de equilíbrio limite, que são métodos mais tradicionais e difundidos devido à facilidade de aplicação e a larga experiência acumulada (TONUS, 2009).

Os métodos de equilíbrio limite, que serão utilizados neste trabalho, partem de alguns pressupostos (MASSAD 2003):

- Solo se comportando como material rígido-plástico, rompendo bruscamente sem se deformar;
- Equações de equilíbrio estático válidas somente até a iminência da ruptura, após esse momento o comportamento passa a ser dinâmico;
- O coeficiente de segurança é considerado constante ao longo da superfície de ruptura, apesar de que isto só se verifica em solos de comportamento dúctil. Nos solos de comportamento frágil o coeficiente não é constante e o fenômeno de ruptura progressiva é desprezado.

Os problemas de estabilidade de taludes através do Método do equilíbrio limite têm mais incógnitas que o número de equações de equilíbrio disponíveis. Devido a isso, muitos autores adotam diferentes hipóteses de modo a tornar o problema estaticamente determinado.

Processos de análise que atendem a todas as equações de equilíbrio, forças e momentos, são ditos métodos rigorosos e as hipóteses adotadas para sua determinação não tem grande influência nos resultados, ao contrário do que pode acontecer com métodos que não satisfazem todas as equações de equilíbrio estático (DUNCAN, 1996).

Os métodos rigorosos se tornaram viáveis após o avanço dos computadores e são usados geralmente para checar análises feitas por métodos mais simples (TONUS, 2009).

Métodos que consideram uma superfície de ruptura circular podem ser resolvidos através de dois métodos. O primeiro deles é através do Procedimento das Massas, processo no qual a massa de solo acima da superfície de ruptura é tratada como um todo. Já o segundo método, o Método das Fatias, divide o solo acima da face de ruptura em lamelas, cujas estabilidades são verificadas individualmente (BRAJA, 2007).

Observa ainda Braja (2007), que o Procedimento das Massas apresenta resultados confiáveis quando se pode admitir que o solo do talude é homogêneo. O

autor lembra também que o Método Comum das Fatias quase não é utilizado nos dias de hoje por ser considerado muito conservador.

Uma das derivações do Método Comum das Fatias que apresenta resultados mais apurados é o Método de Bishop Simplificado que será abordado a seguir.

### 2.3.1 Método do Equilíbrio Limite de Bishop

Bishop (1955) propôs um método para análise de estabilidade de taludes mais refinado que o Método Comum das Fatias, no qual se divide a cunha de escorregamento em diversas lamelas levando em conta as reações entre as fatias vizinhas, porém, só até certo ponto (BRAJA, 2007). O método proposto considera as forças de interação entre as fatias como sendo apenas horizontais. Este método é conhecido como Método de Bishop Simplificado.

Muitos autores vêm estudando este método e comparando-o com outros com objetivo de verificar sua validade. Tonus (2009), ao analisar uma encosta coluvionar e residual da Serra do Mar paranaense, obteve resultados pelo método de Bishop variando do método de Spencer apenas na terceira casa decimal. Segundo Braja (2007) o método simplificado de Bishop é provavelmente o mais utilizado hoje em dia e quando incorporado a programas de computador apresenta resultados satisfatórios na maioria dos casos.

Apesar da simplificação, neste método o fator de segurança ( $F_s$ ) está presente nos dois lados da equação, assim como no método original, tornando necessário um procedimento iterativo para sua determinação. Várias superfícies de ruptura devem ser investigadas de modo a encontrar a superfície crítica que forneça o fator de segurança mínimo. Na Figura 12 apresentada a seguir mostra-se uma fatia genérica e as forças relacionadas a essa fatia.

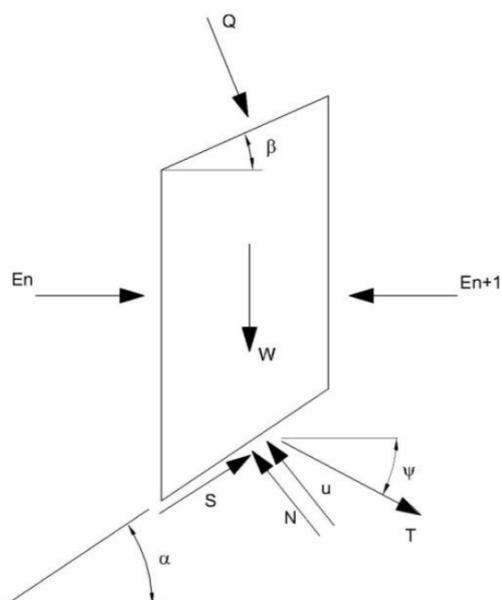


Figura 12 – Fatia genérica com as forças atuantes no sistema (Método de Bishop)  
Fonte: Conceição (2011)

Em que:

W = peso da fatia;

Q = sobrecarga;

T= força resultante da tração no reforço;

S= força de cisalhamento atuante na fatia;

N= força normal à fatia;

En= força horizontal devido às fatias adjacentes;

u = poropressão atuante na fatia;

β = inclinação na parte superior da fatia;

Ψ = inclinação do reforço;

α = inclinação da parte inferior da fatia com a direção horizontal.

Na equação (3) apresentada a seguir pode-se ver o fator de segurança constante em ambos os lados da equação e os outros parâmetros de interesse para sua determinação.

$$F_s = \frac{\sum (c' b + W \tan \phi') \frac{1}{m_\alpha}}{\sum W \tan \alpha} \quad (3)$$

Sendo:

$$m_\alpha = \cos \alpha + \frac{\tan \phi' \sin \alpha}{F_s} \quad (4)$$

O erro associado a este método é reduzido quando comparado a outros métodos, raramente excedendo os 7% (SILVA, 2010).

### 2.3.2 Método do Equilíbrio Limite de Spencer

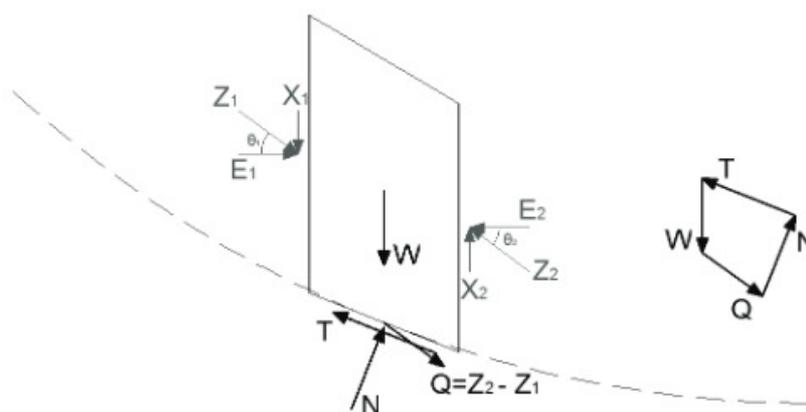
Este método foi apresentado por Spencer (1967) e satisfaz todas as equações de equilíbrio estático, sendo considerado, portanto, um método rigoroso. Além disso, assim como no Método de Bishop, é aplicado para ruptura de superfícies circulares (CRUZ, 2004).

Devido à utilização de todas as equações de equilíbrio, este método é considerado mais acurado que o de Bishop (HO, 2014).

Enquanto o Método de Bishop Simplificado leva em consideração somente as equações de equilíbrio com relação ao momento, o Método de Spencer leva em conta, além do momento, as forças entre fatias (BRAJA, 2007).

O método admite que as forças entre as fatias são paralelas entre si, com ângulo constante, assim como o fator de segurança, são obtidos de forma iterativa assim como no método de Bishop. Os cálculos são repetidos até que o equilíbrio de forças e momentos seja satisfeito para todas as fatias. Esse procedimento requer o uso de ferramenta computacional (USACE, 2003).

As forças atuantes sobre uma fatia genérica podem ser vistas na Figura 13 apresentada a seguir.



**Figura 13 - Fatia genérica com as forças atuantes no sistema (Método de Spencer)**  
 Fonte: Silva (2009)

Em que:

$W$  = peso da fatia;

$Q$  = força resultante em cada fatia;

$T$  = força resultante de tração no reforço;

$N$ = força normal à fatia;

$X_n$ = força vertical atuante na fatia;

$E_n$ = força horizontal devido às fatias adjacentes;

$Z_n$ = força resultante atuante na fatia;

$\theta$ = inclinação da força atuante  $Z_n$  em relação à direção horizontal.

A partir do equilíbrio de forças nas direções normal e tangencial da fatia e adotando o critério de ruptura de Mohr- Coulomb, a resultante  $Q$  em cada fatia pode ser dada pela equação (5):

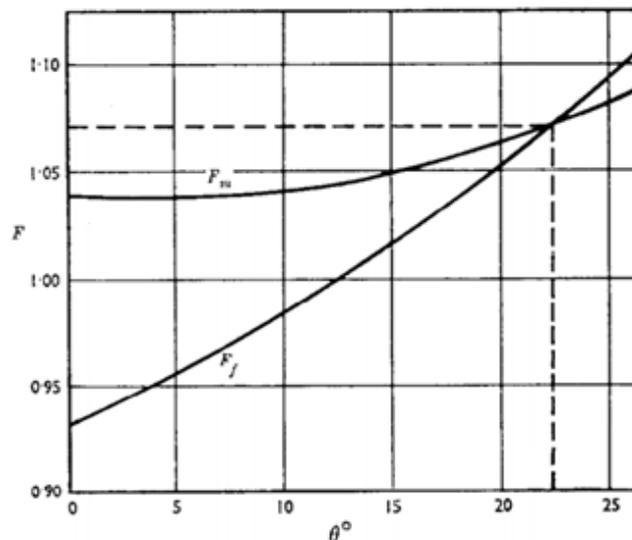
$$Q = \frac{\frac{c'.b.\sec\alpha}{FS} + \frac{\text{tg}\theta'.(h.\cos\alpha - u.b.\sec\alpha)}{FS} - W\text{sen}\alpha}{\cos(\alpha - \theta) \cdot [1 + \frac{\text{tg}\theta.\text{tg}(\alpha - \theta)}{FS}} \quad (5)$$

Como a soma dos momentos das forças entre as fatias em relação ao centro de rotação é nula e o  $R$  é constante, pois se trata de uma superfície circular, chega-se à equação (6) e, posteriormente, à equação (7).

$$R \sum \cos(\alpha - \theta) = 0 \quad (6)$$

$$\sum Q \cdot \cos(\alpha - \theta) = 0 \quad (7)$$

Para cada ângulo  $\theta$  arbitrado, acha-se o  $FS$  para o equilíbrio de forças, o  $FS_f$  e o  $FS$  para o equilíbrio de momentos, o  $FS_m$ , traçando-se, por fim, o gráfico mostrado na Figura 14 abaixo. No encontro das duas curvas encontra-se o  $FS$  requerido.



**Figura 14: Gráfico para obtenção do FS.**  
 Fonte: Adaptado de Spencer (1967).

Apesar de ter sido desenvolvido por Spencer como um método 2D, com o avanço da capacidade de processamento e barateamento dos computadores Jiang e Yamagami (2004) propuseram um método expandido de Spencer para aplicações em 3D.

## 2.4 ANÁLISE PROBABILÍSTICA

O fator de segurança, obtido através dos métodos de determinação de estabilidade de taludes, é um indicativo numérico de que o talude estudado é estável sob as condições estudadas. Matematicamente um fator de segurança 1,0 indica que os fatores estabilizadores estão em perfeito equilíbrio com os fatores desestabilizadores e que sob estas condições o talude seria seguro (DUNCAN; WRIGHT, 2005).

Por outro lado, os parâmetros utilizados para alimentar as equações que determinam o fator de segurança apresentam diversas incertezas e estão sujeitos a variações *in situ*, deste modo, são necessários fatores de segurança mais elevados para que se garanta a estabilidade de determinado talude. Como ressalta Silva (2006), há a possibilidade desse conjunto de incertezas acarretar um fator de segurança menor do que a unidade, podendo portanto, o talude romper sob determinadas condições.

As normas que tratam de estabilidade de taludes, para contornar o problema da variabilidade dos parâmetros, apresentam tabelas de fatores de segurança mínimos sob dadas condições, garantindo que a resistência ao cisalhamento para o talude projetado possa ser na realidade menor que a calculada sem que ocorra o rompimento do mesmo. É o caso dos critérios recomendados pela Eletrobrás (2003), que exige fatores de segurança adequados para cada caso de carregamento.

Estes valores tabelados de fator de segurança, quando bem empregados garantem a integridade da obra, desde que a variabilidade dos parâmetros utilizados no seu dimensionamento esteja dentro dos mesmos intervalos das variabilidades utilizadas para determinação dos fatores da norma, caso contrário, a norma pode não estar atendendo o critério de segurança necessário para o talude em questão (DUNCAN; WRIGHT, 2005).

Na Figura 15, são mostrados dois casos de exemplo de distribuição de fator de segurança, expostos por Maia (2003), sendo que o primeiro deles, o caso A, apresenta um fator de segurança de 1,5 e um desvio padrão de 0,25. Já o caso B, apresenta um fator de segurança de 2,0 e um desvio padrão de 0,80. Como se pode constatar, o desvio padrão do caso B é muito maior, mostrando que apesar de o fator de segurança ser comparativamente mais alto, a sua probabilidade de ruptura também é maior.

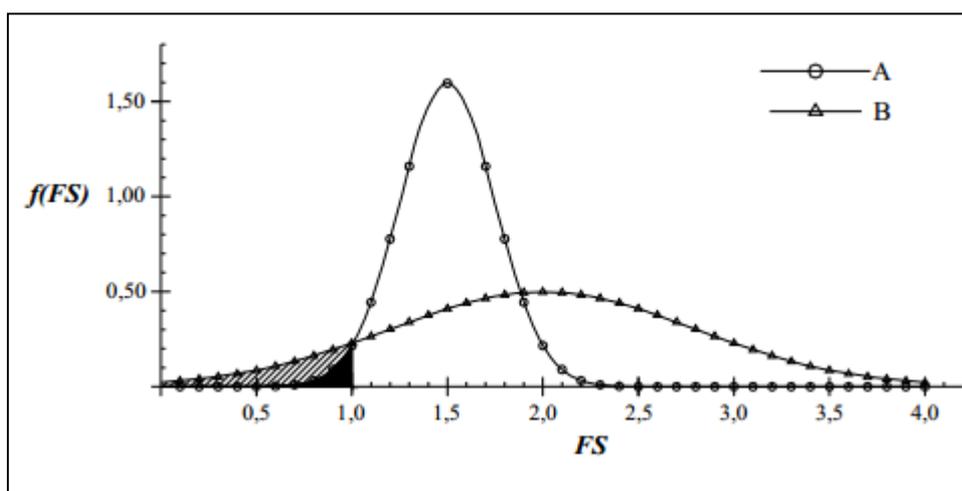


Figura 15 – Comparação entre dois casos de distribuição do fator de segurança  
Fonte: Maia (2003).

Ao se considerar o desvio padrão das variáveis aplicando-as em um método probabilístico, obtém-se uma infinidade de valores de fator de segurança, através dos quais se obtém a probabilidade de ruptura e o índice de confiabilidade da encosta associados ao fator de segurança adotado. Desta forma sabe-se com maior precisão os riscos associados à utilização de determinado fator de segurança no projeto. Segundo Silva (2006), a aceitação ou não da probabilidade de ruptura depende de diversos aspectos, tais como aspectos sociais, regionais e estruturais.

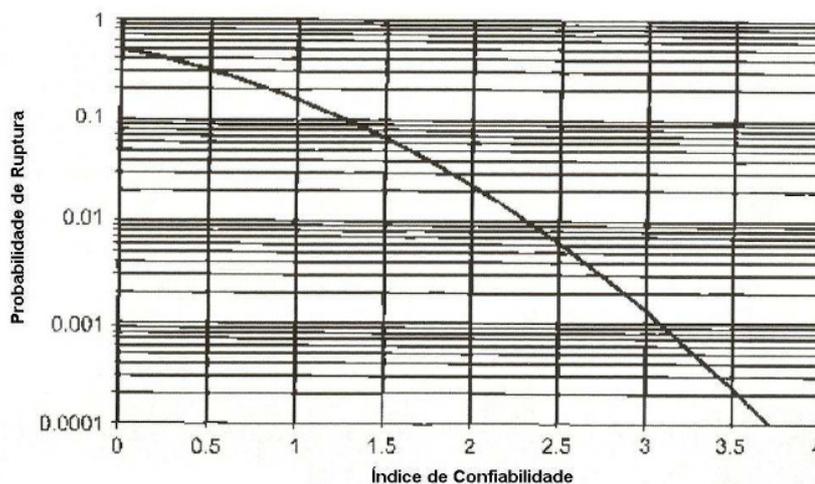
Como mostrado por Apaza e Barros (2014), para uma distribuição normal dos dados o índice de confiabilidade ( $\beta$ ) pode ser calculado pela seguinte expressão:

$$\beta = \frac{\mu_{FS}-1}{\sigma} \quad (8)$$

Em que  $\mu_{FS}$  é a média e  $\sigma$  é o desvio padrão do fator de segurança.

Com o índice de confiabilidade obtido, correlaciona-se o resultado em um gráfico, e obtém-se, então, a probabilidade de ruptura do talude em questão. Existem diversos gráficos de correlação entre índice de confiabilidade e

probabilidade de ruptura, que se diferem entre si por apresentarem resultados levando em consideração vários tipos de distribuição de fator de segurança. Para este trabalho, a distribuição considerada é a distribuição normal, como mostrada na Figura 16.



**Figura 16: Probabilidade de ruptura em função do índice de confiabilidade para uma distribuição normal de fator de segurança.**

**Fonte: Adaptado por Tonus (2009)**

Se houver dados suficientes é possível, inclusive, a criação de um mapeamento de risco geológico de uma região de forma a antecipar possíveis problemas. É desejável, portanto, que a análise probabilística seja prevista desde a fase de planejamento da obra, de modo a orientar a obtenção dos dados necessários, sua quantidade e espaçamento.

Segundo Duncan e Wright (2005), apesar de seu potencial, a análise estatística de taludes ainda não tem uso corrente na rotina geotécnica, pois envolve termos e conceitos não familiares para muitos engenheiros geotécnicos.

#### 2.4.1 Método de Monte-Carlo

O método de Monte Carlo é um método estatístico usado em várias áreas de conhecimento, e é considerado para problemas de estabilidade de taludes como um método direto e exato (FARIAS; ASSIS, 1998).

O método apresenta boa adaptabilidade à medida que trabalha com a possibilidade de variação dos dados de entrada.

Para que seja utilizado, é necessário primeiramente que se escolha o método determinístico que servirá como base.

Como discutido por Flores (2008), o método de Monte Carlo exige que se tenha informação prévia a respeito da função de densidade de probabilidade dos parâmetros variáveis envolvidos na análise. O autor ainda explica sobre o funcionamento do método, que, a partir dessas funções, impõe um valor a cada variável do problema, de forma aleatória, em cada uma das simulações. A partir disso, no término de todas as análises, o método constrói um histograma contendo as informações arquivadas de todas as simulações feitas, a partir do qual é possível traçar a função de probabilidade do fator de segurança.

Flores (2008) ressalta que a situação ideal seria realizar as análises de Monte Carlo em um conjunto de superfícies. Porém, vale ressaltar que este procedimento é feito para cada superfície de ruptura isoladamente, o que torna o procedimento custoso computacionalmente. Para amenizar o problema, EL-Ramly (2001) comenta que usualmente adota-se como superfície de ruptura crítica a mesma obtida pelo método determinístico, fazendo com que o conjunto de simulações seja feita apenas para esta superfície. EL-Ramly (2001) também afirma que nos casos em que as incertezas dos parâmetros utilizados nas análises afetam de maneira equivalente o fator de segurança, essas superfícies tendem a coincidir, caso contrário, essas superfícies podem ser consideravelmente diferentes.

Este método se destaca entre os outros por não exigir uma compreensão matemática e estatística tão aprofundada quanto os outros métodos, pois fornece uma função de distribuição de probabilidades sem que seja necessário assumir uma forma para a mesma e pelo fato de que o aumento do número de variáveis consideradas não aumenta a complexidade da análise. Por outro lado é raro que se use este método para estudo da variabilidade espacial das propriedades do solo e para variáveis aleatórias correlacionadas (EL-RAMLY, 2001).

Gama (2006) afirma ainda que, a aplicação do Método de Monte Carlo aos taludes é uma válida ferramenta para obter as probabilidades de colapso de um talude quando não são claramente conhecidas algumas das variáveis que interagem na estabilidade. O método, realizando numerosas simulações dessas incógnitas, permite obter uma distribuição da probabilidade nos casos em que a falta de informações constituiria um obstáculo.

Devido à sua facilidade de aplicação em computadores e pela sua capacidade de tratar variáveis aleatórias, este é um dos métodos mais utilizados para o cálculo de estabilidade de taludes (LONGO, 2005). Entre os muitos programas de computador que atualmente utilizam este método está o Slope/W da Geo-Studio International, que foi utilizado para o desenvolvimento deste trabalho.

### 3. METODOLOGIA

Neste capítulo serão apresentados os dados e procedimentos utilizados no desenvolvimento das análises propostas.

#### 3.1 SEÇÃO TRANSVERSAL

Uma barragem varia sua seção transversal ao longo de seu comprimento. Sendo assim para as análises de estabilidade de uma barragem escolhem-se seções transversais representativas destas variações ou seções onde se sabe de antemão haver maior probabilidade de ruptura.

A barragem em estudo é composta de terra, sendo que esta seção varia ao longo do eixo longitudinal da barragem. Para o presente trabalho foi analisada uma seção representativa da barragem. Esta seção foi considerada crítica devido às condições de sua geometria e características de sua fundação, levando-se em conta, por exemplo, as diferenças dos materiais nela utilizados, altura da barragem e nível freático do local quando em trechos distintos.

A seção crítica escolhida, denominada seção BT, contará com uma crista na cota 306,00 m, altura máxima de aproximadamente 50 metros, uma trincheira de vedação (*cut-off*), filtros internos, além de material de preenchimento interno (random). É caracterizada por ser constituída de zonas de materiais distintos, apresentando nos seus espaldares um material argilo-arenoso, no seu núcleo um solo argiloso, transições de areia, um rip-rap a montante para proteção contra ondas e um pé drenante constituído de enrocamento. A barragem possui também uma ensecadeira incorporada à montante, porém, não serão feitas análises para verificação de sua estabilidade, visto que o foco deste trabalho é o comportamento da barragem principal. Mais informações e detalhes da seção são mostradas na Figura 17 a seguir.

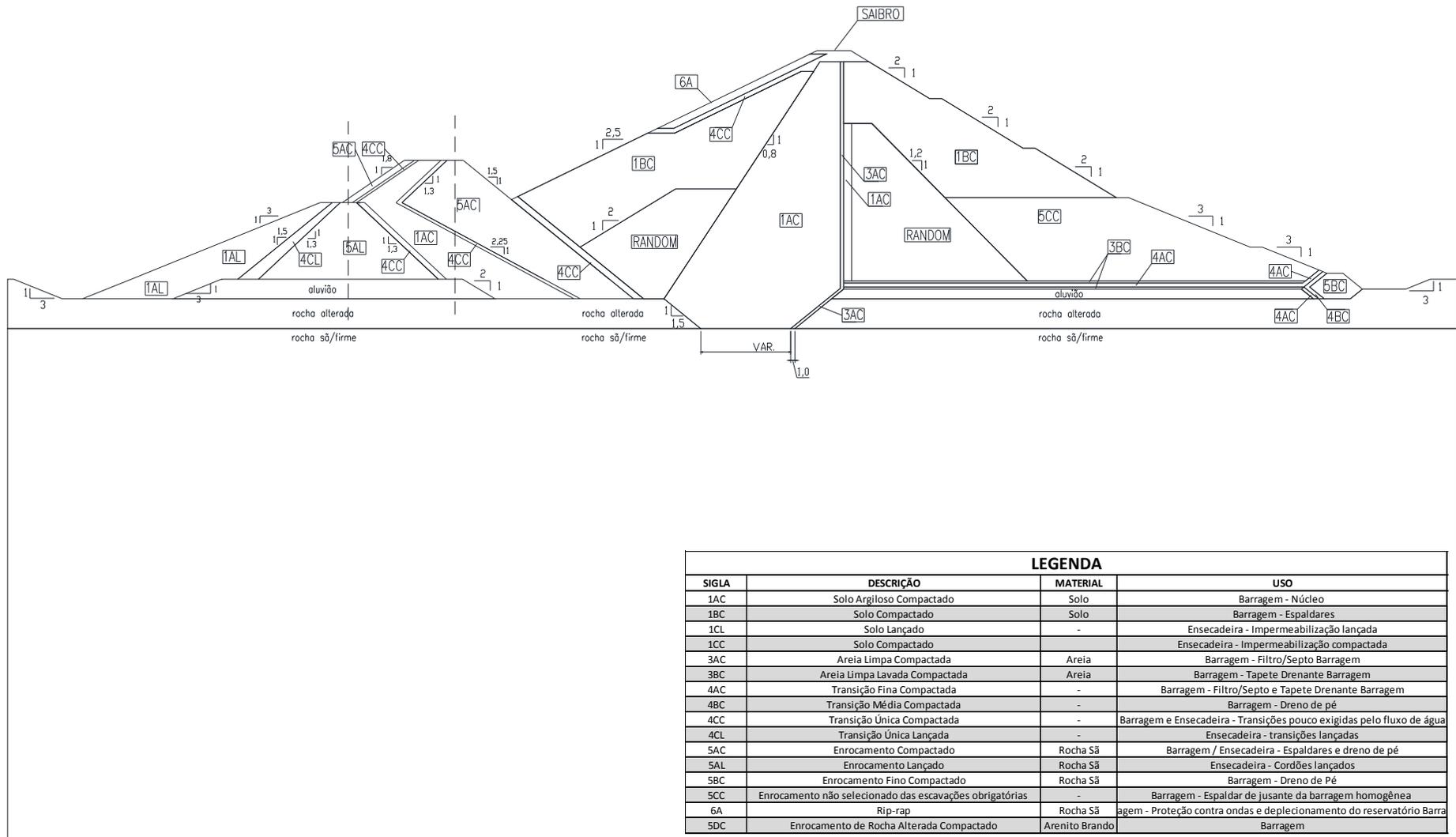


Figura 17: Seção representativa da barragem BSMTIT.  
 Fonte: Adaptado de BSMTIT (2014)

### 3.2 PARÂMETROS GEOTÉCNICOS

Apesar de ser composta por diversos materiais, a barragem de terra em estudo apresenta no solo componente dos seus espaldares parâmetros de resistência mais baixos. Por este motivo, espera-se que a superfície de ruptura crítica passe por este material. Devido a essa tendência de falha, o cuidado com o controle da argila usada nesta parte da barragem foi maior do que dos outros materiais, havendo, portanto, mais ensaios laboratoriais e, conseqüentemente, possibilitando uma análise mais aprofundada com métodos probabilísticos.

Para fins de dimensionamento, na análise determinística foram considerados parâmetros fixos para todos os materiais. Já na análise probabilística, os parâmetros de resistência do solo do espaldar foram considerados variáveis, enquanto os demais materiais permaneceram com os mesmos parâmetros fixos da análise determinística.

A seguir apresenta-se na Tabela 2 os parâmetros utilizados para os materiais não componentes do espaldar.

**Tabela 2 – Parâmetros geotécnicos utilizados para materiais invariáveis**

SIGLA	DESCRIÇÃO	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	c (kPa)	$\phi$ (°)
1AC	Solo Argiloso Compactado	18	10	28
1CL	Solo Lançado	17	5	18
1CC	Solo Compactado	18	5	28
3AC	Areia Limpa Compactada	19	0	30
3BC	Areia Limpa Lavada Compactada	19	0	30
4AC	Transição Fina Compactada	20	0	35
4BC	Transição Média Compactada	20	0	35
4CC	Transição Única Compactada	20	0	35
4CL	Transição Única Lançada	20	0	35
5AC	Enrocamento Compactado	22	0	$\tau = \sigma^* \tan \phi$ (Leps)
5AL	Enrocamento Lançado	20	0	40
5BC	Enrocamento Fino Compactado	22	0	40
5CC	Enrocamento não selecionado das escavações obrigatórias (Random)	22	5	35
6A	Rip-rap	22	0	45
5DC	Enrocamento de Rocha Alterada Compactado	22	5	35

Fonte: Adaptado de BSMTIT (2014)

Para o solo do espaldar (material 1BC) no método determinístico foi adotada a média dos resultados dos ensaios de cada parâmetro após a eliminação dos dados espúrios como parâmetros fixos. Já para o método probabilístico foram utilizadas a média e o desvio padrão. Na Tabela 3 são apresentados os ensaios realizados, seus respectivos resultados após a eliminação dos dados espúrios, suas respectivas médias e desvios.

**Tabela 3 – Parâmetros geotécnicos utilizados para o solo do espaldar**

Parâmetro Geotécnico	Ensaio	Dados	Média	Desvio Padrão
Coesão (kPa)	Compressão Triaxial	15,5	10,60	5,73
		4,3		
		12,0		
Ângulo de Atrito (°)	Compressão Triaxial	31,0	30,73	0,25
		30,5		
		30,7		
Massa Específica seca máxima (g/cm <sup>3</sup> )	Compactação	1,93	1,91	0,04
		1,93		
		1,92		
		1,84		
		1,83		
		1,93		
		1,92		
		1,97		
		1,92		
		1,94		
1,85				

Fonte: Adaptado de BSMTIT (2014)

Como citado anteriormente, para o método de Monte Carlo, é possível escolher para cada parâmetro uma curva de distribuição de probabilidade. Tem sido usado por diversos autores a distribuição normal para todos os parâmetros, inclusive Flores (2008) afirma que ao se adotar a distribuição normal para os parâmetros estima-se os resultados a favor da segurança. Independentemente disso, foi feita a verificação do conjunto de dados de cada parâmetro a fim de verificar se estes seguiam de fato uma distribuição normal, detectando-se os termos espúrios e eliminando-os de forma a tornar admissível o uso da distribuição gaussiana para os dados utilizados.

Na Figura 18, Figura 19 e Figura 20 são mostradas as curvas de distribuição normal obtidas para cada um dos parâmetros de resistência do material do espaldar.

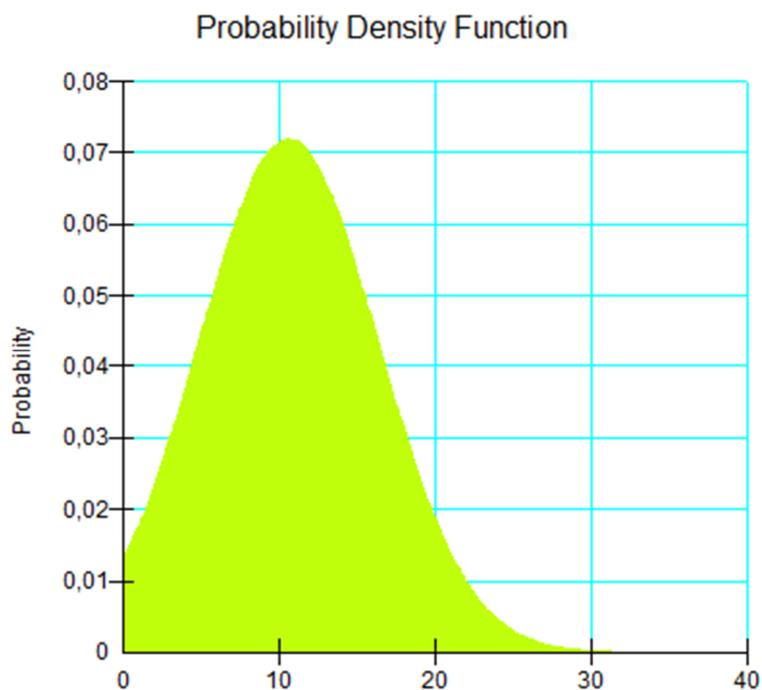


Figura 18: Curva de Distribuição dos Valores de Coesão  
Fonte: Autoria Própria

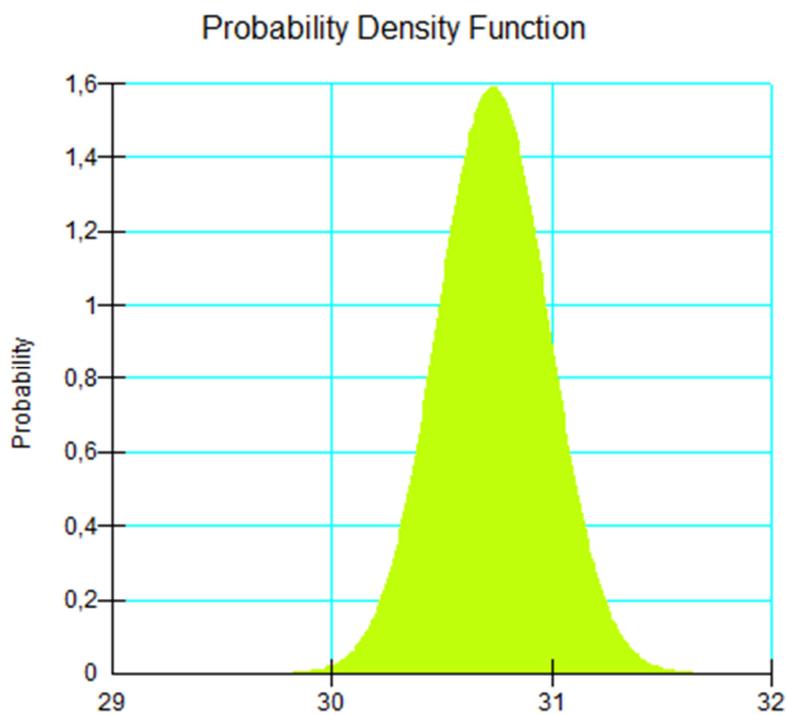
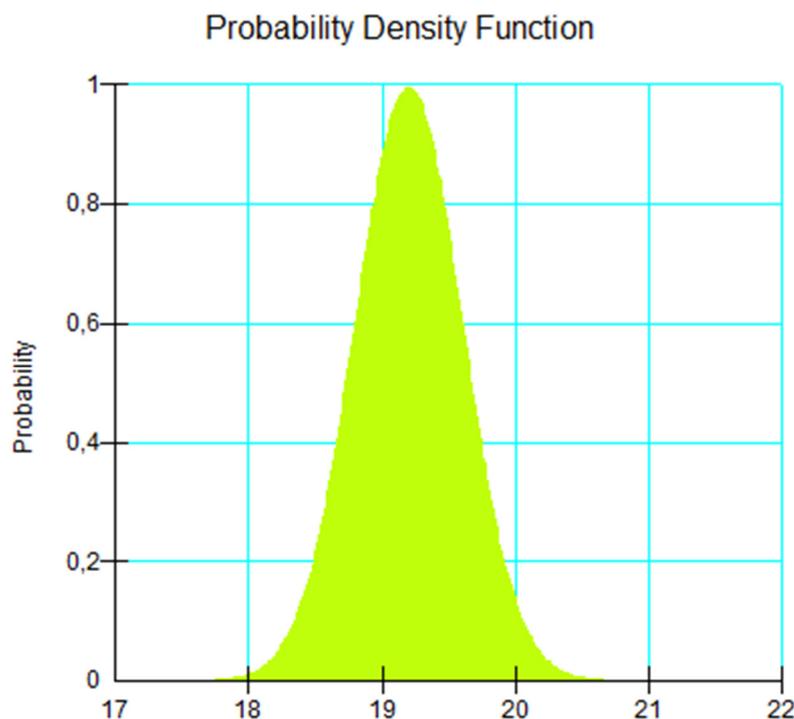


Figura 19: Curva de Distribuição dos Valores de Ângulo de Atrito  
Fonte: Autoria Própria



**Figura 20: Curva de Distribuição dos Valores de Massa Específica**  
**Fonte: Autoria Própria**

Foi ainda necessário informar ao programa o valor do coeficiente de correlação entre a coesão e o ângulo de atrito. O coeficiente de correlação serve para mensurar como a variação de um parâmetro pode causar modificações nos valores de outra variável a ela correlacionada, de forma linear. Este coeficiente pode variar entre -1 e 1, sendo que o valor 0 indica independência entre as variáveis analisadas, e os extremos representam perfeita correlação linear entre elas (FLORES, 2008).

Ainda de acordo com Flores (2008), os parâmetros de resistência mais comumente utilizados para a análise de estabilidade de taludes possuem incertezas associadas, sendo que estas não são independentes entre si. Porém, segundo o autor, nos casos em que não há dados suficientes para a determinação do coeficiente de correlação, é recomendável que este não seja obtido. Esta recomendação se deve ao fato da grande sensibilidade causada nos resultados quando este coeficiente é inserido.

Para o caso do problema de estabilidade de taludes, os parâmetros normalmente correlacionados são a coesão e o ângulo de atrito. Para o caso do peso específico do solo, Alonso (1976) apud Flores (2008) afirma que devido à precisão geralmente alcançada nos ensaios de laboratório, a incerteza associada a

esta variável torna-se insignificante em relação às demais incertezas, portanto, torna-se usual considerar um coeficiente de correlação nulo para este parâmetro.

### 3.3 DIMENSIONAMENTO

Como a barragem em questão se encontra no Brasil foi utilizado como referência para o desenvolvimento das análises o documento brasileiro “Critérios de Projeto Civil de Usinas Hidrelétricas” (ELETROBRÁS, 2003) que orienta o projeto de barragens para geração de energia elétrica.

#### 3.3.1 Condições de Carregamento

Para as análises de estabilidade de cada uma das seções da barragem foram empregados quatro casos de carregamento, como descrito pela Eletrobrás, sendo eles:

- Final de construção

A condição de final de construção simula o reservatório vazio com o aterro totalmente construído, não se admitindo dissipações de poro-pressões construtivas.

- Operação Normal

É regido pelo nível máximo normal de operação do reservatório. Considera-se neste caso que o nível de água permanece durante um tempo suficiente para saturar o aterro e também a dissipação total das poro-pressões construtivas.

- Operação Normal com sismo

Caso semelhante à condição de Operação Normal, diferenciando-se apenas pela inclusão de acelerações verticais e horizontais devido ao sismo. Os valores adotados para os coeficientes sísmicos, proporcionais à aceleração da gravidade “g”, são apresentados na

Tabela 4.

**Tabela 4 - Coeficientes sísmicos adotados**

Coeficiente sísmico horizontal	0,05 g
Coeficiente sísmico vertical	0,03 g

**Fonte: Adaptado de Eletrobrás (2003).**

Os efeitos decorrentes das acelerações sísmicas foram determinados de acordo com procedimentos correntes (Método do coeficiente Sísmico - pseudo-estático).

Os valores adotados para o sismo são baixos, isso porque se referem a abalos sísmicos induzidos pela movimentação do terreno durante o enchimento do reservatório. Portanto deve-se verificar o sismo mesmo em locais onde não há registros históricos de abalos naturais (ELETROBRÁS, 2003)

- Rebaixamento rápido

O caso de rebaixamento rápido é caracterizado pela condição de descida do nível de água máximo normal até a o nível de água mínimo normal. Essa situação pode ocorrer em casos de emergência ou mesmo por necessidade de operação do reservatório.

### 3.3.2 Critérios de Aceitação

Para cada caso de carregamento há um fator de segurança mínimo. A Tabela 5 apresenta os critérios de aceitação para as análises determinísticas de estabilidade de taludes de acordo com cada caso de carregamento, como recomendado pela Eletrobrás (2003).

**Tabela 5 - Fatores de segurança a serem atendidos**

Caso de Carga	FS Mínimo Requerido
Final de Construção	1,30
Operação Normal	1,50
Operação Normal com Sismo	1,20
Rebaixamento Rápido	1,10

**Fonte: Adaptado de Eletrobrás (2003).**

Para as análises probabilísticas, como não há um critério específico recomendado pela Eletrobrás (2003), será utilizado o critério de aceitação de acordo com o *U.S. Army Corps of Engineers - USACE* (1997), mostrado na Tabela 6. Os resultados também serão comparados como sugerido por Dell'Avanzi e Sayão (1998), com os valores indicados na Tabela 7.

**Tabela 6 - Índice de Confiabilidade e Probabilidade de Ruptura – USACE**

Nível de desempenho	Índice de Confiabilidade ( $\beta$ )	Probabilidade de Ruptura (Pr)
Alto	5,0	3,0E-07
Bom	4,0	3,0E-05
Acima da Média	3,0	1,3E-03
Abaixo da Média	2,5	6,0E-03
Pobre	2,0	0,023
Insatisfatório	1,5	0,07
Perigoso	1,0	0,16

Fonte: Adaptado de U.S. Army Corps of Engineers (1997)

**Tabela 7 - Índice de Confiabilidade e Probabilidade de Ruptura - Dell'Avanzi e Sayão**

Casos	Índice de Confiabilidade	Probabilidade de Ruína
Fundações	2,3 a 3,0	$10^{-2}$ a $10^{-3}$
Taludes de Mineração	1,0 a 2,3	$10^{-1}$ a $10^{-2}$
Barragens	3,5 a 5,0	$10^{-3}$ a $10^{-5}$
Estruturas de Contenção	2,0 a 3,0	$10^{-2}$ a $10^{-3}$

Fonte: Adaptado de Dell'Avanzi e Sayão (1998)

### 3.3.3 Procedimentos Computacionais

Com os critérios de projeto definidos, o passo seguinte foi a inserção dos dados em um programa computacional para análise de estabilidade de taludes.

Para o desenvolvimento das análises de cada uma das seções foi utilizado o programa computacional Slope/W da Geo-Studio. O Geoslope é um programa da Geostudio que tem como função resolver problemas de estabilidade de taludes. Para tal, o programa lança mão da teoria do equilíbrio limite.

É possível com ele realizar análises determinísticas, através dos métodos de Fellenius, Bishop Simplificado, Janbu Simplificado, Spencer, Morgenstern-Price, U.S. Corps of Engineers e Lowe-Karafiath. Em cada uma dessas análises disponíveis, é possível considerar diferentes materiais, geometrias, superfícies de ruptura complexas, a influência das pressões neutras, e até mesmo sismos. Outro tipo de análises disponível para o usuário é a análise probabilística, que funciona a partir de uma análise determinística considerada. Neste tipo de simulação, considera-se a variabilidade dos parâmetros em questão, e não apenas parâmetros fixos, como na análise determinística. Obtém-se como resultado dessa simulação

uma distribuição de probabilidade do fator de segurança, e considera-se como probabilidade de ruína um fator de segurança menor que a unidade.

Neste trabalho foram modeladas tanto as análises determinísticas quanto as probabilísticas. Para ambos os casos foram empregados os métodos de Bishop simplificado e Spencer.

O primeiro passo para o início das análises no programa foi a elaboração, em escala, da geometria de cada uma das seções da barragem com a fundação em arquivo CAD, com a extensão DXF, extensão reconhecida pelo programa de análise.

Feito isso, o passo seguinte foi a exportação da seção feita em CAD.

Com a seção inserida no programa, foram criadas análises para cada uma das condições de carregamento, ou seja, uma análise para a situação de final de construção, operação normal, operação normal com sismo e rebaixamento rápido.

Após a inserção dos casos de carregamento, foram definidas as condições de nível de água, poro pressão e taludes a serem analisados em cada um dos casos.

A percolação considerada nas análises realizadas neste trabalho foi obtida a partir de simulações fluxo, feitas através do método dos elementos finitos, no programa SEEP, disponível no próprio pacote de programas da Geostudio que contém o Geoslope. As análises de percolação foram efetuadas com base nos níveis de água e em permeabilidades dos materiais apontadas em projeto, oriundas de ensaios de permeabilidade.

Para a situação de final de construção, a análise foi feita tanto no talude de montante quanto no de jusante, sem a presença de nível de água e com a presença de pressões neutras, uma vez que este caso simula o aterro plenamente construído, porém, antes que se faça o enchimento do reservatório.

Para o caso de Operação Normal f feita a análise com presença de água até o nível máximo normal, sem a presença de poro pressões e com apenas o talude de jusante analisado, uma vez que se trata do caso mais crítico para sua estabilidade, pois no espaldar de montante há o peso de água atuando, que contribui para o seu equilíbrio.

A Operação Normal com Sismo, por assemelhar-se muito à condição anterior, foi realizada a partir desta com a adição apenas dos coeficientes de sismo recomendados pela Eletrobrás (2003).

O rebaixamento rápido, por fim, foi analisado apenas no espaldar de montante, já que esta situação apresenta-se mais desfavorável em termos de estabilidade e com as pressões neutras atuando.

A etapa seguinte para continuação do trabalho foi a inserção dos dados de cada um dos materiais no programa. Dentre os dados que foram inseridos estão os parâmetros de resistência dos materiais que compõem o aterro e a fundação da barragem.

Feitas as entradas desses dados, foram escolhidos dentro das opções do programa os métodos determinísticos de Spencer e Bishop Simplificado e, então, se dará início às análises.

Os fatores de segurança para cada uma das situações de carregamento em cada uma das seções foram anotados para que fosse feito posteriormente a comparação entre os resultados caso a caso com as análises probabilísticas.

Na sequência, utilizando os mesmos arquivos e modificando a opção no programa para análise probabilística pelo Método de Monte Carlo executaram-se as simulações probabilísticas, utilizando como base tanto o método de Spencer quanto o de Bishop Simplificado.

Por fim os resultados das análises comparados são apresentados no capítulo a seguir.

## 4. RESULTADOS

Os resultados obtidos das análises realizadas são apresentadas no decorrer deste capítulo.

Para as análises determinísticas foram obtidos os fatores de segurança e a superfície de ruptura para cada uma das situações de análise, para as análises probabilísticas foram obtidas ainda as distribuições de probabilidade do fator de segurança conforme apresentado a seguir.

### 4.1 ANÁLISE DETERMINÍSTICA

Como descrito anteriormente, foram realizadas análises determinísticas pelo método de Bishop Simplificado e Spencer. A seguir são apresentados os resultados obtidos em cada um dos métodos para os casos de carregamento citados no Item 3.3.1.

#### 4.1.1 Método de Bishop Simplificado

No intervalo entre a Figura 27 e a Figura 32 são apresentados os diagramas obtidos no programa GeoSlope 2012, com seus respectivos fatores de segurança para cada um dos casos de carga estudados.

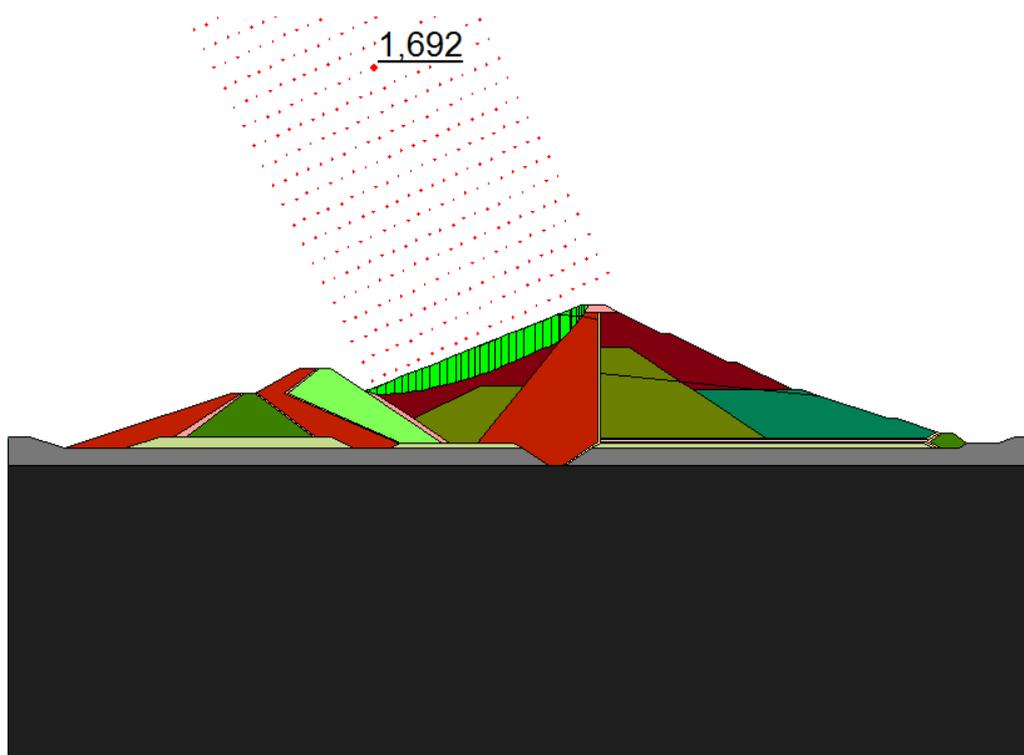


Figura 21 – Método de Bishop - Final de Construção – Montante  
Fonte: Autoria Própria

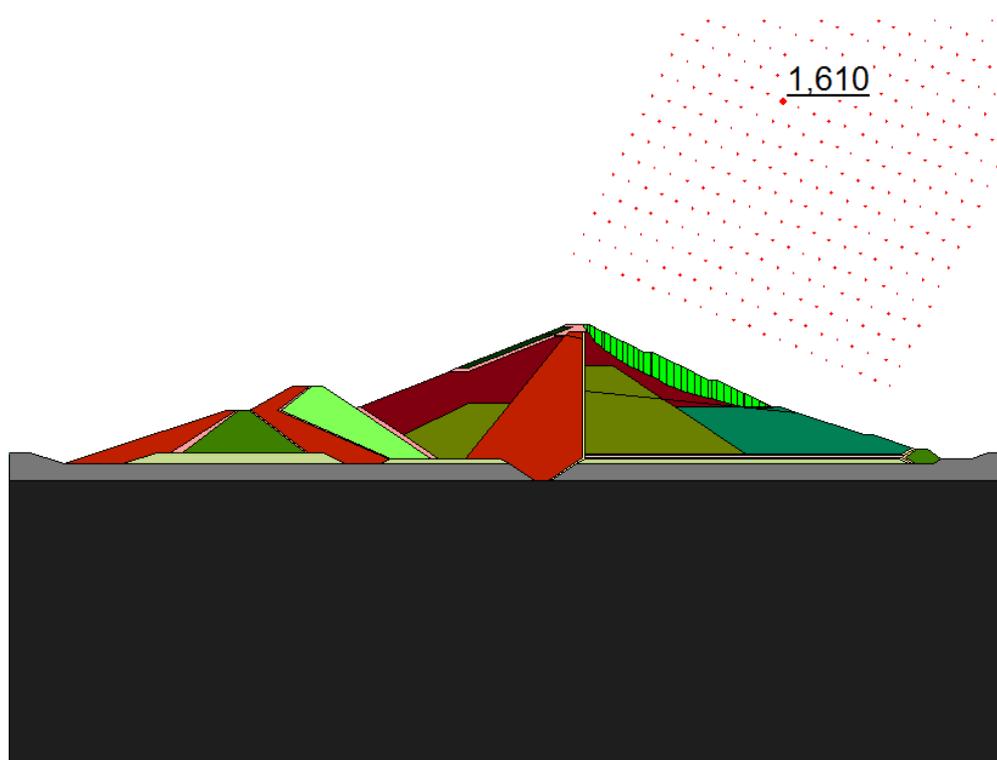


Figura 22 – Método de Bishop - Final de Construção – Jusante  
Fonte: Autoria Própria

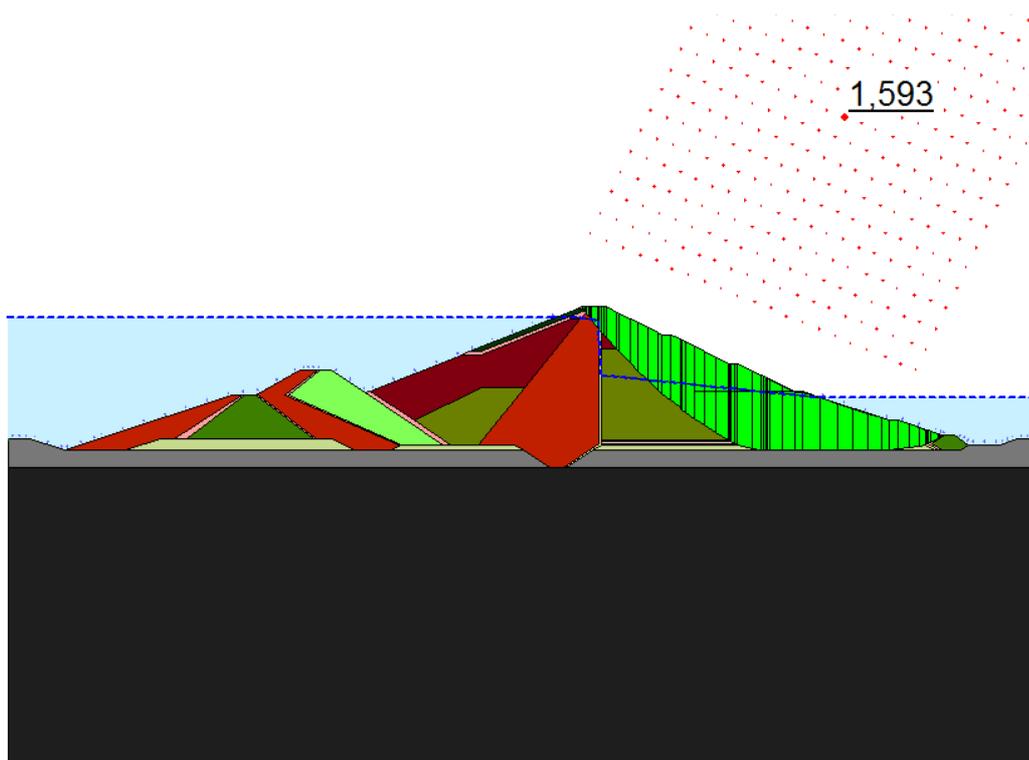


Figura 23 – Método de Bishop – Operação Normal  
Fonte: Autoria Própria

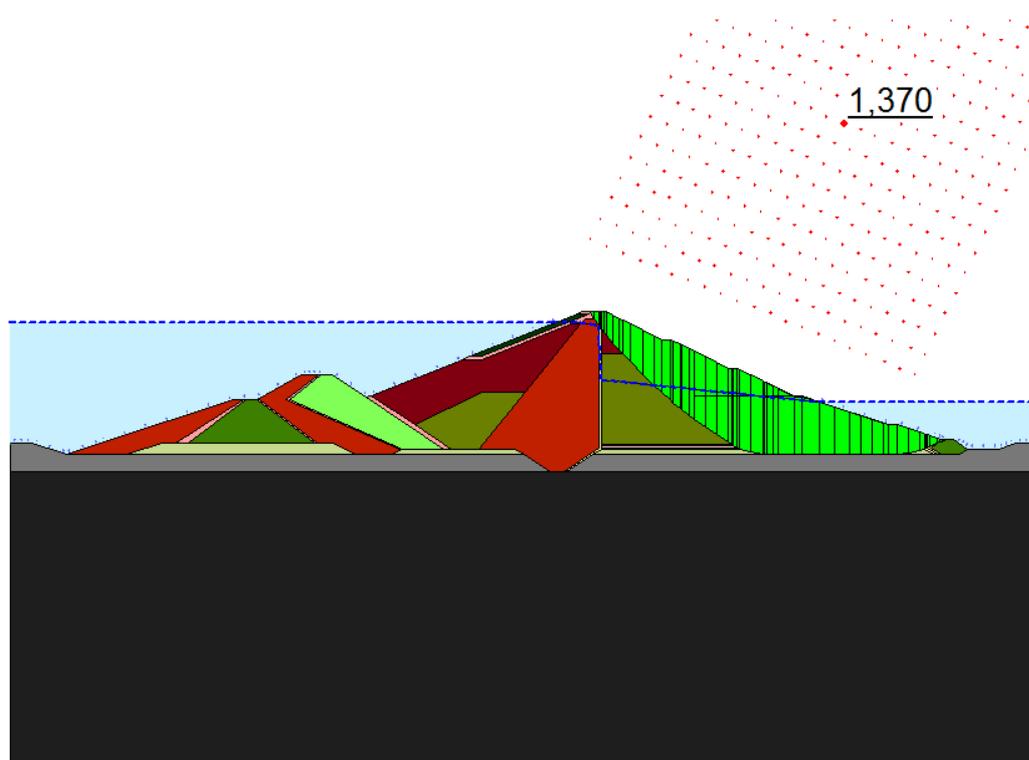


Figura 24 – Método de Bishop – Operação Normal com Sismo  $a_v=0,03g$  e  $a_h=0,05g$   
Fonte: Autoria Própria

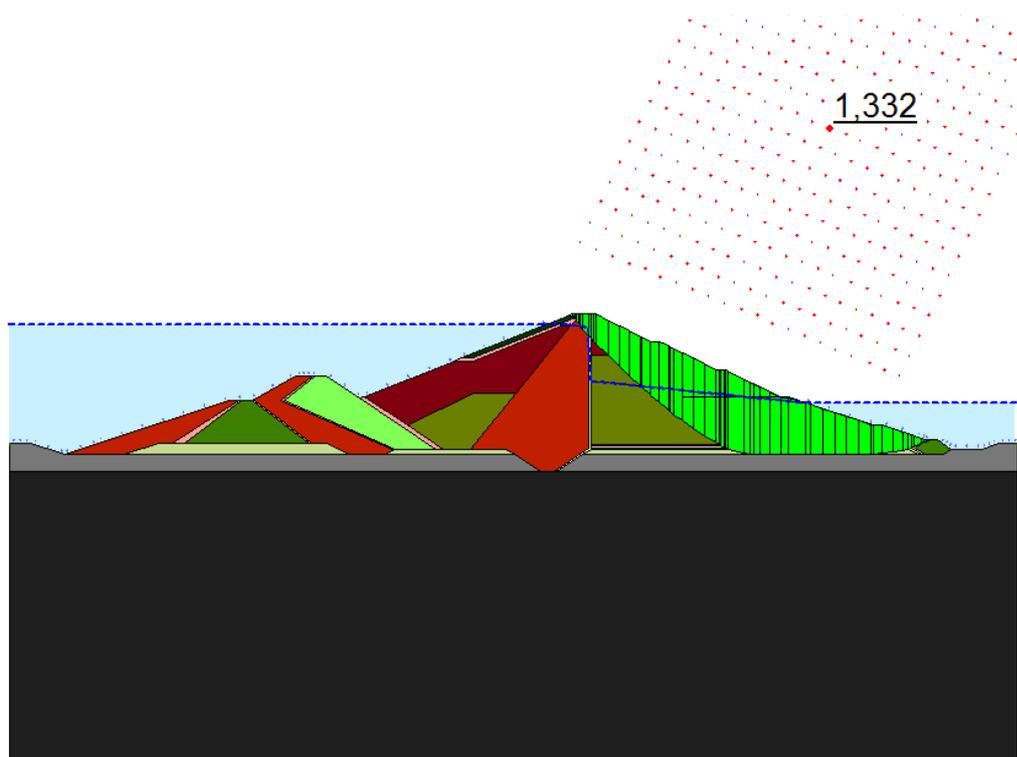


Figura 25 – Método de Bishop – Operação Normal com Sismo  $a_v=-0,03g$  e  $a_h=-0,05g$   
Fonte: Autoria Própria

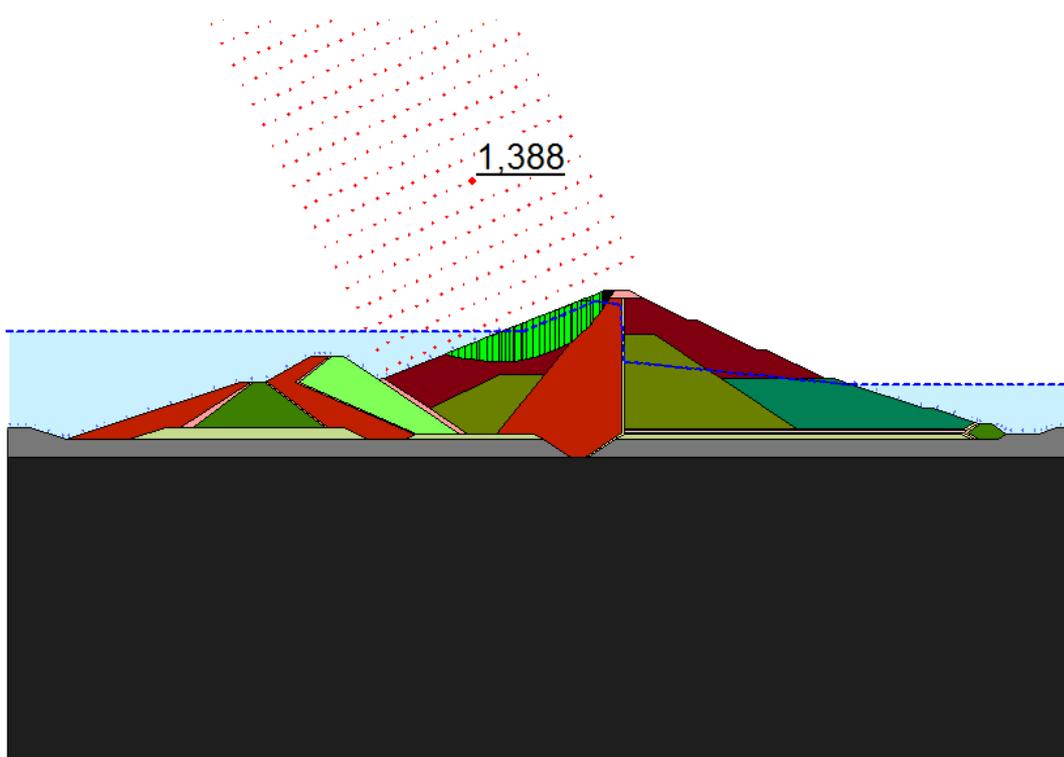


Figura 26 – Método de Bishop – Rebaixamento Rápido – NA El.302,00m a El.292,00m  
Fonte: Autoria Própria

Observa-se que, utilizando os dados apresentados, todos os casos de carregamento aplicados geraram fatores de segurança que estão dentro dos limites definidos pela Eletrobrás.

Nota-se que as superfícies de ruptura críticas nos casos de carga de operação normal e operação normal com sismo passam quase totalmente fora do solo do espaldar de jusante, apesar de este material se apresentar menos resistente. Este acontecimento pode ter ocorrido devido à altura da linha freática, que quase não intercepta o solo do espaldar, como pode ser observado nas figuras das respectivas simulações, fato que influencia diretamente nas pressões neutras do material e, conseqüentemente, na sua resistência.

Seguindo nesta mesma linha de raciocínio, nota-se que na situação de final de construção, condição na qual as poropressões são consideradas atuantes, tanto o talude de montante quanto o de jusante apresentam superfícies de ruptura praticamente totalmente passante pelo solo. O mesmo ocorre na situação de rebaixamento rápido para o talude de montante analisado, que por sua própria definição, considera as poropressões atuantes.

Outra observação relevante é quanto à forma de algumas superfícies de ruptura, que não se apresentam perfeitamente circulares. Este fato é devido a uma opção do programa Geoslope, que quando ativada permite otimizar a superfície crítica de ruptura. Através da alteração incremental de algumas porções desta superfície, o programa testa algumas formas de superfície que possam vir a ter fatores de segurança mais baixos.

#### 4.1.2 Método de Spencer

No intervalo entre a Figura 27 e a Figura 32 são apresentados os diagramas obtidos no programa GeoSlope 2012, com seus respectivos fatores de segurança para cada um dos casos de carga estudados.

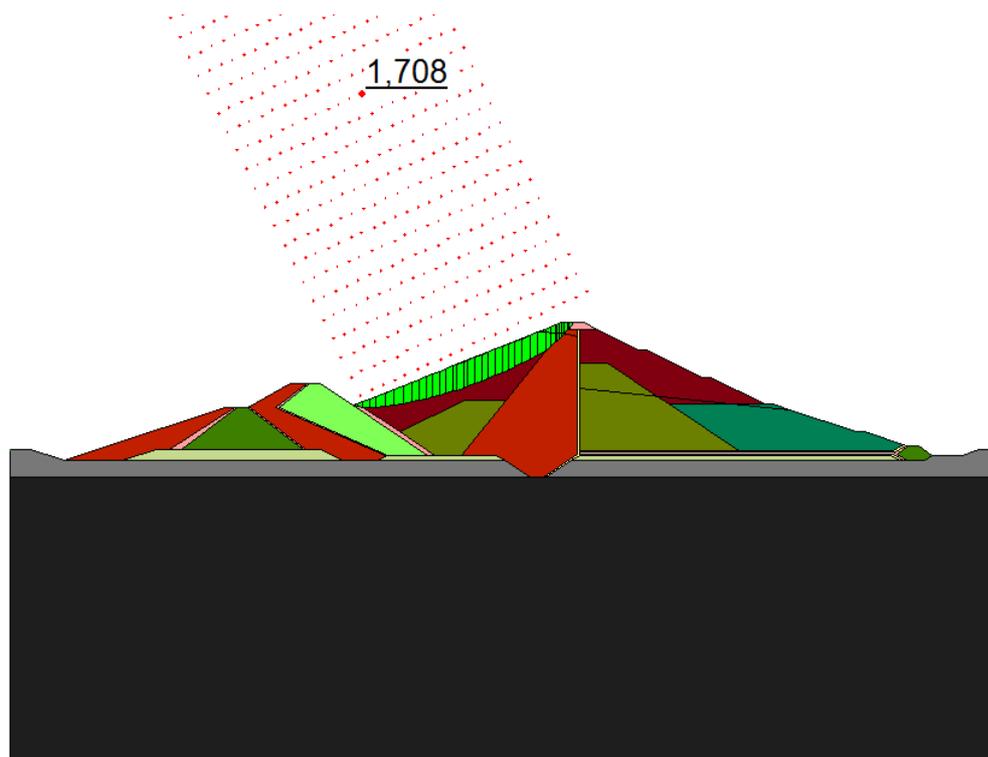


Figura 27 – Método de Spencer - Final de Construção – Montante  
Fonte: Autoria Própria

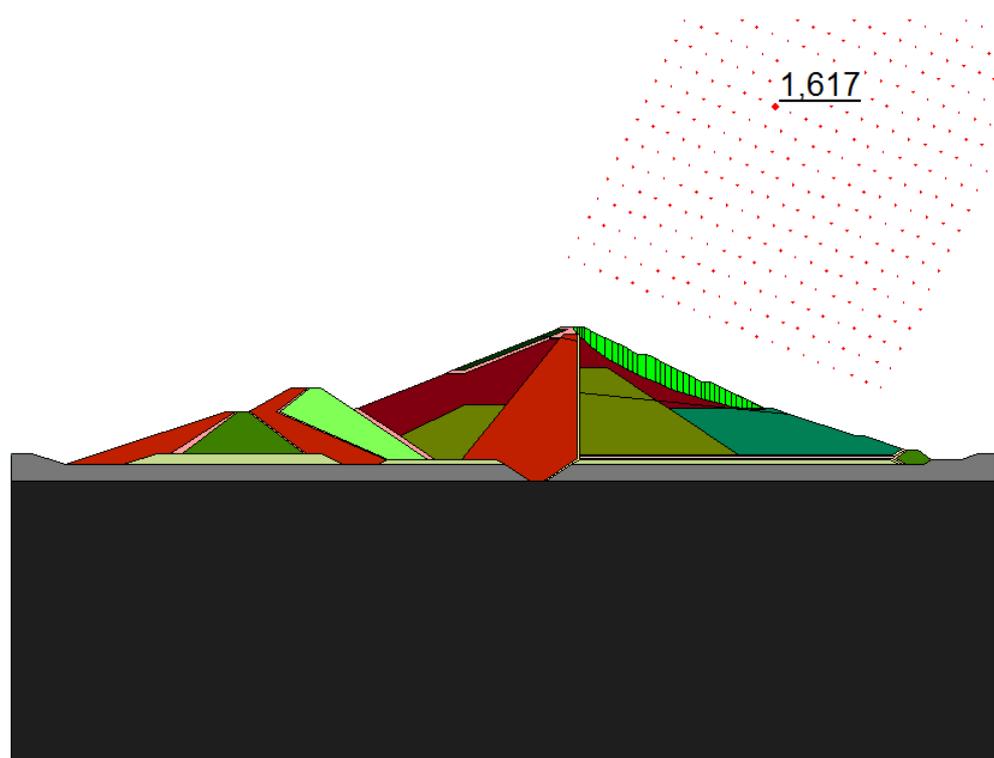


Figura 28 – Método de Spencer - Final de Construção – Jusante  
Fonte: Autoria Própria

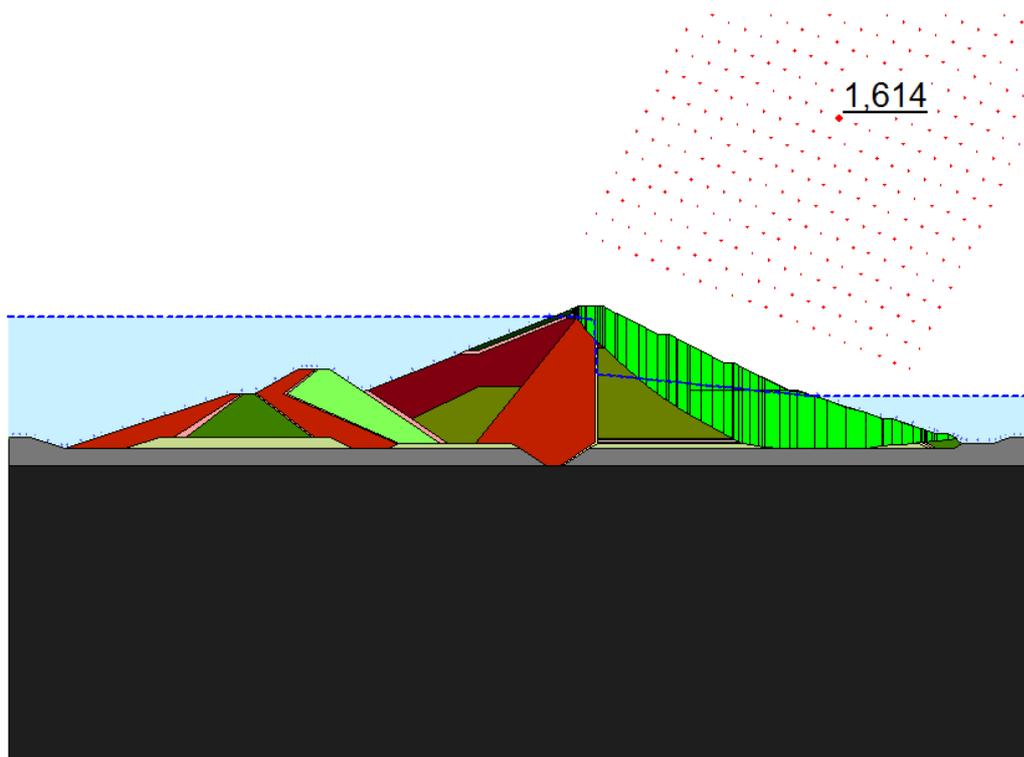


Figura 29 – Método de Spencer – Operação Normal  
Fonte: Autoria Própria

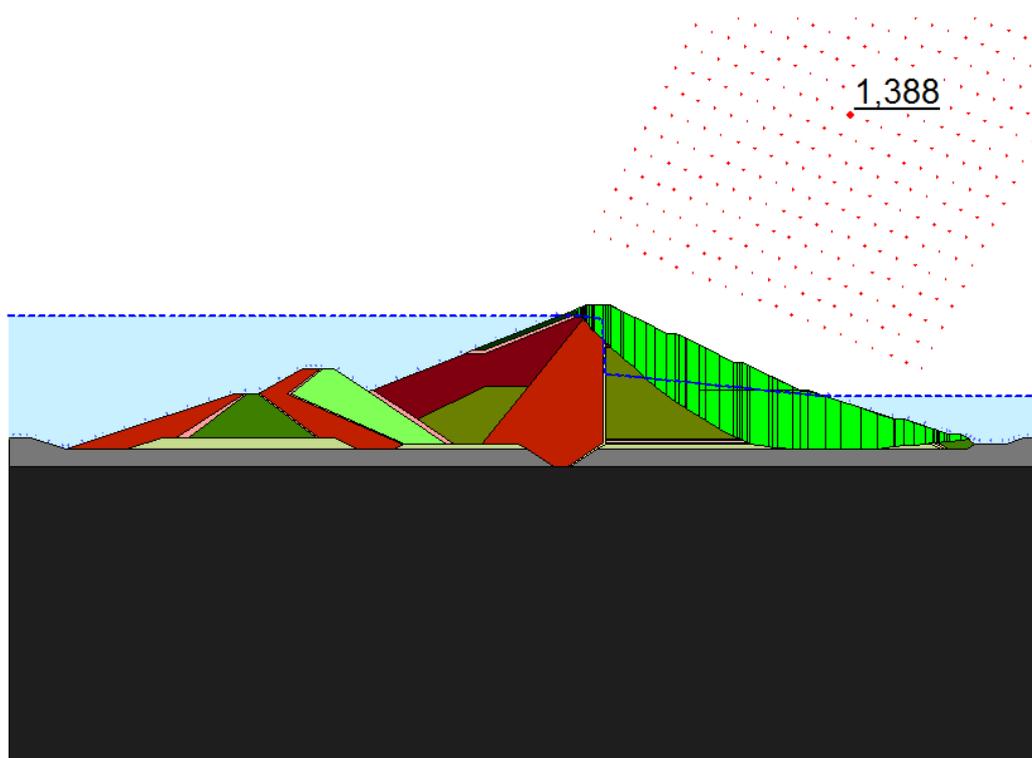


Figura 30 – Método de Spencer – Operação Normal com Sismo  $a_v=0,03g$  e  $a_h=0,05g$   
Fonte: Autoria Própria

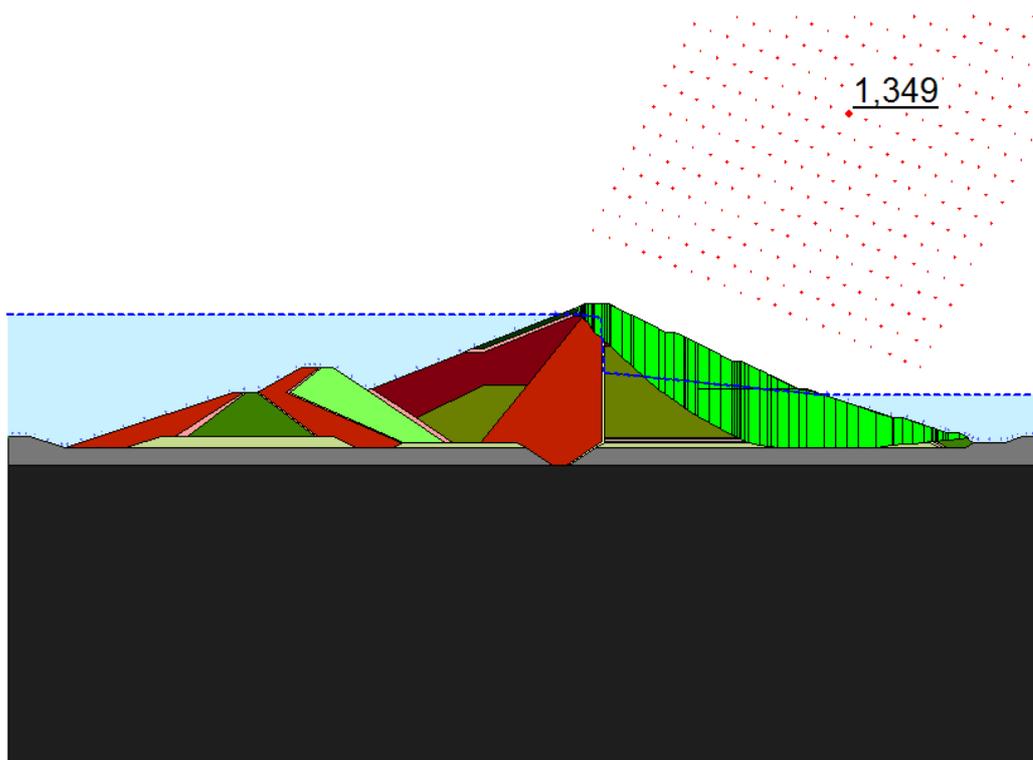


Figura 31 – Método de Spencer – Operação Normal com Sismo  $a_v=-0,03g$  e  $a_h=-0,05g$   
Fonte: Autoria Própria

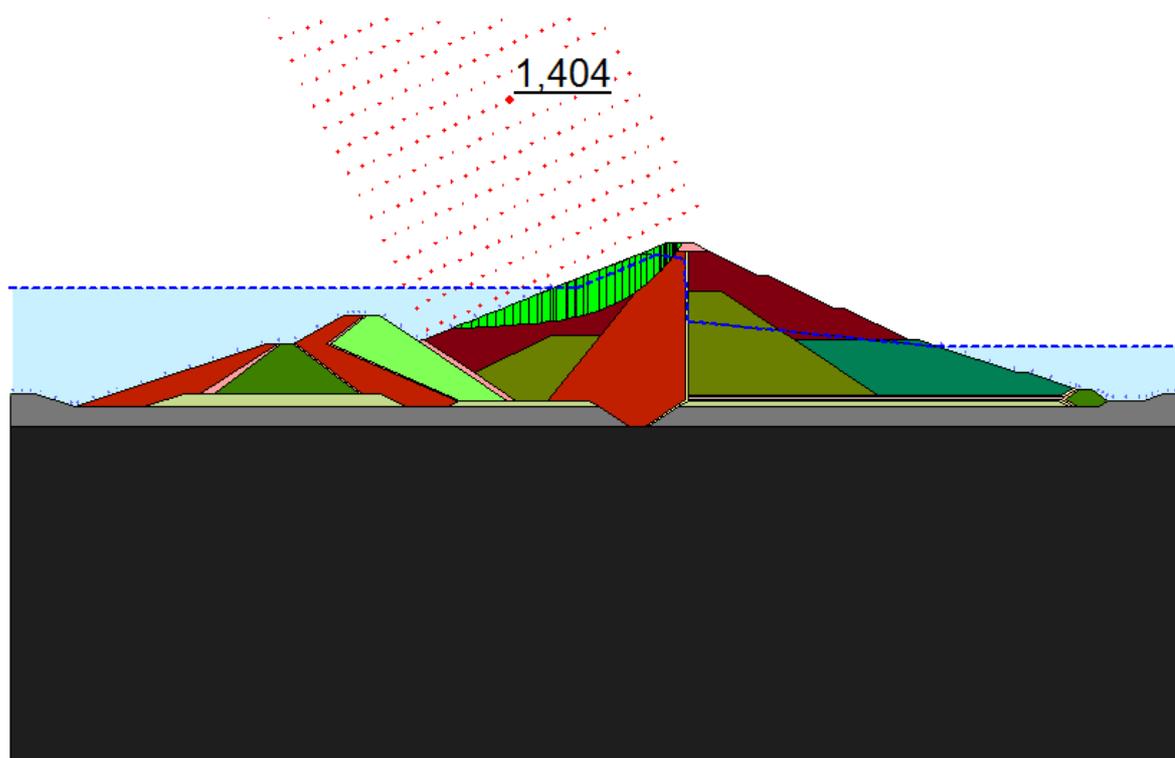


Figura 32 – Método de Spencer – Rebaixamento Rápido – NA El.302,00m a El.292,00m  
Fonte: Autoria Própria

Observa-se que, utilizando os dados apresentados, todos os casos de carregamento aplicados geraram fatores de segurança que ficaram dentro dos limites definidos pela Eletrobrás.

As considerações a respeito da presença das pressões neutras atuantes no talude e sua influência também são válidas para os resultados obtidos o método de Spencer.

Na Tabela 8 um resumo dos resultados das análises determinísticas de ambos os métodos aplicados é apresentado.

**Tabela 8 – Resumo dos resultados obtidos pelos métodos determinísticos**

<b>Caso de Carga</b>	<b>FS mínimo requerido</b>	<b>FS mínimo obtido (Bishop)</b>	<b>FS mínimo obtido (Spencer)</b>
Final de Construção - Montante	1,30	1,692	1,708
Final de Construção - Jusante	1,30	1,610	1,617
Operação Normal	1,50	1,593	1,614
Operação Normal com sismo av= 0,03g e ah= 0,05g	1,20	1,370	1,388
Operação Normal com sismo av= -0,03g e ah= 0,05g	1,20	1,332	1,349
Rebaixamento Rápido	1,10	1,388	1,404

**Fonte: Autoria Própria**

Pode-se observar, portanto, que analisando a estabilidade do talude pelos métodos tradicionais, a barragem pode ser considerada estável.

## 4.2 ANÁLISE PROBABILÍSTICA

Como descrito anteriormente, foram realizadas análises estatísticas com base nos métodos de Bishop Simplificado e Spencer. Para alcançar a convergência foram necessárias 500 iterações.

Ao final é apresentada uma tabela que contém o resumo dos resultados dos fatores de segurança médios e as probabilidades de ruptura de cada um dos casos em estudo.

A seguir são apresentados os resultados obtidos em cada um dos métodos para os casos de carregamento citados no Item 3.3.1.

#### 4.2.1 Método de Bishop Simplificado

No intervalo entre a Figura 33 e a Figura 44 são apresentados os diagramas obtidos no programa GeoSlope 2012, com seus respectivos fatores de segurança na superfície de ruptura crítica, seguidos de sua curva de distribuição de frequência para cada um dos casos de carga estudados.

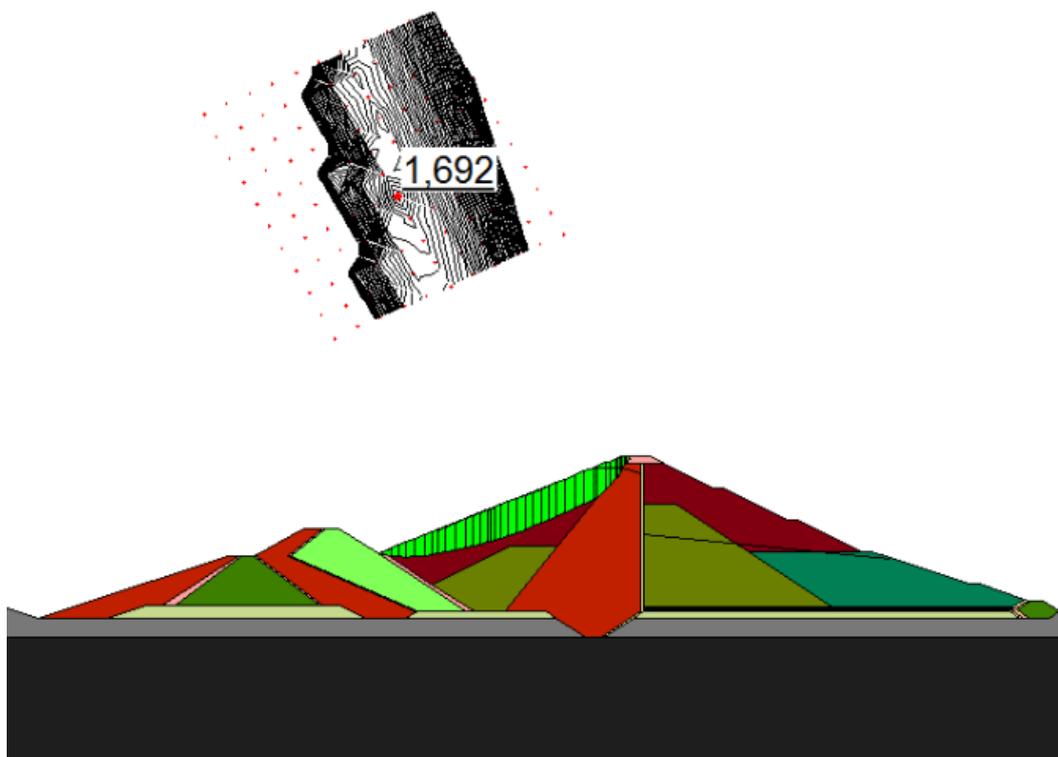
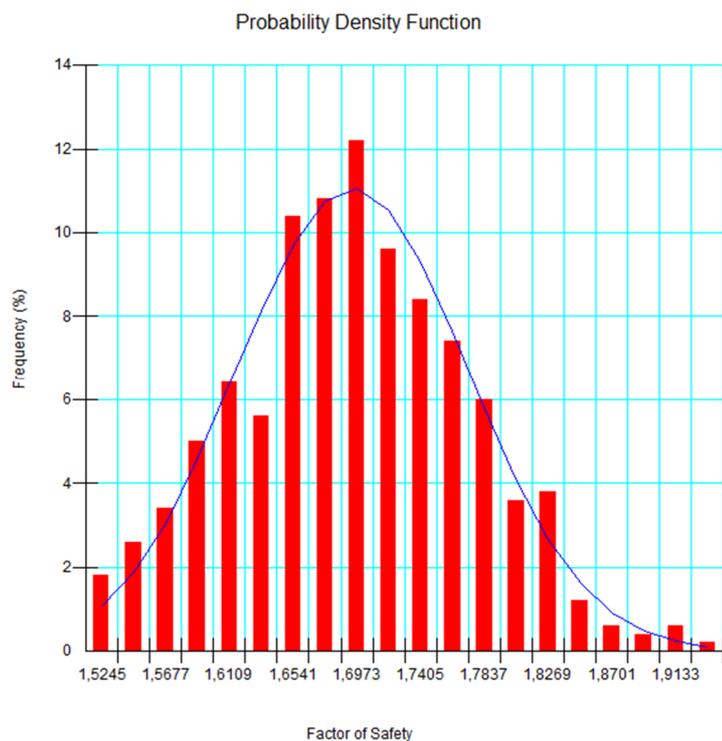
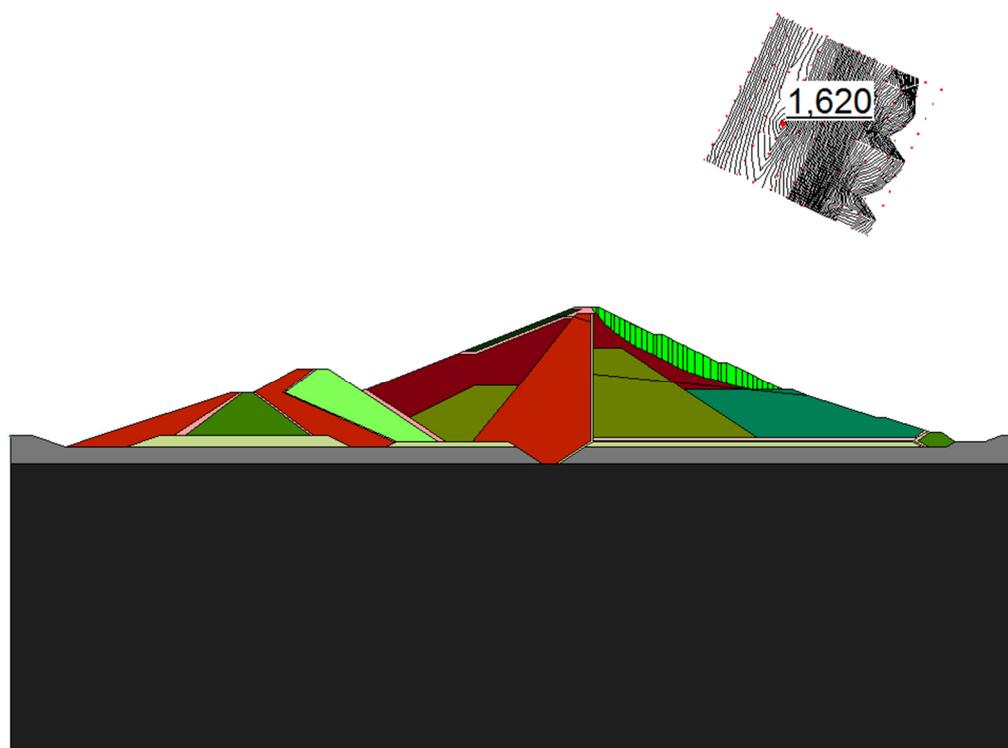


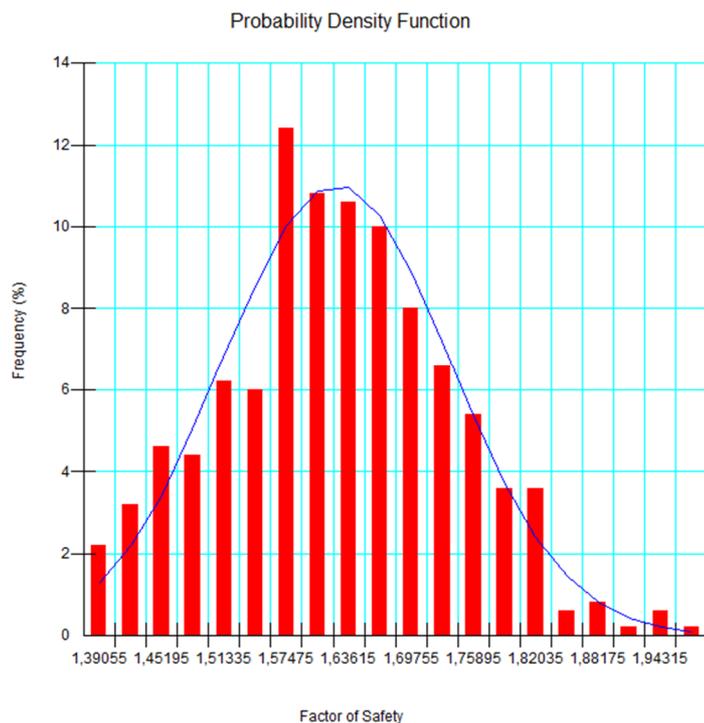
Figura 33 – Método de Bishop - Final de Construção – Montante - FS  
Fonte: Autoria Própria



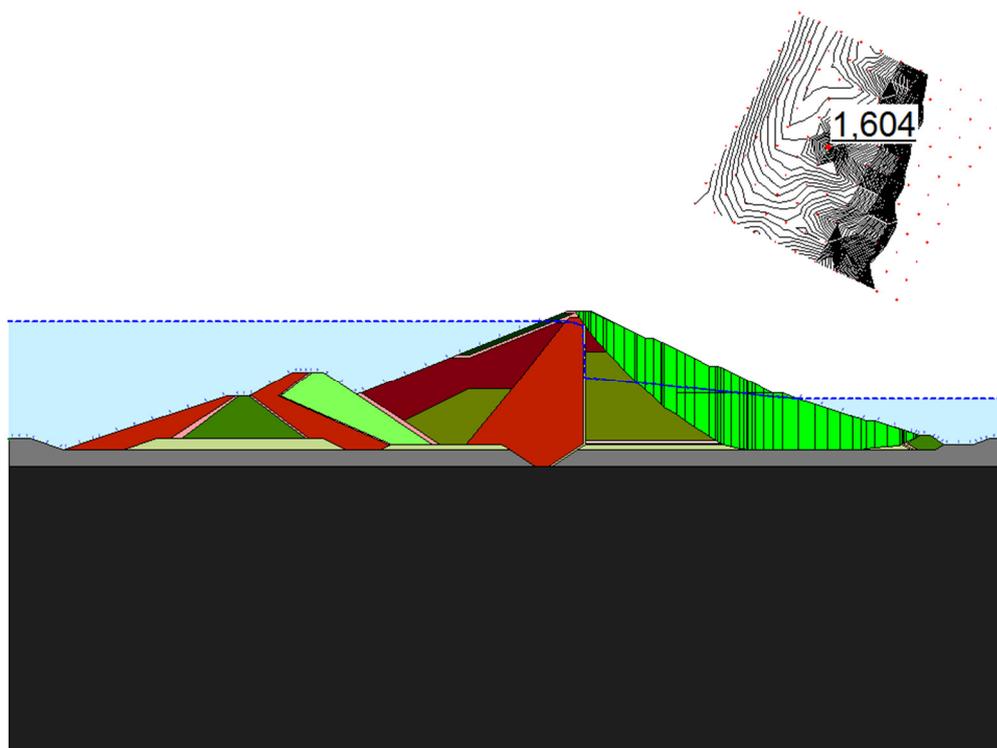
**Figura 34 – Método de Bishop - Final de Construção – Montante – Distribuição de Frequência**  
 Fonte: Autoria Própria



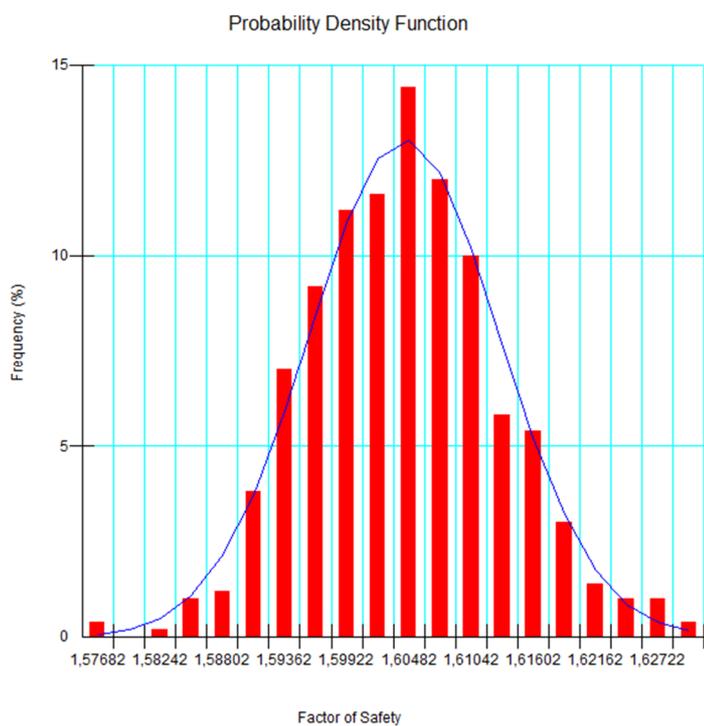
**Figura 35 – Método de Bishop - Final de Construção – Jusante - FS**  
 Fonte: Autoria Própria



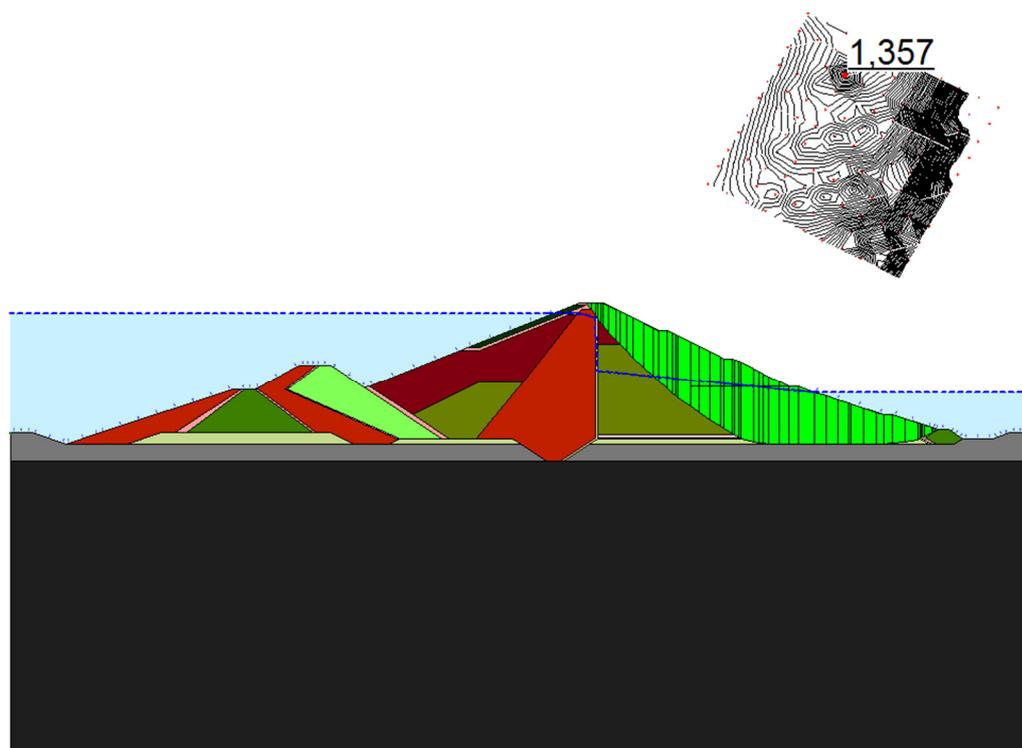
**Figura 36 – Método de Bishop - Final de Construção – Jusante – Distribuição de Frequência**  
 Fonte: Aatoria Própria



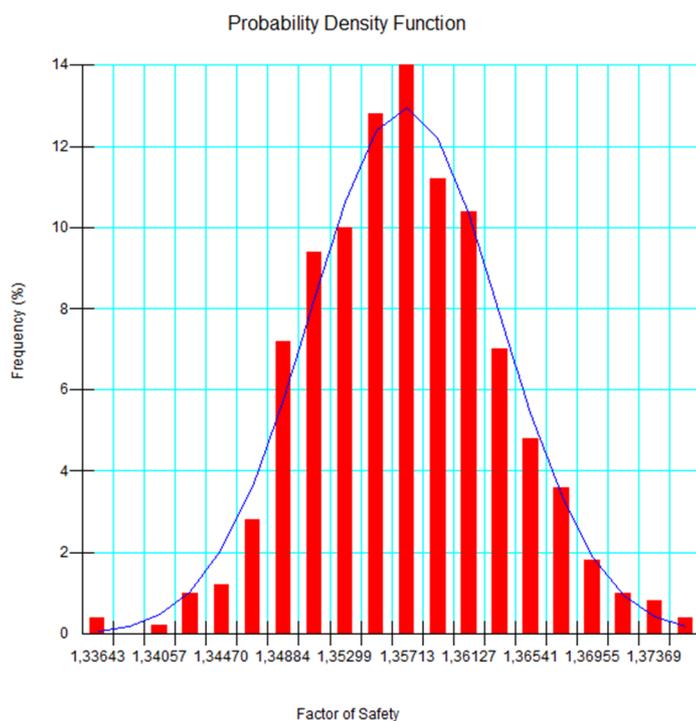
**Figura 37 – Método de Bishop – Operação Normal - FS**  
 Fonte: Aatoria Própria



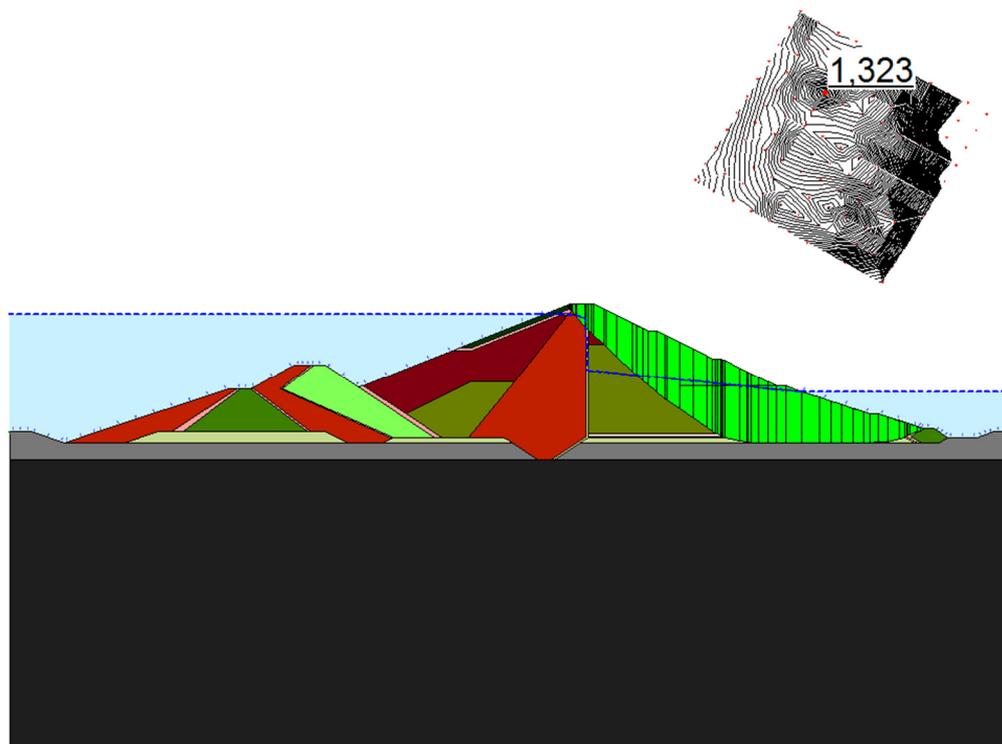
**Figura 38 – Método de Bishop - Operação Normal – Distribuição de Frequência**  
 Fonte: Autoria Própria



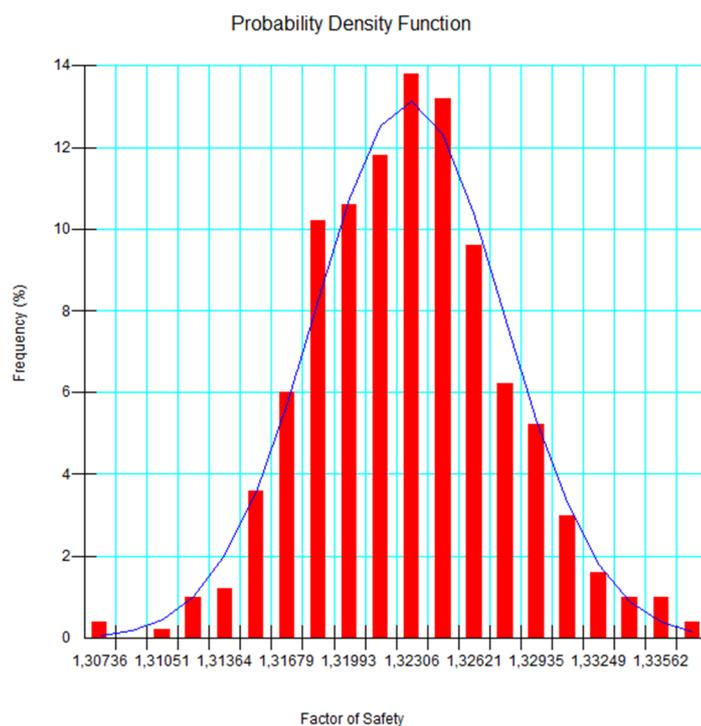
**Figura 39 – Método de Bishop – Operação Normal com Sismo  $a_v=0,03g$  e  $a_h=0,05g$  - FS**  
 Fonte: Autoria Própria



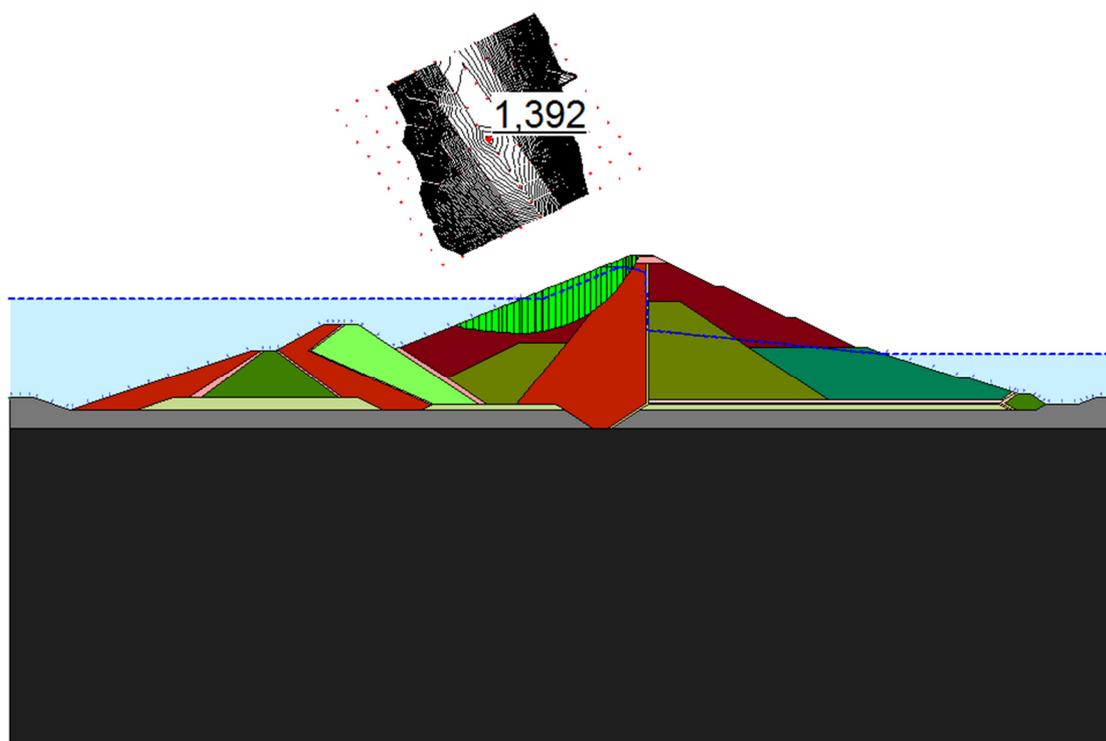
**Figura 40 – Método de Bishop - Operação Normal com Sismo  $a_v=0,03g$  e  $a_h=0,05g$  – Distribuição de Frequência**  
 Fonte: Autoria Própria



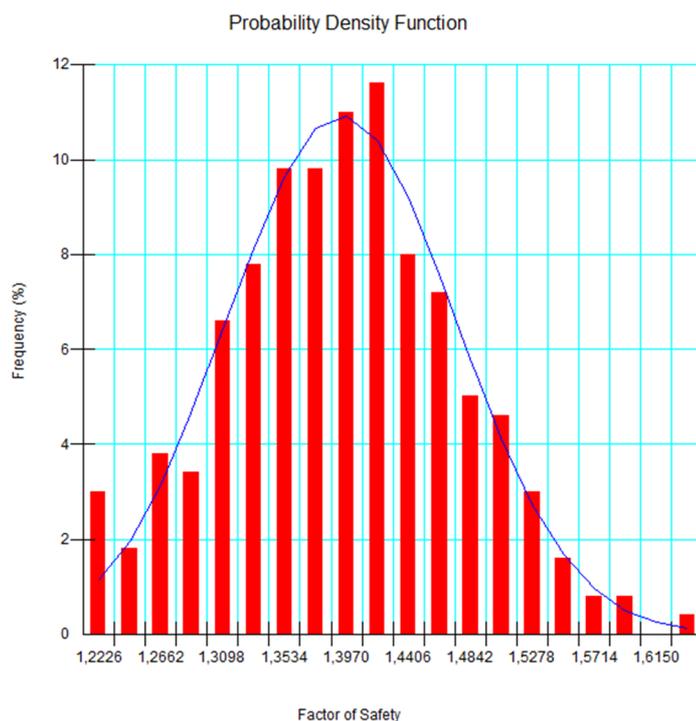
**Figura 41 – Método de Bishop – Operação Normal com Sismo  $a_v=-0,03g$  e  $a_h=-0,05g$  - FS**  
 Fonte: Autoria Própria



**Figura 42 – Método de Bishop - Operação Normal com Sismo  $a_v=-0,03g$  e  $a_h=0,05g$  – Distribuição de Frequência**  
**Fonte: Autoria Própria**



**Figura 43 – Método de Bishop – Rebaixamento Rápido – NA El.302,00m a El.292,00m - FS**  
**Fonte: Autoria Própria**



**Figura 44 – Método de Bishop – Rebaixamento Rápido – NA El.302,00m a El.292,00m – Distribuição de Frequência**  
**Fonte: Autoria Própria**

#### 4.2.2 Método de Spencer

No intervalo entre a Figura 45 e a Figura 56 são apresentados os diagramas obtidos no programa GeoSlope 2012, com seus respectivos fatores de segurança na superfície de ruptura crítica, seguidos de sua curva de distribuição de frequência para cada um dos casos de carga estudados.

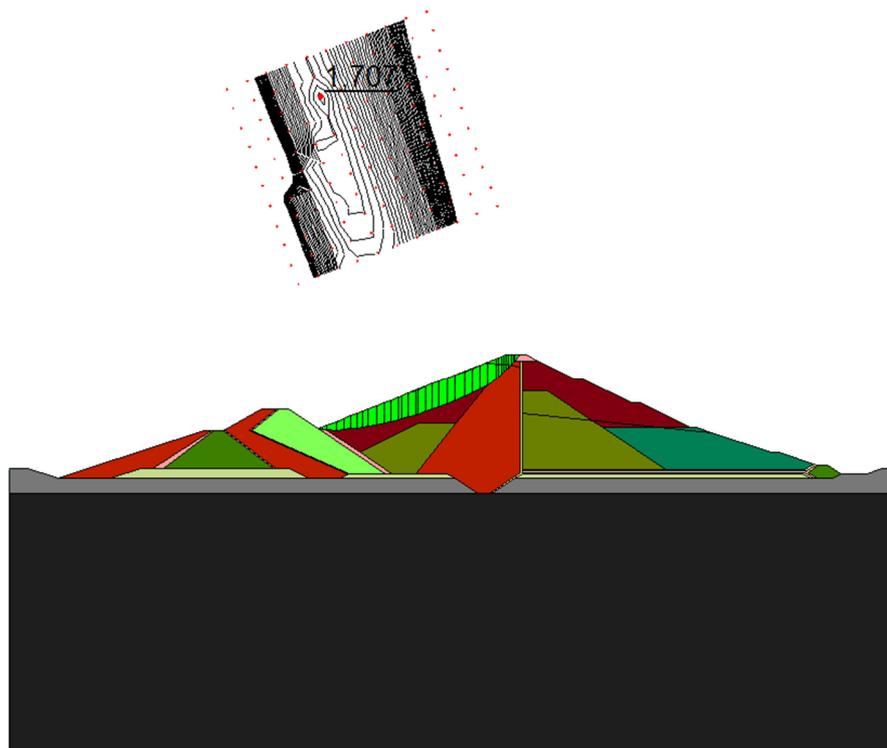


Figura 45 – Método de Spencer - Final de Construção – Montante - FS  
 Fonte: Autoria Própria

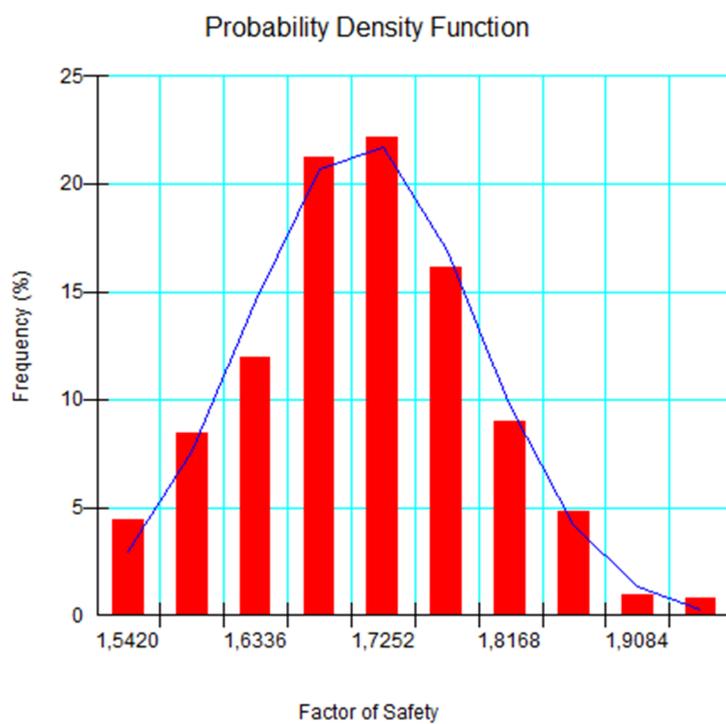


Figura 46 – Método de Spencer - Final de Construção – Montante – Distribuição de Frequência  
 Fonte: Autoria Própria

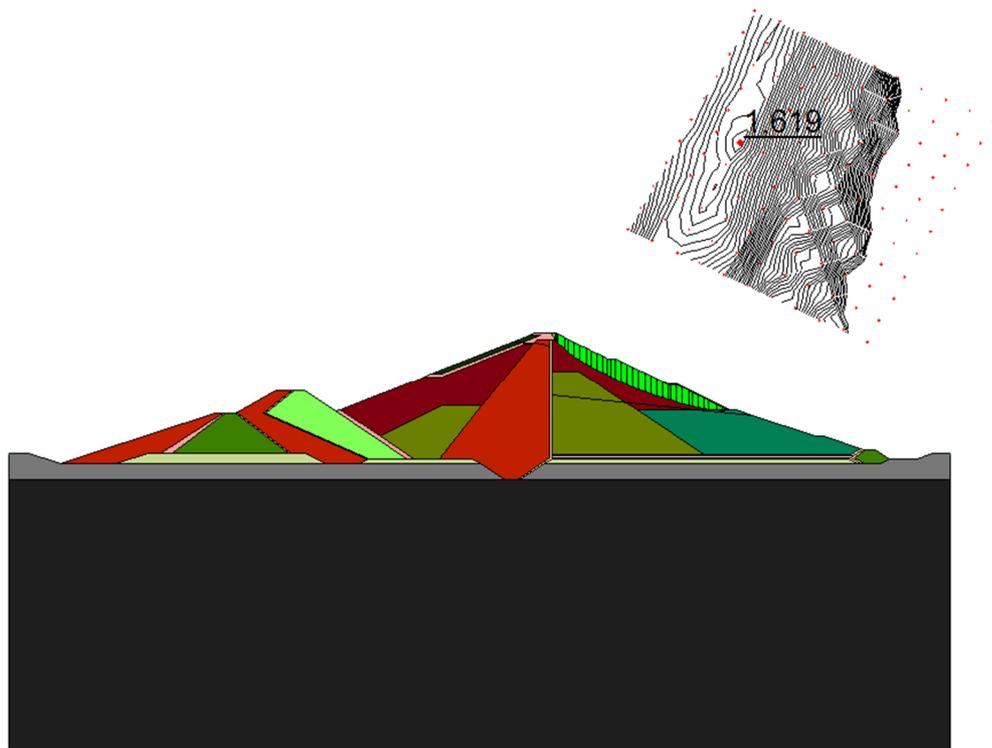


Figura 47 – Método de Spencer - Final de Construção – Jusante - FS  
 Fonte: Autoria Própria

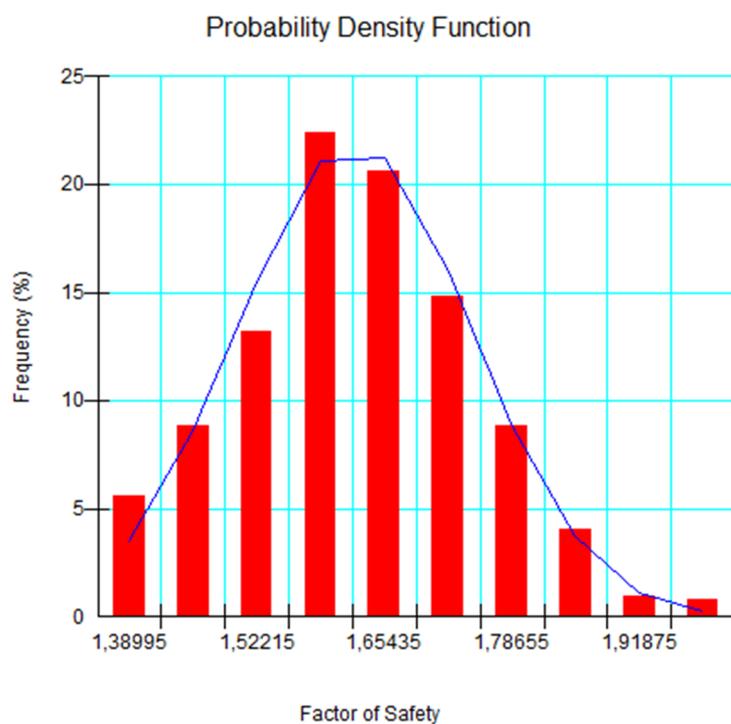


Figura 48 – Método de Spencer - Final de Construção – Jusante – Distribuição de Frequência  
 Fonte: Autoria Própria

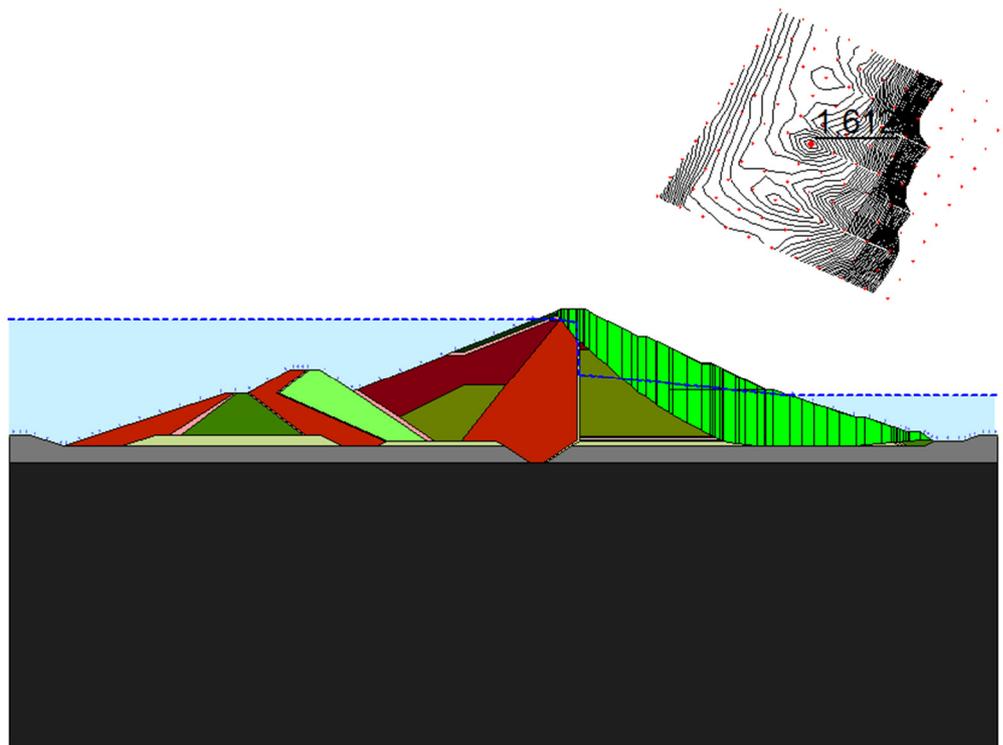


Figura 49 – Método de Spencer – Operação Normal - FS  
 Fonte: Autoria Própria

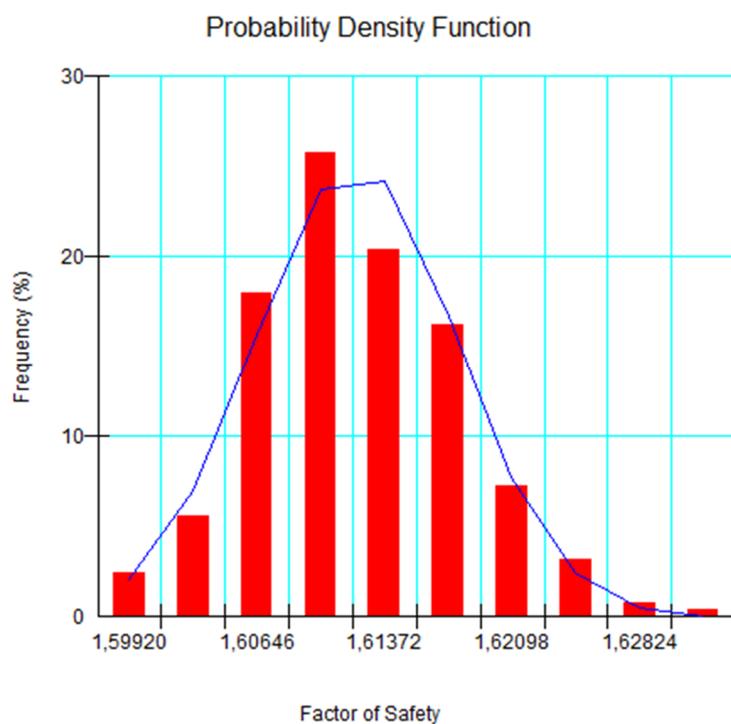


Figura 50 – Método de Spencer - Operação Normal – Distribuição de Frequência  
 Fonte: Autoria Própria

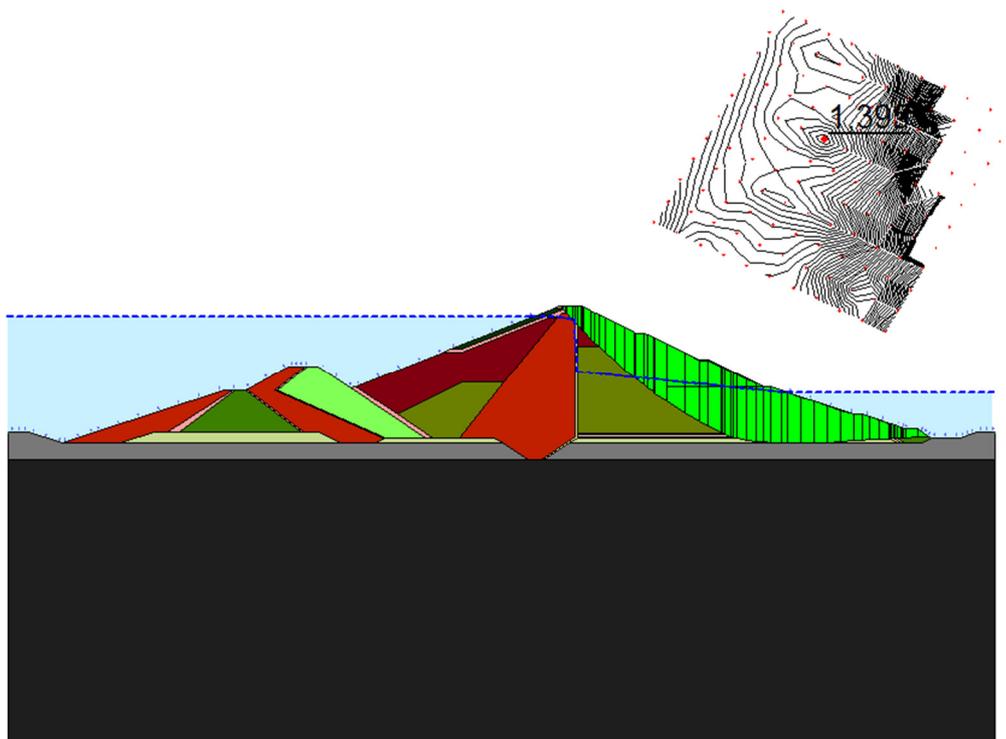


Figura 51 – Método de Spencer – Operação Normal com Sismo  $a_v=0,03g$  e  $a_h=0,05g$  - FS  
 Fonte: Autoria Própria

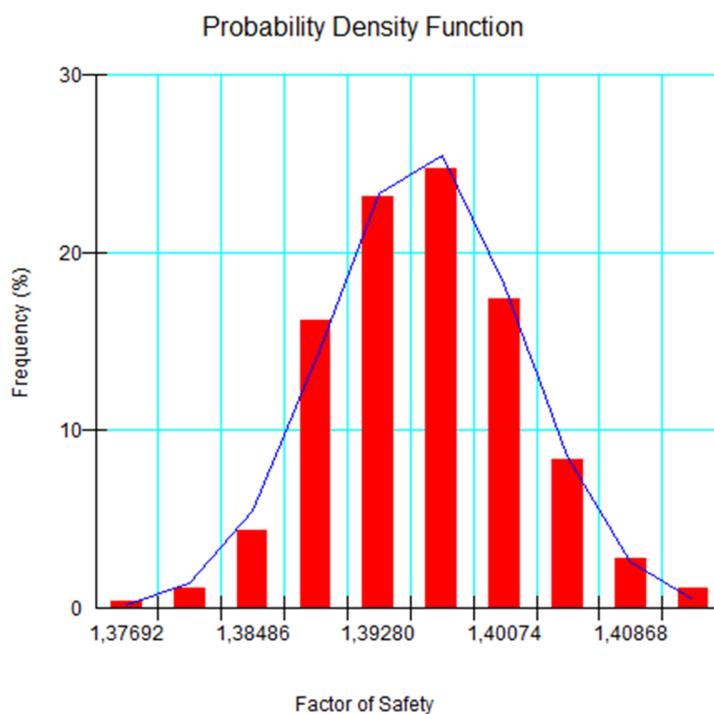


Figura 52 – Método de Spencer - Operação Normal com Sismo  $a_v=0,03g$  e  $a_h=0,05g$  –  
 Distribuição de Frequência  
 Fonte: Autoria Própria

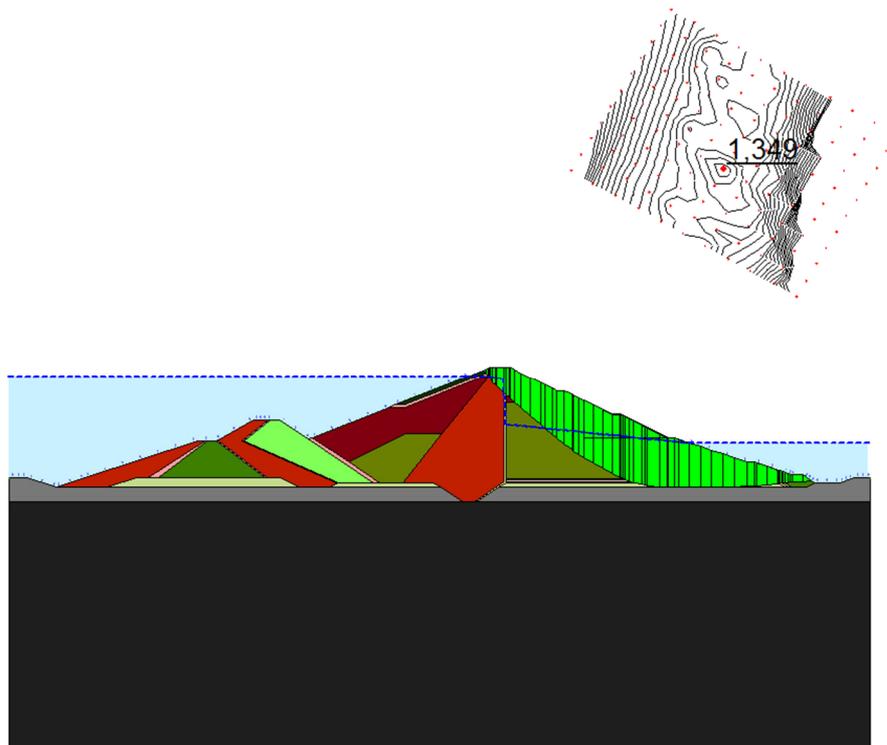


Figura 53 – Método de Spencer – Operação Normal com Sismo  $a_v=-0,03g$  e  $a_h=0,05g$  - FS  
 Fonte: Autoria Própria

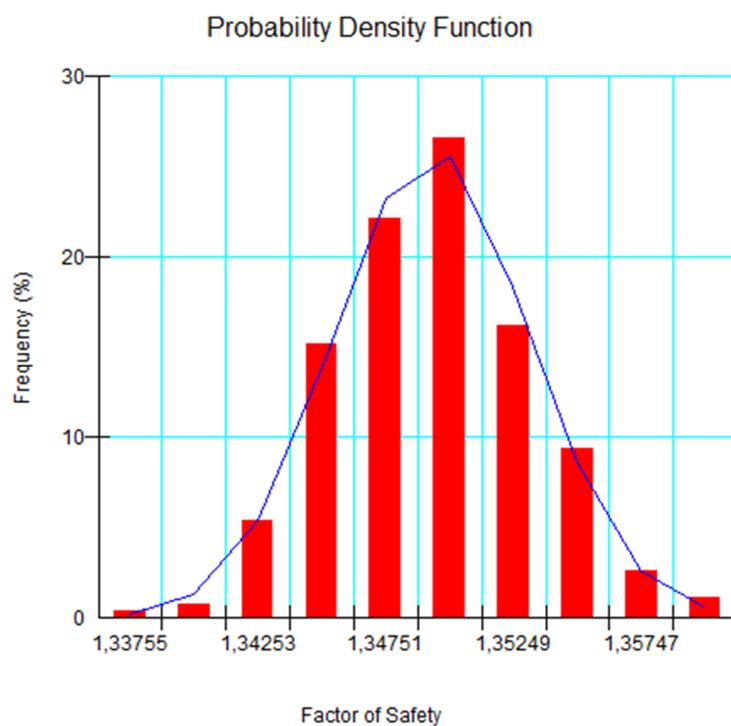


Figura 54 – Método de Spencer - Operação Normal com Sismo  $a_v=-0,03g$  e  $a_h=0,05g$  –  
 Distribuição de Frequência  
 Fonte: Autoria Própria

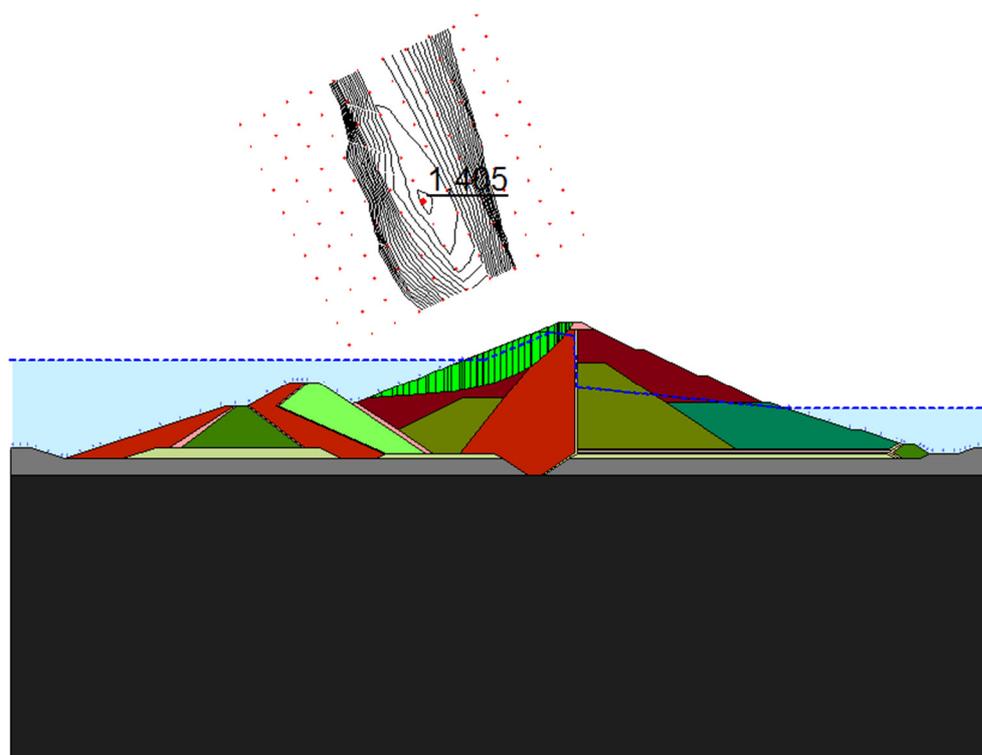


Figura 55 – Método de Spencer – Rebaixamento Rápido – NA El.302,00m a El.292,00m - FS  
Fonte: Autoria Própria

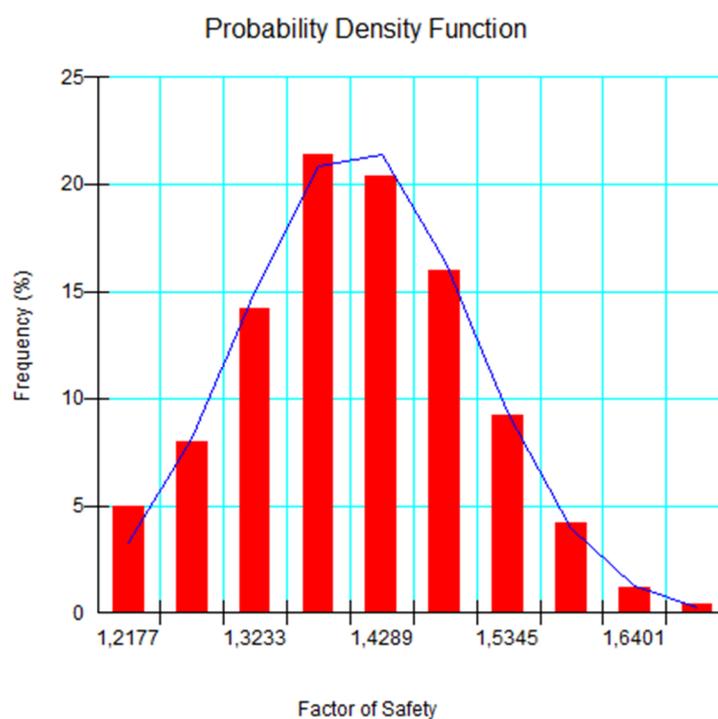


Figura 56 – Método de Spencer – Rebaixamento Rápido – NA El.302,00m a El.292,00m –  
Distribuição de Frequência  
Fonte: Autoria Própria

A Tabela 9 resume os principais dados obtidos nas análises probabilísticas.

**Tabela 9 - Resumo dos resultados obtidos pelos métodos probabilísticos**

Caso de Carga	Bishop				Spencer			
	FS crítico	FS médio	Desvio padrão	Pr (%)	FS crítico	FS médio	Desvio padrão	Pr (%)
Final de Construção - Montante	1,692	1,694	0,079	0	1,707	1,710	0,084	0
Final de Construção - Jusante	1,620	1,624	0,113	0	1,619	1,623	0,122	0
Operação Normal	1,604	1,604	0,009	0	1,612	1,612	0,006	0
Operação Normal com sismo av= 0,03g e ah= 0,05g	1,357	1,357	0,006	0	1,395	1,396	0,006	0
Operação Normal com sismo av= -0,03g e ah= 0,05g	1,323	1,323	0,005	0	1,349	1,349	0,004	0
Rebaixamento Rápido	1,392	1,394	0,081	0	1,405	1,407	0,097	0

**Fonte: Autoria própria**

Destaca-se o fato de as probabilidades de ruptura apresentarem valor nulo em todas as situações. Este valor é considerado como zero com a precisão de oito casas decimais no Geoslope, que abrange, como mostrado na tabela 6, a menor probabilidade de ruptura, com valor de  $3,0 \times 10^{-7}$ . O gráfico apresentado na Figura 16 também corrobora este resultado, quando o índice de confiabilidade é calculado e a probabilidade de ruptura é obtida. Percebe-se que além do alto fator de segurança obtido, as baixas variabilidades também contribuíram para o resultado.

Observa-se menores desvios nos casos em que a superfície de ruptura passa fora do espaldar, isso se deve ao fato de apenas o material do espaldar ter seus parâmetros geotécnicos variáveis.

De forma geral o fator de segurança médio teve resultado próximo ao fator de segurança determinístico de sua análise correspondente.

## 5. CONCLUSÕES

Conclui-se que a barragem de geometria e dados apresentados é segura, tanto do ponto de vista das análises determinísticas quanto probabilísticas. Todas as análises mostram condições que superam as recomendadas por norma. De fato, pode-se dizer que a configuração apresentada está superdimensionada e poderia ter seu custo reduzido modificando-se sua geometria. Não só os resultados determinísticos obtiveram fatores de segurança razoavelmente além do necessário como os estatísticos apresentaram probabilidade de ruptura igual a zero.

Especificamente para o método probabilístico vê-se que as curvas de distribuição de frequência do fator de segurança ficaram bem distantes do fator de segurança 1, isso ocorre não só devido às altas médias obtidas mas principalmente aos baixos desvios. Percebe-se que nos casos de carregamento em que a superfície crítica de ruptura ficou fora do espaldar, ou seja, nos casos de operação normal e operação normal com sismo, as variabilidades foram muito baixas, como citado anteriormente. Isso se deve ao fato de que os materiais que não compõem o espaldar não tiveram seus parâmetros variados nas análises. O material do espaldar foi o mais investigado por sua baixa resistência.

De Souza e Vieira (2007) empregando um solo semelhante ao utilizado para o espaldar neste trabalho obtiveram baixas probabilidades de ruptura, o que poderia indicar que se trata de um solo que gera baixa variação nos resultados da análise, podendo então, o próprio solo ter contribuído para as baixas probabilidades de ruptura.

Para um melhor resultado é interessante que se obtenha a variação dos parâmetros de todos os materiais envolvidos na barragem, uma vez que isso aumentaria o desvio padrão do fator de segurança e poderia levar inclusive a uma mudança brusca na superfície de ruptura crítica caso um dos materiais apresentasse uma variação excessiva em seus parâmetros.

Observando-se os fatores de segurança dos métodos determinísticos nota-se que há uma grande proximidade dos valores para os métodos de Bishop Simplificado e Spencer. Nota-se também que os fatores de segurança médios dos métodos probabilísticos assemelham-se entre si e também estão próximos aos

valores encontrados nas análises determinísticas, indicando a proximidade da superfície crítica encontrada em ambos os casos.

Pereira (2013) apresenta em seu trabalho a proximidade entre os fatores de segurança dos métodos de Spencer e Bishop Simplificado para barragens de terra em função de sua altura, indicando valores muito próximos entre os métodos para barragens com alturas superiores a 16m. De acordo com o autor, este fenômeno ocorre devido ao aumento do peso das fatias com a altura, que é a variável de maior relevância.

Com relação à aplicabilidade do método probabilístico, na disponibilidade do software não há mais dificuldades do que na aplicação do método determinístico, exceto pelo tempo de processamento, que pode levar muitas horas dependendo da quantidade de superfícies e casos a serem analisados. O maior limitante, por ser mais trabalhoso e envolver questões econômicas de tempo e recursos, é a necessidade de um maior número de dados para a execução dos ensaios, o que normalmente inviabiliza o procedimento. Para o caso específico do dimensionamento de barragens há uma boa chance de que haja a disponibilidade suficiente desses ensaios, já que no projeto executivo procura-se um bom detalhamento dos materiais envolvidos na construção da barragem.

Por fim conclui-se que a maior vantagem do método probabilístico sobre o determinístico é a maior quantidade de dados que aquele gera. Com isso é possível conhecer melhor o comportamento do talude em estudo e refinar melhor o projeto final de forma a deixá-lo mais econômico, porém ainda seguro.

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALONSO, E. E. **Risk Analysis of Slopes and Its Application to Slopes in Canadian Sensitive Clays**. Geotechnique, 1976.

APAZA, M. A. F.; BARROS, J. M. C. **Análise Probabilística de Estabilidade de Taludes pelo Método de Monte Carlo**. XVII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica (COBRAMSEG), Goiânia, Goiás. 2014.

AUGUSTO FILHO, O. 1992. **Caracterização geológico-geotécnica voltada à estabilização de encostas: uma proposta metodológica**. In: Conferência Brasileira sobre Estabilidade de Encostas, 1, Rio de Janeiro. Anais... Rio de Janeiro: ABMS/ABGE/PUCRJ, v.2, 1992.

BISHOP, A. W. **The use of the Slip Circle in the Stability Analysis of Slopes**. Geotechnique, Vol 5, No.1, 1955, pp 7-17.

DAS, BRAJA. M. **Fundamentos de Engenharia Geotécnica**. São Paulo: Ed. Thompson Pioneira, 6. ed., 2007.

BSMTIT. **Dados Técnicos da Barragem**. Comunicação Pessoal, recebida em Curitiba, 2014.

CONCEIÇÃO, D. A. **Análise Paramétrica da Estabilidade de um Talude Grampeado**. Projeto de Graduação, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2011.

CORPS OF ENGINEERS. **Engineering and Design Introduction to Probability and Reability Methods for Use in Geotechnical Engineering**. Engineering Technical Letter N 1110-2547. Department of the Army, U. S. Washington, DC.1997.

COSTA, T.; LANÇA, R. **Barragens**. Universidade do Algarve. Núcleo de hidráulica e ambiente. Faro, 2001.

COSTA,W. D. **Conheça todos os tipos de barragem**. 2013. Disponível em: <<http://www.comunitexto.com.br/conheca-todos-os-tipos-de-barragem/#.U7M3QrH-uRQ>>. Acesso em 8 de jul. 2014.

CRUZ, P. T. **100 Barragens Brasileiras**. Oficina de textos. São Paulo, 2004.

CRUZ, P.T.; MATERÓN, B.; Freitas, M. **Barragens de enrocamento com face de concreto**. Oficina de textos. São Paulo, 2009.

DE SOUZA, V. A. D; VIEIRA, V. P. P. B. **Análise probabilística do talude de jusante de uma barragem de terra em regime de operação**. Comitê Brasileiro de Barragens. XXVII Seminário Nacional de Grandes Barragens, Belém, Pará, 2007.

DELL'AVANZI, E. **Confiabilidade e probabilidade em análises de estabilidade de taludes**. Dissertação de Mestrado, Dept Eng. Civil, Pontifícia Universidade Católica de Rio de Janeiro.1995.

DELL'AVANZI, E.; SAYÃO, A. S. **Avaliação da probabilidade de ruptura de taludes**. Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica (COBRAMSEG), Brasília, 1998.

DIVINO, P. L.; **Comportamento de enrocamento em barragens – Estudo de caso da Barragem de Emborcação**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Ouro Preto, Escola de Minas, 2010.

DUNCAN, J. M. **State of Art: Limit Equilibrium and Finite-Element Analysis of Slope**. Journal of Geotechnical Engineering. Julho, 1996.

DUNCAN, J. M.; WRIGHT, S. G. **Soil Strength and Slope Stability**. New Jersey: John Wiley & Sons, 2005.

DYMINSKI A. S. **Estabilidade de taludes**. Material didático – Universidade Federal do Paraná, 2011.

ELETROBRÁS. **Critérios de Projeto Civil de Usinas Hidrelétricas**. Comitê Brasileiro de Barragens (CBDB), 2003.

EL-RAMLY, H. **Probabilistic analyses of landslide hazards and risks: bridging theory and practice**. Thesis (Doctor of Philosophy in Geotechnical Engineering), Faculty of Graduate Studies and Research, Department of Civil and Environmental Engineering, Edmonton, Alberta, Canada, 2001.

EPE, Empresa de Pesquisa Energética. **Anuário estatístico de energia elétrica 2013**. Ministério das Minas e Energia. Rio de Janeiro, 2013.

FAO, Food and Agriculture Organization of the United Nations. **Manual sobre pequenas barragens de terra**: guia para a localização, projeto e construção. Organização das Nações Unidas para a alimentação e a agricultura, Roma 2011.

FARIAS, M.M. E ASSIS, A. **Uma comparação entre métodos probabilísticos aplicados a estabilidade de taludes**. Congresso Brasileiro de mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, COBRAMSEG. Brasília, 1998.

FERNANDES, A. R. D. **Relato – Tema 100 – Construções de Barragens**. ANAIS do XXVIII Seminário Nacional de grandes barragens, 2007. Comitê Brasileiro de Barragens (CBDB). Belém, PA, 2007.

FERNANDES, G. **Caracterização geológico- geotécnica e propostas de estabilização da encosta do Morro do Curral – Centro de Artes e Convenções de Ouro Preto**. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Ouro Preto, Escola de Minas, 2010.

FERREIRA, J. L. F. **Análise de Estabilidade de Taludes pelos Métodos de jambu e Spencer**. Mestrado Integrado em engenharia Civil-2011/2012, Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Portugal, 2012.

FLORES, E. A. F. **Análises Probabilísticas da Estabilidade de Taludes Considerando a Variabilidade Espacial do Solo**. Dissertação de mestrado, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008.

GAMA, C. D. **Probabilistic methods for quarry slope safety**. X Congresso Nacional de Geotecnia. Lisboa, Portugal, 2006.

GEO-SLOPE. **Slope/W for slope analysis – User’s guide**. GEOSLOPE International Ltd., Canadá, 2012.

HIGHLAND, L.M.;BOBROWSKY, P. **The landslide handbook – A guide to understanding landslides**, Reston, Virginia, United States Geological Survey Circular 1325, 129p, 2008.

HO, I.H. **Parametric studies of slope stability analyses using three-dimensional finite element technique: geometric effect**. Journal of GeoEngineering, Vol. 9, No. 1, pp. 33-43, 2014.

JIANG, J.C.; Yamagami, T. **Three-dimensional slope stability analysis using an extended Spencer method**. Soils and Foundations, 44(4), 127-135, 2004.

LEPS, T.M. **Review of Shear Strength of Rockfill**. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, 1970.

LONGO, S. **Análise de risco aplicada a segurança de taludes nas pedreiras**. XV Encontro Nacional do Colégio de Engenharia Geológica e de Minas da Ordem dos Engenheiros. Ponta Delgada, 2005.

MAIA, J. A. C. **Métodos Probabilísticos Aplicados à Estabilidade de Taludes e Cavidades em Rocha**. Dissertação de Mestrado em Geotecnia, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, 2003.

MAIA, P.C.A. **Avaliação do comportamento geomecânico e de alterabilidade de enrocamentos**. Dissertação de Doutorado. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2001.

MANSOUR, Z. S. **Traditional Methods vs. Finite Difference Method for Computing Safety Factors of Slope Stability**.EJGE, Vol 16, 2011.

MARANGON, M. **Tópicos em Geotecnia e Obras de Terra**. Material didático ou institucional. Universidade Federal De Juiz De Fora, Faculdade de Engenharia, Departamento de Transportes e Geotecnia. Juiz de Fora, 2004.

MASSAD, F. **Obras de Terra**. Editora Oficina de Textos. São Paulo, 2003.

ORTIGÃO, J.A.R. **Mecânica dos Solos dos Estados Críticos**. 3ªed. Editora Terratek. Rio de Janeiro, 2007.

PEREIRA, T. S. **Avaliação do desempenho de diferentes métodos de análise de estabilidade de taludes em barragens de terra.** Dissertação de mestrado. Universidade de Santa Maria, Centro de Ciências Rurais, Programa de Pós Graduação em Engenharia Agrícola, Santa Maria, RS, 2013.

QUINTAS, F. E. G. **Planejamento da Construção de Barragens de Terra.** Dissertação de mestrado. Universidade do Porto, Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia FEUP, 2002.

ROGÉRIO, P.R. **Cálculo da estabilidade de taludes pelo Método de Bishop Simplificado.** Edgard Blücher, São Paulo, 1976.

SANDRONI, S. S.; SAYAO, A. S. F. J. **Avaliação Estatística do Coeficiente de Segurança de Taludes.** In: 1ª Conferencia Brasileira sobre Estabilidade de Encostas, I COBRAE, ABMS, Rio de Janeiro, 1992.

SILVA, A. F. P. **Desenvolvimento de um programa de cálculo automático de estabilidade de taludes pelo Método de Correia.** Mestrado integrado em Engenharia Civil - 2009/2010, Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Portugal, 2010.

SILVA, E. M. **Análise de Estabilidade de Taludes em solos de alteração de rochas metamórficas do quadrilátero ferrífero.** Dissertação de Mestrado Engenharia Civil, Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Viçosa, Minas Gerais, 2006.

SILVA, J. P. M. **Os métodos de equilíbrio limite e dos elementos finitos na análise de estabilidade de taludes.** Mestrado Integrado em Engenharia Civil - 2009/2010 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2009.

SILVA, M. J. F. **Análise de Estabilidade de Taludes pelo Método de Equilíbrio Limite Geral.** Mestrado Integrado em engenharia Civil - 2012/2013, Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Portugal, 2013.

SPENCER, E. A **Method of Analysis of Embankments assuming Parallel Interslice Forces.** Géotechnique, Vol 17(1), pp 11-26, 1967.

TOMINAGA, L. K.; SANTORO, J.; AMARAL, R. **Desastres Naturais: Conhecer para prevenir.** Instituto Geológico, Secretaria do Meio Ambiente, Governo do Estado de São Paulo, São Paulo, Ed.1, 2009.

TONUS, B. P. A. **Estabilidade de taludes: avaliação dos métodos de equilíbrio limite aplicados a uma encosta coluvionar e residual da serra do mar paranaense.** Dissertação de Mestrado – Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2009.

USACE – U.S. ARMY CORPS OF ENGINEERS. **Slope Stability.** EM 1110-2-1902, Washington, 2003.

VARNES, D. J. **Slope movement types and processes**. In: SCHUSTER & KRIZEK (eds.). Landslides: analysis and control. Transportation Research Board Special Report 176, National Academy of Sciences, Washington DC, 1978.

WOLFF, T. F.; HARR, M. E. **Slope Design for Earth Dams**. Reliability and Risk Analysis in Civil Engineering 2: Proceedings of 5<sup>th</sup> International Conference on Applications of Statistics and Probability in Soil and Structural Engineering, Vancouver, Canada, 1987.