



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ**  
**CAMPUS DE CRATEÚS**  
**CURSO DE ENGENHARIA CIVIL**

**ANTONIO EDIMAR DOS SANTOS JUNIOR**

**ANÁLISE PROBABILÍSTICA DA ESTABILIDADE DE TALUDES EM  
BARRAGENS DE TERRA NO ESTADO DO CEARÁ**

**CRATEÚS**

**2019**

ANTONIO EDIMAR DOS SANTOS JUNIOR

ANÁLISE PROBABILÍSTICA DA ESTABILIDADE DE TALUDES EM BARRAGENS  
DE TERRA NO ESTADO DO CEARÁ

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Civil do Campus de Crateús da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientadora: Prof<sup>ª</sup> Dr<sup>ª</sup>. Carla Beatriz Costa de Araújo.

CRATEÚS

2019

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação  
Universidade Federal do Ceará  
Biblioteca Universitária

Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

---

- S229a Santo Junior, Antonio Edimar dos.  
ANÁLISE PROBABILÍSTICA DA ESTABILIDADE DE TALUDES EM BARRAGENS DE TERRA  
NO ESTADO DO CEARÁ / Antonio Edimar dos Santo Junior. – 2019.  
121 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Campus de Crateús,  
Curso de Engenharia Civil, Crateús, 2019.  
Orientação: Profa. Dra. Carla Beatriz Costa de Araújo.

1. Barragens de terra. 2. Estabilidade de taludes. 3. Análise probabilística. I. Título.

CDD 620

---

ANTONIO EDIMAR DOS SANTOS JUNIOR

ANÁLISE PROBABILÍSTICA DA ESTABILIDADE DE TALUDES EM BARRAGENS  
DE TERRA NO ESTADO DO CEARÁ

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Civil do Campus de Crateús da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Aprovada em: 03/12/2019.

BANCA EXAMINADORA

---

Prof<sup>ª</sup>. Dr<sup>ª</sup>. Carla Beatriz Costa de Araújo (Orientadora)  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof. Dr. Alan Michell Barros Alexandre  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof<sup>ª</sup>. Ma. Janine Brandão de Farias Mesquita  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

A Deus

A minha mãe, minha ponte e porto seguro.

A minha vó.

## AGRADECIMENTOS

A Deus, pela resiliência que me deu nos momentos em que pensei em desistir.

À minha mãe que me deu apoio e suporte em todos os momentos, ao meu pai que sempre me apoiou nos meus estudos e ao meu irmão por me proporcionar alegrias imensuráveis.

À minha orientadora Dra Carla Beatriz Costa de Araújo, grande profissional e exemplo de ser humano, pela paciência e dedicação ao longo desse trabalho.

A todos os meus professores da graduação pelo conhecimento e exemplo, em especial: Luis Felipe Cândido, Alan Michell Barros Alexandre, Janine Brandão de Farias Mesquita, Jorge Luis Santos Ferreira, Leandro Soares Moreira, Tatiane Lima Batista, Giannini Italino Alves Vieira, Antonio Francisco Gomes Furtado Filho e Sandro Vagner de Lima.

Aos professores participantes da banca examinadora pelo tempo e pelas valiosas colaborações e sugestões.

À Érica Rodrigues Alexandre pelo carinho e apoio prestado ao longo dos últimos anos.

A Lucas Mourão Abreu pela parceria durante toda a graduação.

A todos os meus amigos que ao longo do curso me prestaram apoio, em especial: Joais Lima Fernandes, Hian Melo Sales, Francisco Roniel Soares Silva e Rafaela Ximenes Mota.

“[...] e disse: Até aqui nos ajudou o Senhor.”

(I Sm 7:12b)

## RESUMO

Este trabalho tem como objetivo geral realizar análises probabilísticas da estabilidade de taludes em barragens de terra do Estado do Ceará. Realizar o estudo da estabilidade de taludes por diferentes métodos, comparar os valores obtidos por eles, analisar o comportamento dos taludes nas situações de condições críticas de reservatório cheio e rebaixamento rápido, realizar análises probabilísticas de estabilidade considerando as variações nas características do solo e determinar as probabilidades de falha (PF) dos taludes das barragens analisada, podem ser categorizados como os objetivos específicos deste trabalho. Foram escolhidas como objetos de estudo a Barragem Faé e a Barragem Orós e foi utilizado o *software* Slide 6.0 para a realização das análises pelos métodos Fellenius, Bishop Simplificado, Janbu Simplificado, Spencer e Morgenstern-Price. Este estudo foi realizado em quatro etapas. A primeira consistiu na revisão bibliográfica sobre barragens de terra e análise da estabilidade de taludes e no levantamento de dados sobre as barragens estudadas, a segunda foi a modelagem das barragens no Slide 6.0, a terceira etapa foi a realização das análises no software e por último a revisão dos resultados. Foram considerados como valores limites do fator de segurança 1,5 para a condição de reservatório cheio e 1,1 para a condição de rebaixamento rápido. Os métodos de Janbu e de Fellenius majoritariamente apresentaram os menores valores de Fator de Segurança e consequentemente maiores valores de probabilidade de Falha. No geral os resultados obtidos pelos diferentes métodos não mostraram grande divergência entre si. Para a condição de reservatório cheio nenhuma das barragens apresentou Probabilidade de Falha maior que 0,000% para o talude de jusante. Nessa condição, tendo como referência o método de Morgenstern-Price os valores de Fator de Segurança probabilístico foram 2,180 para a Barragem Fae e 1,925 para a Barragem Orós. Na condição de rebaixamento rápido do nível máximo do reservatório até metade, numa taxa de 15 cm/dia, a Barragem Faé chegou à condição de Fator de Segurança menor que 1,1 no 29º estágio, dos 45 estágios analisados, com uma Probabilidade de Falha de 41,525% e um  $FS_P$  igual a 1,091. A barragem Orós, chegou à mesma condição no 62º estágio, dos 150 analisados, com probabilidade de Falha de 21,9% e  $FS_P$  igual a 1,076. O método escolhido para a realização dos cálculos do Fator de Segurança influencia no resultado obtido, tanto na análise probabilística quanto na análise determinística, cabendo ao projetista escolher entre os métodos mais ou menos conservadores.

**Palavras-chave:** Barragens de terra. Estabilidade de taludes. Análise probabilística.



## ABSTRACT

The objective of this work is to perform probabilistic analyzes of slope stability in Ceará State earth dams. Carry out the study of slope stability by different methods, compare the values obtained by them, analyze the behavior of the slopes in situations of critical conditions of full reservoir and rapid lowering, perform probabilistic stability analyzes considering the variations in soil characteristics and determine the failure probabilities (PF) of the dam analyzed can be categorized as the specific objectives of this work. Faé Dam and Orós Dam were chosen as study objects and Slide 6.0 software was used to perform the analysis by the Fellenius, Simplified Bishop, Simplified Janbu, Spencer and Morgenstern-Price methods. This study was conducted in four stages. The first consisted of a bibliographic review about earth dams and slope stability analysis and data collection about the studied dams, the second was the dam modeling in Slide 6.0, the third step was the analysis with the software and lastly the review of the results. 1.5 for the full reservoir condition and 1.1 for the fast lowering condition were considered as safety factor limit values. The Janbu and Fellenius methods presented the lowest Safety Factor values and consequently the highest probability of failure. In general the results obtained by the different methods did not show great divergence among themselves. For the full reservoir condition none of the dams had a Probability of Failure greater than 0.000% for the downstream slope. In this condition, based on the Morgenstern-Price method, the probabilistic Safety Factor values were 2,180 for the FÁe Dam and 1,925 for the Orós Dam. At the condition of rapid lowering of the maximum reservoir level in half at a rate of 15 cm/day, the Faé Dam reached a Safety Factor condition of less than 1.1 at the 29th stage, of the 45 stages analyzed, with a Failure Probability of 41.525% and an  $FS_P$  of 1.091. The Orós dam reached the same condition in the 62nd stage, of the 150 analyzed, with a probability of failure of 21.9% and  $FS_P$  equal to 1.076. The method chosen to perform the Safety Factor calculations influences the result obtained, both in probabilistic and deterministic analysis, and it is up to the designer to choose between more or less conservative methods.

**Keywords:** Dams of earth. Slope stability. Probabilistic analysis.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Seções de Barragens rígidas: a) Gravidade; b) Arco; c) Contraforte.....	22
Figura 2 – Perfis de Barragens de terra: a esquerda, barragem homogênea; a direita barragem zoneada.....	23
Figura 3 – Principais medidas de uma barragem.....	23
Figura 4 – Componentes do corpo da barragem.....	25
Figura 5 – Ilustração do processo de erosão regressiva.....	29
Figura 6 – Drenagem interna de uma barragem com diferentes dispositivos de proteção: a) sem dispositivo; b) com <i>rock-fill</i> ; c) filtro horizontal; d) filtro horizontal e filtro vertical.....	29
Figura 7 – Talude de montante da barragem do Realejo, Crateús-CE .....	30
Figura 8 – Tipos de Ruptura: a) Desprendimento; b) Escorregamento ( <i>landslide</i> ); c) Rastejo ( <i>creep</i> ).....	31
Figura 9 – Ação das forças deslizantes (F), do fluxo de água (f) e da resistência ao cisalhamento ( $\tau$ ).....	32
Figura 10 – Ilustração do critério de Mohr.....	33
Figura 11 – Critério de Mohr-Coulomb .....	34
Figura 12 – Forças atuantes em uma fatia de solo.....	36
Figura 13 – Variação do fator $f_0$ em função do parâmetro d/L e do tipo de solo .....	39
Figura 14 – Probabilidade de Falha em função do grau de confiabilidade .....	42
Figura 15 – Etapas de desenvolvimento do trabalho.....	44
Figura 16 – Localização da Barragem Faé .....	46
Figura 17 – Barragem Faé .....	46
Figura 18 – Seção tipo da barragem Faé .....	47
Figura 19 – Localização da Barragem Orós .....	49
Figura 20 – Barragem Orós .....	50
Figura 21 – Seção tipo da Barragem Orós.....	50
Figura 22 – Seção tipo da Barragem Faé no Slide 6.0 .....	53
Figura 23 – Seção tipo da Barragem Orós no Slide 6.0 .....	53
Figura 24 – Barragem Faé: superfície de ruptura para o método de Morgenstern-Price (reservatório cheio).....	59
Figura 25 – Barragem Faé: histograma do fator de segurança para o método de Morgenstern-Price (reservatório cheio).....	60

Figura 26 – Barragem Orós: Superfície de ruptura para o método de Morgenstern-Price (reservatório cheio).....	61
Figura 27 – Barragem Orós: histograma do Fator de segurança para o método de Morgenstern-Price (reservatório cheio).....	62
Figura 28 – Barragem Faé: gráfico do fator de segurança vs. tempo (d) para o método Morgenstern-Price .....	63
Figura 29 – Barragem Faé: gráfico Probabilidade de Falha vs. tempo (d) para o método Morgenstern-Price .....	64
Figura 30 – Barragem Faé: superfície de ruptura para o método de Morgenstern-Price (rebaixamento rápido, dia 29).....	65
Figura 31 – Barragem Faé: histograma do Fator de Segurança para o método de Morgenstern-Price (rebaixamento rápido, dia 29) .....	65
Figura 32 – Barragem Faé: superfície de ruptura para o método de Morgenstern-Price (rebaixamento rápido, PF=99,426%) .....	66
Figura 33 – Barragem Faé: histograma do Fator de Segurança para o método de Morgenstern-Price (rebaixamento rápido, PF=100%) .....	67
Figura 34 – Barragem Orós: gráfico do fator de segurança vs. tempo (d) para o método Morgenstern-Price .....	68
Figura 35 – Barragem Orós: gráfico Probabilidade de Falha vs. tempo (d) para o método Morgenstern-Price .....	69
Figura 36 – Barragem Orós: superfície de ruptura para o método de Morgenstern-Price (rebaixamento rápido, dia 62).....	70
Figura 37 – Barragem Orós: histograma do Fator de Segurança para o método de Morgenstern-Price (rebaixamento rápido, dia 62) .....	70
Figura 38 – Barragem Orós: superfície de ruptura para o método de Morgenstern-Price (rebaixamento rápido, PF=94,90%) .....	71
Figura 39 – Barragem Orós: histograma do Fator de Segurança para o método de Morgenstern-Price (rebaixamento rápido, PF=94,90%) .....	72

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Custo relativo de alguns tipos de barragens .....	26
Tabela 2 – Propriedades Médias dos Solos – Aspectos Quantitativos .....	27
Tabela 3 – Características dos métodos de equilíbrio limite .....	37
Tabela 4 – Características dos métodos de equilíbrio limite .....	37
Tabela 5 – Fatores de Segurança mínimo para verificação da estabilidade .....	40
Tabela 6 – Propriedades geotécnicas dos materiais de construção da Barragem Faé .....	47
Tabela 7 – Desvio padrão das propriedades geotécnicas .....	48
Tabela 8 – Propriedades geotécnicas dos materiais de construção da Barragem Orós .....	51
Tabela 9 – Fatores de Segurança para as condições críticas, Barragem Orós .....	51
Tabela 10 – Propriedades Médias dos Solos de acordo com o SCUS nas unidades utilizadas pelo <i>software</i> Slide 6.0. ....	54
Tabela 11 – Preenchimento dos valores das propriedades geotécnicas dos materiais de construção da Barragem Faé.....	54
Tabela 12 – Preenchimento dos valores das propriedades geotécnicas dos materiais de construção da Barragem Orós.....	55
Tabela 13 – Covariância padrão para os principais parâmetros geotécnicos .....	55
Tabela 14 – Desvio padrão das propriedades geotécnicas dos materiais de construção da Barragem Faé.....	56
Tabela 15 – Desvio padrão das propriedades geotécnicas dos materiais de construção da Barragem Orós.....	56
Tabela 16 – Barragem Faé: Fatores de Segurança, probabilísticos e determinísticos, e Probabilidade de Falha para cada método de cálculo na condição de reservatório cheio .....	58
Tabela 17 – Barragem Orós: Fatores de Segurança, probabilísticos e determinísticos e Probabilidade de Falha para cada método de cálculo (reservatório cheio) .....	61
Tabela 18 – Barragem Faé: dia em que ocorre Fator de Segurança Probabilístico $< 1,1$ e dia no qual ocorre máxima Probabilidade de Falha .....	63
Tabela 19 – Barragem Orós: dia em que ocorre Fator de Segurança Probabilístico $< 1,1$ e dia no qual ocorre máxima Probabilidade de Falha .....	67

## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

ANA	Agência Nacional de Águas
CCR	Concreto Compactado a Rolo
COGERH	Companhia de Gestão de Recursos Hídricos
SUCS	Sistema Unificado de Classificação dos Solos

## LISTA DE SÍMBOLOS

FS	Fator de Segurança
FS <sub>p</sub>	Fator de Segurança Probabilístico
PF	Probabilidade de Falha
CC	Cota de Crista
CLR	Cota do Leito do Rio
CS	Cota de Soleira
Ho	Altura da Lâmina máxima de Sangria
F	Folga
R	Revanche
C <sub>H</sub>	Carga Hidráulica
CTI	Cota do topo impermeável
d	Espessura do permeável
B	Largura de base
b	Largura de crista
K	Coefficiente de permeabilidade
$\tau_f$	Resistência do solo à tensão de cisalhamento
c	Coesão
$\phi$	Ângulo de atrito interno
$\sigma$	Tensão normal no plano de ruptura
F <sub>res</sub>	Força Resistente
F <sub>sol</sub>	Força Solicitante
F <sub>h</sub>	Força horizontal
F <sub>v</sub>	Força vertical
M <sub>o</sub>	Momento em torno do ponto O
P	Peso
E <sub>i</sub>	Forças horizontais na lateral da fatia
X <sub>i</sub>	Forças tangenciais na lateral da fatia
Z <sub>i</sub>	Resultantes da interação entre fatias
T	Força normal solicitante
N	Reação normal a Base da Fatia
S	Reação tangencial a Base da Fatia

$\alpha$	Ângulo da base da fatia em relação a horizontal
$b_i$	Largura da base da fatia $i$
$F_0$	Fator de Correção
NA	Nível de água
$\beta$	Grau de confiabilidade da análise
$\mu_M$	Média da margem de Segurança
$\sigma_M$	Desvio Padrão da margem de segurança
M	Margem de Segurança
R	Resistencia do sistema
Q	Tensão a qual o sistema é exposto
$\Sigma_{FS}$	Desvio padrão do Fator de Segurança
$\Phi$	Função da distribuição normal
$\gamma$	Peso específico do solo
$N_s$	Número de Simulações Necessárias
$h_{\alpha/2}$	Função de confiabilidade
$\varepsilon$	Precisão
CV	Coeficiente de variação
$FS_D$	Fator de Segurança Determinístico

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	17
1.1.	Problematização e Justificativa	17
1.2.	Objetivos	18
1.2.1.	<i>Objetivo Geral</i>	18
1.2.2.	<i>Objetivos específicos</i>	18
1.3.	Delimitação temática	19
1.4.	Estrutura do Trabalho	19
<b>2</b>	<b>ESTABILIDADE DE TALUDES EM BARRAGENS DE TERRA</b>	21
2.1.	Aspectos Gerais	21
2.2.	Barragens de terra	22
2.2.1.	<i>Principais componentes das barragens de terra</i>	23
2.2.2.	<i>Materiais de construção</i>	26
2.2.3.	<i>Percolação em barragens de terra</i>	27
2.3.	Estabilidade de taludes	30
2.3.1.	<i>Modos de ruptura</i>	31
2.3.2.	<i>Resistência dos solos ao cisalhamento</i>	31
2.3.3.	<i>Estado de equilíbrio-limite e Fator de Segurança</i>	34
2.3.4.	<i>Métodos de cálculo de estabilidade de taludes</i>	35
2.3.5.	<i>Condições de tensões críticas</i>	39
2.4.	Análise probabilística	40
2.4.1.	<i>Probabilidade de Falha e Grau de Confiabilidade</i>	41
2.4.2.	<i>Simulação de Monte-Carlo</i>	43
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b>	44
3.1.	Etapas de execução do trabalho	44
3.2.	Levantamento de dados	45



3.2.1. Barragem Faé .....	45
3.2.2. Barragem Orós .....	48
3.3. Método de execução das análises da estabilidade de taludes.....	52
3.3.1. Lançamento da geometria no Slide 6.0.....	52
3.3.2. Arranjo dos materiais de construção .....	53
3.3.3. Análise nas condições críticas .....	56
<b>4 RESULTADOS .....</b>	<b>57</b>
4.1. Condição crítica para o talude de Jusante – reservatório cheio.....	57
4.1.1. Barragem Faé .....	57
4.1.2. Barragem Orós .....	60
4.2. Condição crítica para o talude de montante – rebaixamento rápido .....	62
4.2.1. Barragem Faé .....	62
4.2.2. Barragem Orós.....	67
<b>5 CONCLUSÃO .....</b>	<b>73</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>75</b>
<b>APÊNDICE A – BARRAGEM FAÉ .....</b>	<b>78</b>
<b>APÊNDICE B – BARRAGEM ORÓS .....</b>	<b>99</b>
<b>ANEXO A – TABELA DE PROPRIEDADES MÉDIAS DOS SOLOS.....</b>	<b>120</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Barragens são obras de suma importância, principalmente para regiões onde a convivência com a seca é uma realidade cotidiana. Estados de clima árido, onde a sentença anterior é um fato, como o Ceará, utilizam tais obras para a garantia de água em períodos de estiagem, para o consumo humano e animal, além de outras finalidades como irrigação e recreação (CARVALHO, 1983).

Segundo Araújo, Melo e Freitas (2004), em 2004 o abastecimento humano no Estado do Ceará era provido 91% pelas barragens, o que demonstra a grande relevância delas. Segundo a Secretaria dos Recursos Hídricos do Estado do Ceará (CEARÁ, 2018) a Companhia de Gestão de Recursos Hídricos (COGERH) tem sob sua responsabilidade o monitoramento de 155 açudes que ao todo somam uma capacidade total de acumulação de 18,64 bilhões de m<sup>3</sup>. O contorno das situações de calamidade, geradas pelas secas, pelo o uso dessas construções impacta positivamente no desenvolvimento econômico e social do Estado, pois abre novos leques de amplificação das atividades econômicas tendo em vista a pluralidade de usos da água barrada.

O colapso dessas construções também tem grande impacto social e econômico. Como consta no Manual do Empreendedor sobre Segurança de Barragens da Agência Nacional de Águas – ANA (2016), uma barragem é uma obra cuja sua construção e operação oferecem danos potenciais para as pessoas e os bens existentes no entorno, tanto materiais quanto ambientais. Em especial, nas barragens de terra, muitos são os fatores que podem induzir o corpo do barramento ao colapso repentino ou progressivo.

Incidentes com barragens de terra no Estado do Ceará já foram registrados diversas vezes. Menescal *et al.* (2011), registra o uso do termo “barragem Sonrisal” pelo o público e pelos jornais para designar essas obras, porque elas não resistiam as chuvas iniciais. Nessas construções a estabilidade dos taludes, ou a falta dela, dentre outros, é fator determinante para a ocorrência do colapso da estrutura. Existem diversos métodos, utilizados no processo de projeção do corpo do barramento, para a verificação da estabilidade dos taludes.

### 1.1. Problematização e Justificativa

As análises comumente realizadas para verificar a estabilidade dos taludes em barragens de terra são baseadas nos métodos determinísticos que usam de aproximações e generalizações que não correspondem de maneira representativa à grande massa de solo

presente nos taludes e a sua grande variabilidade das propriedades geotécnicas. A estabilidade é expressa por um Fator de Segurança (FS) obtido por cálculos que utilizam uma média de parâmetros geotécnicos obtidos em ensaios de laboratório. Esse valor médio, no entanto, como já mencionado, não é capaz de caracterizar as variações das propriedades físicas e geotécnicas presentes nas grandes massas de solo como as barragens de terra e utilizá-lo, unicamente, é desprezar as incertezas inerentes à análise do fenômeno, o que se caracteriza como um déficit nos métodos determinísticos.

O uso da probabilidade no processo de verificação da estabilidade passa à análise a capacidade de melhor representação da variação dos parâmetros geotécnicos dos solos, proporcionando uma melhor avaliação do risco de rompimento e do comportamento do maciço. A análise probabilística da estabilidade de taludes fornece como resultado, além do Fator de Segurança Probabilístico ( $FS_p$ ), uma Probabilidade de Falha (PF), o que amplia o entendimento do projetista sobre a situação com a qual está trabalhando.

A análise probabilística tem, portanto, o potencial de ampliar o controle sobre a segurança do barramento a ser projetado e executado, seu estudo é bem explorado em diversas publicações, porém seu uso não é comum, em especial nas barragens cearenses. Essa assertiva é o mote para esse trabalho.

## **1.2. Objetivos**

### ***1.2.1. Objetivo Geral***

Realizar análises probabilísticas da estabilidade de taludes em barragens de terra do Estado do Ceará.

### ***1.2.2. Objetivos específicos***

Os objetivos específicos são:

- Realizar o estudo da estabilidade de taludes por diferentes métodos;
- Comparar os valores obtidos pelos diferentes métodos;
- Analisar o comportamento dos taludes nas situações de condições críticas (reservatório cheio e rebaixamento rápido);

- Realizar análises probabilísticas de estabilidade considerando as variações nas características do solo;
- Determinar as probabilidades de falha (PF) dos taludes das barragens analisadas.

### **1.3. Delimitação temática**

Neste trabalho foram tomadas como objeto de estudo duas barragens de terra do Estado do Ceará, a Barragem Faé e a Barragem Orós, cujos dados de geometria e propriedades geotécnicas do maciço foram colhidos em sítios eletrônicos e artigos científicos. Esses dados foram inseridos como entrada no *software* Slide versão 6.0, desenvolvido pela empresa Rocscience, para a realização das análises de estabilidade de talude nas condições críticas.

A metodologia de Monte-Carlo foi utilizada, na análise probabilística, como meio para a consideração das variações das características geotécnicas no maciço de cada barragem, a saber: ângulo de atrito, coesão e peso específico.

### **1.4. Estrutura do Trabalho**

O presente trabalho está dividido em cinco seções. A presente seção, apresenta uma visão geral sobre o tema abordado e o mote do trabalho, assim como os objetivos, delimitação temática do tema abordado e uma esquematização da estrutura deste documento, detalhando todas as seções e descrevendo o conteúdo de cada uma.

A segunda seção é a revisão bibliográfica onde consta a fundamentação teórica do presente trabalho. Nela, são abordados os assuntos: barragens de terra, os tipos, materiais utilizados na construção e especificidades; e análise de estabilidade de taludes, métodos determinísticos e análise probabilística para geração de amostragem a partir de variáveis aleatórias.

Os materiais e métodos utilizados durante a pesquisa são apresentados na terceira seção. Ela subdivide-se em: uma apresentação das barragens analisadas, sua localização e características importantes para o desenvolvimento do presente trabalho; e as etapas do processamento dos dados e geração dos resultados.

Na quarta seção, Resultados, são apresentados e analisados os resultados obtidos através do uso do *software* Slide 6.0. As considerações finais deste trabalho encontram-se na seção cinco. Nela são abordadas as conclusões obtidas durante o desenvolvimento do presente trabalho, em função dos objetivos específicos aqui apresentados.

Além das cinco seções têm-se as referências bibliográficas, os apêndices, que trazem os gráficos, tabelas e imagens produzidas ao longo do desenvolvimento do presente trabalho, e o anexo.

## 2 ESTABILIDADE DE TALUDES EM BARRAGENS DE TERRA

Nesta seção serão expostos os conhecimentos que foram essenciais para a execução deste trabalho, a saber: aspectos gerais sobre barragens, aspectos técnicos sobre barragens de terra, estabilidade de taludes e análise probabilística.

### 2.1. Aspectos Gerais

Barragens, segundo Carvalho (1983) e Medeiros (2014), são todos os tipos de obstáculos artificiais ao fluxo de algum curso de água, com o objetivo de retê-la. Essas interrupções ocasionam o acúmulo do fluxo de forma a disponibilizar para diversos fins a água, que outrora teria seu uso restrito devido seu regime hidráulico.

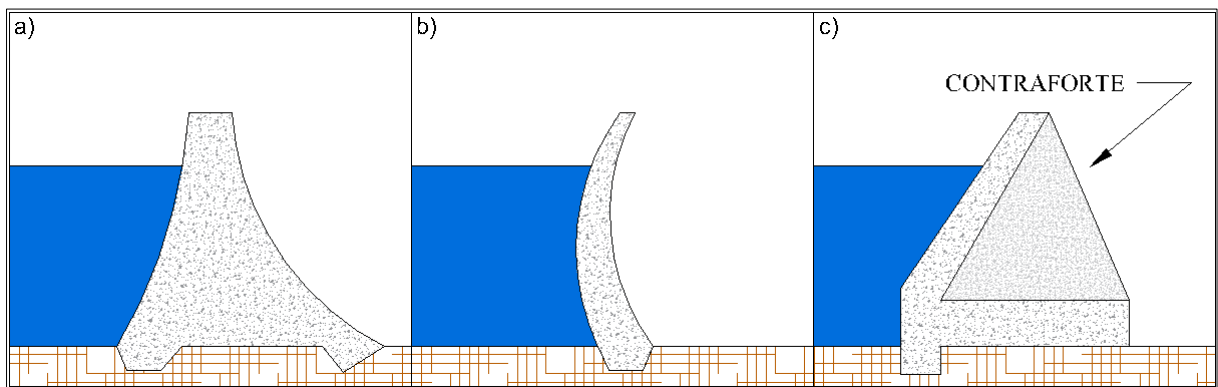
Quanto às finalidades desse tipo de obra, Carvalho (1983) considera ser um fator determinante para o tipo de projeto a ser executado, citando como tais: o abastecimento humano, o abastecimento animal, o abastecimento industrial, a irrigação, a produção de energia elétrica, o controle de cheias, a piscicultura, a regularização de rios, a recreação, a navegação e a realização de pesquisas.

A pluralidade das finalidades de uma barragem, além dos fatores ambientais, geotécnicos e topográficos que são específicos, faz com que cada uma dessas obras seja única. No entanto elas podem ser agrupadas e classificadas de acordo com os seguintes critérios enumerados de segundo Carvalho (1983) e Costa (2012):

- Classificação quanto ao fluxo barrado:
  - Sobrejacentes – barragem de fluxo superficial;
  - Subterrâneas – barragens de fluxo subterrâneo
- Classificação quanto à submersão:
  - Submersíveis (galgáveis) – são projetadas para funcionar em situações de submersão eventual;
  - Insubmersíveis: devem funcionar à altura de lâmina de água sempre inferior à altura do barramento.
- Classificação quanto à finalidade:
  - De regularização: tem a função de normalizar o regime hidrológico através da retenção do fluxo;

- De contenção: tem a função de evitar possíveis inundações, podendo ser empregadas também para o acúmulo de sedimentos, resíduos industriais ou rejeitos de mineração.
- Classificação quanto à arquitetura e materiais constituintes:
  - Rígida – construção em monoblocos de material rígido como alvenaria, concreto comum ou concreto compactado a rolo (CCR). Esse tipo subdivide-se em: gravidade, arco e contraforte (Figura 1);
  - Não-rígida – construída de terra ou enrocamento (rocha com núcleo ou face impermeável).
  - Mistas – constituída por mais de um material.

**Figura 1** – Seções de Barragens rígidas: a) Gravidade; b) Arco; c) Contraforte.

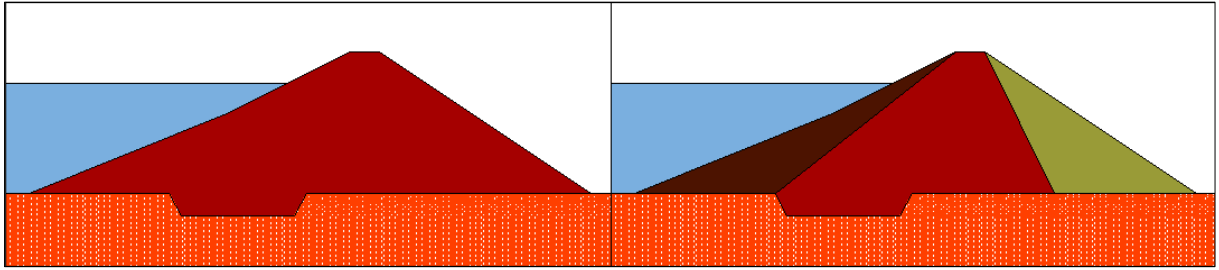


**Fonte:** O autor (2019).

## 2.2. Barragens de terra

As barragens de terra, são enquadradas na classificação de barragens não-rígidas, e podem ser divididas em dois grupos, as barragens de terra homogêneas e as barragens de terra zoneadas (CAPUTO, 2017). As barragens do tipo homogêneas apresentam em sua constituição um único material em predominância, tendo apenas, formados por outros materiais, a presença de drenos para o controle de infiltrações (CAROÇA, 2007). As barragens do tipo zoneadas apresentam, como o próprio nome denota, um zoneamento da seção transversal, em dois ou mais tipos de materiais, o que depende das características dos materiais utilizados na sua construção (CAROÇA, 2007; CAPUTO, 2017). A Figura 2 apresenta exemplos dos perfis de barragem de terra citados acima.

**Figura 2** – Perfis de Barragens de terra: à esquerda, barragem homogênea; à direita barragem zoneada.



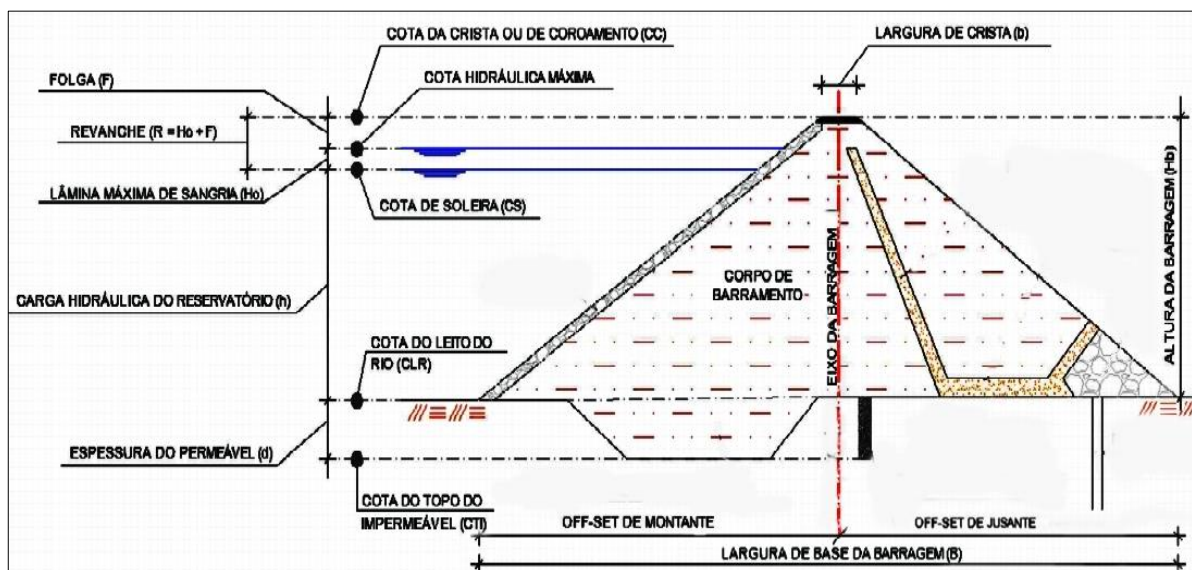
Fonte: O autor (2019).

É necessário entender que o corpo de uma barragem de terra tem uma complexidade e singularidade, justificadas pelas especificidades dos materiais empregados na sua construção. Os materiais são dispostos ao longo da seção transversal de forma a desempenharem funções distintas e necessárias, de acordo com suas propriedades físicas e geotécnicas (QUINTAS, 2002).

### 2.2.1. Principais componentes das barragens de terra

Na Figura 3 observa-se uma seção típica de uma barragem de terra, nela estão presentes os principais parâmetros de medida de uma barragem, que são obtidos pelos estudos preliminares e pelo dimensionamento da geometria do corpo da barragem.

**Figura 3** – Principais medidas de uma barragem



Fonte: Adaptado de Soares (2017).



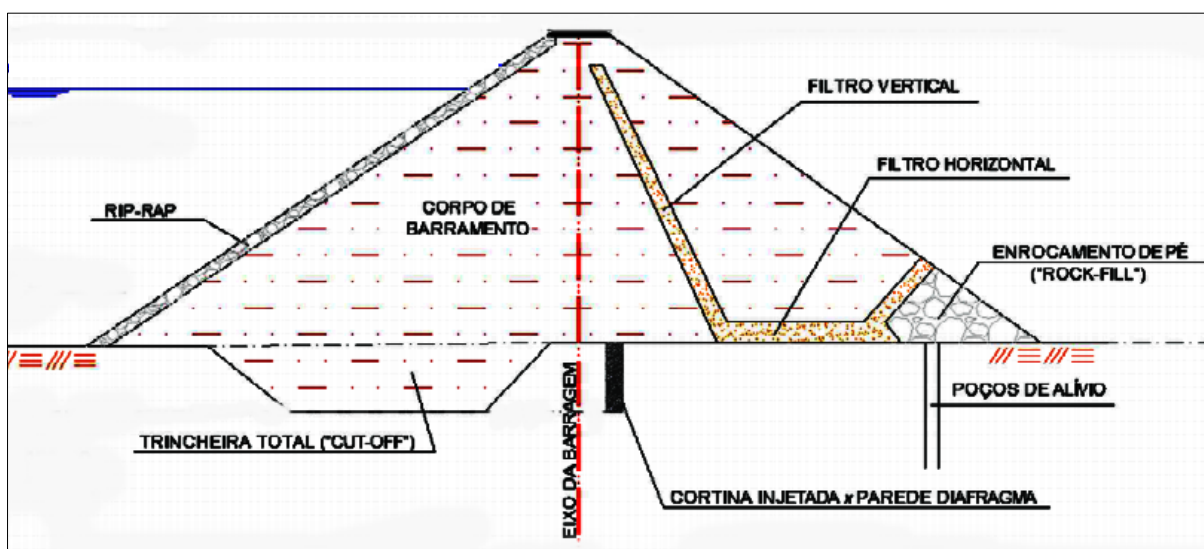
Segue uma pequena descrição de cada um desses componentes baseada nos estudos de Soares (2017):

- Cota de crista (CC) – altitude do topo do barramento (também chamada de cota de coroamento);
- Cota do leito do rio (CLR) – altitude do leito do rio, onde é posta a base do corpo do barramento;
- Altura do barramento (Hb) – diferença entre a cota de crista e a cota do leito do rio, sendo então o tamanho da extensão vertical da barragem.
- Cota de soleira (CS) – altitude que corresponde ao ponto da iminência do sangramento do reservatório, assim sendo, é a cota do ponto mais baixo do vertedouro;
- Cota hidráulica máxima – altitude de armazenamento em que ocorre o sangramento na vazão máxima para qual o reservatório foi projetado;
- Lâmina máxima de sangria (Ho) – diferença entre a cota hidráulica máxima e a cota de soleira (CS);
- Folga (F) – diferença entre a cota de crista (CC) e a cota hidráulica máxima, é uma medida prevista em projeto com a finalidade de evitar o galgamento, situação crítica para barragens de terra (CARVALHO, 1983);
- Revanche (R) – diferença entre a cota de crista (CC) e a cota de soleira, pode-se observar que corresponde à soma da folga com a altura da lâmina máxima de sangria;
- Carga hidráulica do reservatório (C<sub>H</sub>) – é a altura de água armazenada no reservatório, medida desde a cota do leito do rio (CLR);
- Cota do topo do impermeável (CTI) – altitude do topo impermeável do solo, caracterizado por material rochoso aflorante;
- Espessura do permeável (d) – camada de solo compreendida abaixo do corpo da barragem que permite a percolação da água;
- Largura de base (B) – é o comprimento da base do corpo da barragem;
- Largura de crista (b) – é o comprimento do ponto mais alto do corpo do barramento;
- Off-set de montante – é o comprimento de base desde a estrema montante até o eixo central da seção transversal da barragem;

- Off-set de jusante – é o comprimento de base desde o eixo central da seção transversal da barragem até a estrema jusante;

Na constituição do corpo do barramento existem alguns componentes que são comuns a quase todas as barragens. Na Figura 4 pode-se observar os constituintes que são de suma importância para a operação e segurança da barragem. Além desses, há outras estruturas que também podem ser incorporadas, dependendo da necessidade de cada projeto.

**Figura 4** – Componentes do corpo da barragem



Fonte: Adaptado de Soares (2017).

Para essas estruturas, segue uma descrição breve:

- Filtro vertical – tem a função de direcionar o fluxo que percola pelo corpo do barramento e dissipar as pressões neutras no mesmo (MASSAD, 2010), é empregado para proteger do fenômeno do *piping*, que é um processo de erosão iniciado no talude de jusante direcionado ao talude de montante, devido à saída do fluxo que percola pelo corpo do barramento com conseqüente carregamento do material constituinte da barragem (TONUSSI, 2017). Pode apresentar inclinações variadas (MASSAD, 2010);
- Filtro horizontal – tem basicamente a mesma função do filtro vertical, sendo que o filtro horizontal pode receber, além do volume que percola pelo corpo da barragem, o fluxo da vindo da fundação;
- Enrocamento de pé (rock-fill) – Segundo Carvalho (1984), possui a função aliviar as subpressões decorrentes das forças de percolação; facilitar e controlar

o encaminhamento das descargas freáticas pela fundação; evitar a ocorrência de erosão regressiva no talude de jusante, e aumentar a segurança do pé de jusante da barragem contra o processo de levitação.

- Poços de alívio – tem a função de aliviar a tensão devida à carga hídrica à montante da barragem em uma camada permeável de fundação sobreposta por uma camada com baixa permeabilidade (CARVALHO, 1984);
- Rip-rap – tem a função de proteger o talude de montante das ondas e da ação do vento, é uma camada de pedras disposta sobre camadas de transição, sobre a superfície do talude de montante;
- Trincheira total (cut-off) e Cortina injetada: São, dentre outros, exemplos de meios para a minoração ou extinção da percolação e perdas d'água pela fundação.

### 2.2.2. Materiais de construção

Segundo Massad (2010), os vales do Brasil são, em sua maioria, vales abertos, o que exige grande volume de material para a construção dos barramentos, fato que acaba levando os construtores a optar por barragens de terra ou de terra-enrocamento visto que barragens em concreto são mais dispendiosas. Nesses casos costuma-se construir de concreto as estruturas anexas à barragem. A Tabela 1 mostra uma comparação dos volumes e custo relativo para construção de alguns tipos de barragem, levando em conta o tipo de material a ser empregado.

**Tabela 1** – Custo relativo de alguns tipos de barragens

<b>Tipo de barragem</b>	<b>Volume (m<sup>3</sup>/m)</b>	<b>Custos relativos</b>
Terra homogênea	2,75H <sup>2</sup>	1
Enrocamento	1,8H <sup>2</sup>	1,75
Concreto convencional	0,4H <sup>2</sup>	5
Concreto compactado a rolo	0,4H <sup>2</sup>	2

**Fonte:** Adaptado de Massad (2010)

Os materiais são empregados de acordo com a sua disponibilidade e proximidade ao local de execução da obra. Esse é um fator determinante na geometria do maciço, de modo que a posição dos tipos de solo ao longo da seção transversal varia de acordo com a quantidade

disponível deles, primando a economia. Assim, anterior a fase de projeção do maciço é necessária uma fase de prospecção para o reconhecimento das jazidas de materiais disponíveis nas imediações do local onde será executada a barragem (CARVALHO, 1983; VIEIRA *et. al.* 1996; CAPUTO, 2017).

Conhecidos, quantitativa e qualitativamente, os materiais disponíveis a uma distância na qual aplicação deles na execução do barramento seja economicamente viável, o projeto segue considerando a alocação deles no corpo do barramento visando aproveitar as propriedades geotécnicas e mecânicas de cada tipo de solo. Vieira *et. al.* (1996) elaborou a Tabela 2 que esquematiza as propriedades médias dos tipos de solo (classificação do Sistema Unificado de Classificação dos Solos – SUCS).

**Tabela 2** – Propriedades Médias dos Solos – Aspectos Quantitativos

<b>Tipo de Solo</b>	<b>Permeabilidade</b>	<b>Resistência ao “Piping”</b>	<b>Resistência ao Cisalhamento</b>	<b>Trabalhabilidade</b>
GW	Permeável	Alta	Muito alta	Muito boa
GP	Permeável a muito permeável	Alta a média	Alta	Muito boa
GM	Semi- permeável	Alta a média	Alta	Muito boa
GC	Impermeável	Alta a média	Alta	Muito boa
SW	Permeável	Alta	Muito alta	Muito boa
SP	Permeável a semi- permeável	Baixa a muito baixa	Alta	Boa a regular
SM	Semi-permeável a impermeável	Média a baixa	Alta	Boa a regular
SC	Impermeável	Alta	Alta a média	Boa a regular
ML	Impermeável	Baixa a muito baixa	Média e baixa	Regular a muito má
CL	Impermeável	Alta	Média	Boa a regular
OL	Impermeável	Média	Baixa	Regular a má
MH	Muito impermeável	Média a alta	Baixa	Má a muito má

**Fonte:** Vieira *et. al.* (1996)

Materiais arenosos são empregados em elementos filtrantes e como agregados miúdo para concreto; materiais terrosos são utilizados no corpo do barramento e no núcleo, como o caso das areias com finos e materiais siltosos e/ou argilosos; e os materiais pétreos são empregados em enrocamentos, elementos filtrantes e agregados graúdos para produção de concreto (COSTA, 2012).

### **2.2.3. Percolação em barragens de terra**

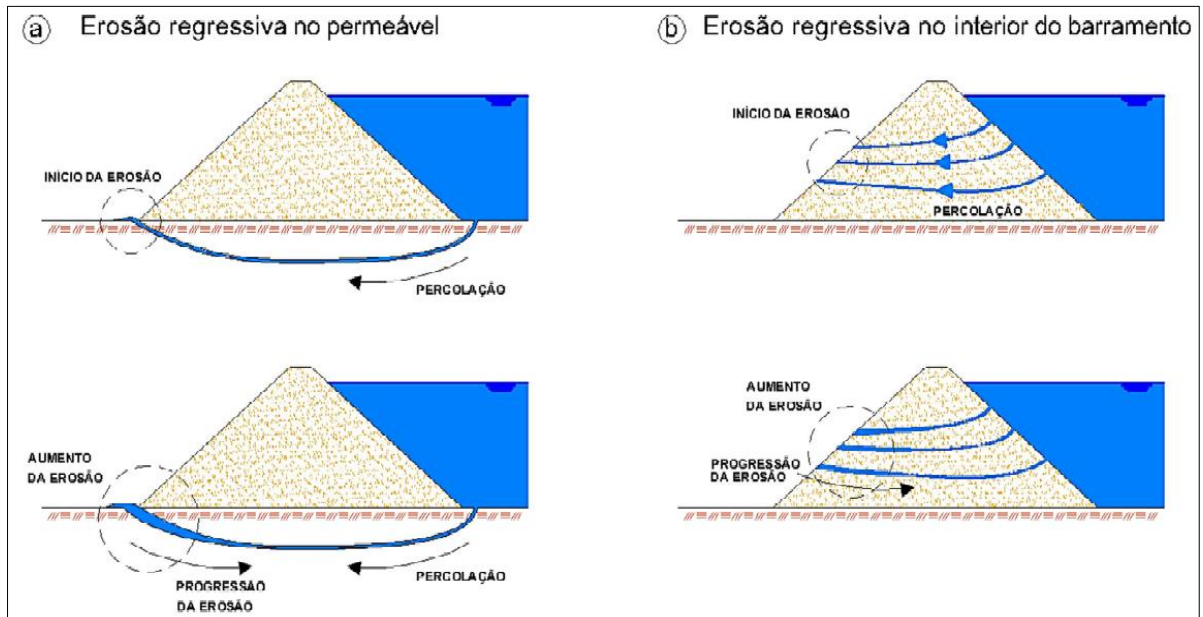
As partículas do solo se organizam de formas aleatória, umas sobre as outras com vazios entre elas nos quais a água tem a possibilidade de fluir (OLIVEIRA, 2014). Em grandes maciços de solo como as barragens esse fluxo ocorre de forma contínua da face do talude de montante para a do talude jusante, sendo esse fenômeno denominado de percolação ou infiltração (MEIRELLES, 2013). A facilidade que a água encontra para executar seu fluxo pelo corpo do barramento depende do material do qual ele é constituído, assim, os materiais possuem diferentes coeficientes de permeabilidade (K), que segundo Oliveira (2014) caracterizam a maior ou menor facilidade que a água tem para percolar por um determinado solo. Quanto maior o K de um solo, mais fácil é a percolação.

Os efeitos desse fenômeno no corpo do barramento e/ou sua fundação podem levá-lo ao colapso. Deve-se prever em projeto o controle desse fluxo pela barragem e pela fundação, prevendo o comportamento da infiltração no maciço e sob o maciço (MEIRELLES, 2013). Ainda, segundo Oliveira (2014), quando ocorre a infiltração e o fluxo se estabelece em um solo, ocorre também uma transferência de energia da água para as partículas do solo que resistem à passagem, por atrito. Essa energia é passada de grão em grão, o que a torna uma força efetiva, chamada de força de percolação, com o mesmo sentido do fluxo da água.

Como consequência, segundo Gil (2013), podem ocorrer dois efeitos capazes de causar a ruína. O primeiro ocorre devido às pressões geradas pela percolação. Se elas, sendo ascendentes igualarem-se ao peso submerso do solo, ele é levado a um estado de tensão efetiva igual a zero, anulando a sua capacidade de suporte pela perda da coesão do solo. O efeito descrito é chamado de liquefação.

O segundo efeito, de acordo com Gil (2013) é o *piping*. Ocorre, semelhante ao primeiro. Quando a força de percolação gera uma instabilidade do meio freático (CARVALHO, 1984) causa o carregamento de partículas do solo e conseqüente abertura de caminhos preferenciais para o fluxo hidráulico, promovendo concentração dele. Assim, segundo Gil (2013) progressivamente, mais material passa a ser carregado, criando pequenas cavidades. O resultado é a erosão regressiva (CARVALHO, 1984). A Figura 5 ilustra esse processo, que pode ocorrer tanto no maciço quanto na fundação da barragem.

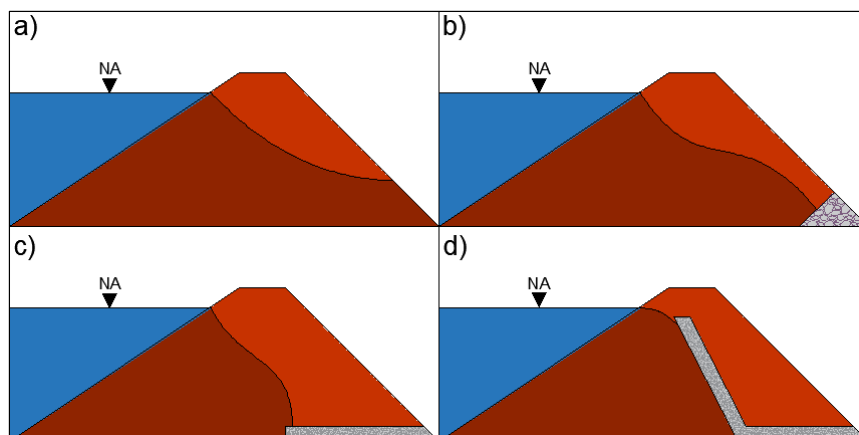
**Figura 5** – Ilustração do processo de erosão regressiva



Fonte: Soares (2017)

Para combater os efeitos da percolação em barragens uma série de dispositivos podem ser adotados. Muitos deles foram explicados anteriormente e encontram-se representados na Figura 4. Esses elementos têm sido aperfeiçoados ao longo dos anos, como afirma Massad (2010), ao expor em especial evolução dos drenos. Eles direcionam e controlam o fluxo, diminuindo seus efeitos no corpo da barragem. Como exemplo dos efeitos de proteção desses elementos de combate às consequências da percolação, a Figura 6 mostra como a existência deles influencia no percurso que a água faz no interior de uma barragem homogênea.

**Figura 6** – Drenagem interna de uma barragem com diferentes dispositivos de proteção: a) sem dispositivo; b) com *rock-fill*; c) filtro horizontal; d) filtro horizontal e filtro vertical.



Fonte: O autor (2019)

### 2.3. Estabilidade de taludes

Dado um maciço de terra ou de rocha, bem como um misto dos dois, é denominada de talude, qualquer superfície de solo exposta, formando um ângulo com a horizontal (DAS, 2014) que o delimite (CAPUTO, 2017), sendo essa produzida naturalmente, como as encostas, ou de maneira artificial, como os taludes de cortes e aterros. Os taludes possuem uma inclinação característica necessária à sua estabilidade, determinada pelas propriedades dos materiais que o compõem, que pode ser perturbada por diversos fatores. A Figura 7 mostra um talude artificial de uma barragem.

**Figura 7** – Talude de montante da barragem do Realejo, Crateús-CE



**Fonte:** O autor (2019).

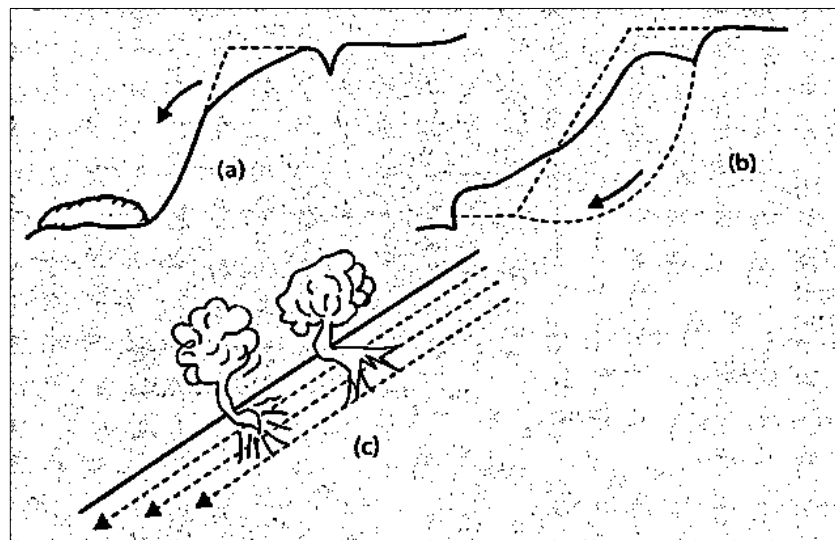
Muitos são os fatores que podem levar a instabilidade do corpo de solo inclinado. Segundo Bassaneli *et. al.* (2016) eles podem ser externos, como a modificação da geometria, remoção de vegetação de proteção superficial, condições climáticas e sismos; ou internos, como a diminuição da resistência do terreno, variação do nível freático, erosão interna e liquefação espontânea. As respostas de um talude às condições externas e internas dependem de sua composição, no tocante às propriedades geotécnicas e geometria. Portanto a sua ruptura pode caracterizar-se de maneiras muito distintas.

### 2.3.1. Modos de ruptura

Quanto aos tipos de ruptura, Caputo (2017) afirma que a instabilidade dos maciços terrosos ou rochosos nem sempre se apresentam bem definida e aponta três grandes grupos nos quais as rupturas dos taludes podem ser englobadas, representados na Figura 8, a saber:

- a) desprendimento de terra ou rocha: caracterizado pelo destacamento de uma porção de solo do maciço terroso ou de fragmentos de rocha, caindo livre e rapidamente, acumulando-se onde estacionam;
- b) escorregamento (*landslide*), que é descrito como o deslizamento para baixo e para o lado de uma superfície de deslizamento, apresentando-se de diversas formas;
- c) Rastejo (*creep*), descrito como o deslocamento lento e contínuo de camadas superficiais sobre camadas mais profundas, possuindo ou não limites definidos entre essas duas.

**Figura 8** – Tipos de Ruptura: a) Desprendimento; b) Escorregamento (*landslide*); c) Rastejo (*creep*)



Fonte: Caputo (2017)

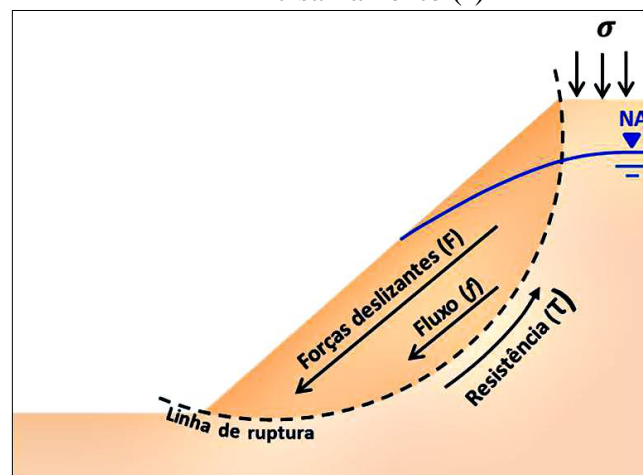
### 2.3.2. Resistência dos solos ao cisalhamento

Os taludes, conforme afirma Fiori (2015) e também Caputo (2017), podem ser observados como massas de solo submetidas a três campos de forças (Figura 9): forças devidas



ao peso do solo, forças devidas ao carregamento da água e forças devidas à resistência ao cisalhamento. Ainda, cabe destacar que eventualmente os taludes são expostos a carregamentos externos. A resistência do solo ao cisalhamento é responsável por sustentar a estabilidade, uma vez que ela resiste à tendência de movimentação da massa de solo para baixo, gerada pelas outras forças (FIORI, 2015).

**Figura 9** – Ação das forças deslizantes (F), do fluxo de água (f) e da resistência ao cisalhamento ( $\tau$ )



Fonte: Soares (2017)

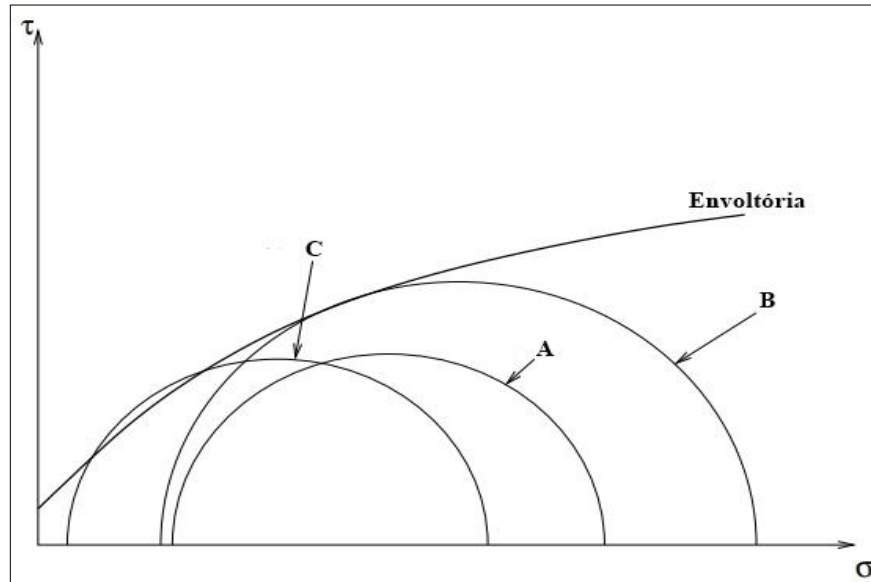
Portanto, para o estudo das condições de estabilidade e ruptura dos taludes é importante o conhecimento da resistência dos solos ao cisalhamento. Pinto (2006) considera que os critérios de ruptura mais representativos do comportamento dos solos são os critérios de Coulomb e de Mohr. O critério de ruptura de Coulomb estabelece uma expressão, Equação 1, que determina o limite de resistência do solo à tensão de cisalhamento ( $\tau_f$ ) em função da coesão (c) e do ângulo de atrito interno ( $\phi$ ), propriedades do solo, e também da tensão normal existente no plano de ruptura ( $\sigma$ ) (CARVALHO, 1991; PINTO, 2006; DAS, 2014).

$$\tau_f = c + \sigma \tan \phi \quad ( 1 )$$

O critério de ruptura desenvolvido por Mohr diz que um dado solo só chega ao ponto de ruptura caso o círculo representativo do estado de tensões ultrapasse a curva envoltória dos círculos relativos a estados de ruptura observados experimentalmente (PINTO, 2006). A Figura 10 ilustra o critério de Mohr, o círculo A representa um estado de tensões dentro do

limite estabelecido pelo critério, o círculo **B** representa um estado na ruptura e o **C** representa um estado em que já ocorreu a ruptura.

**Figura 10** – Ilustração do critério de Mohr

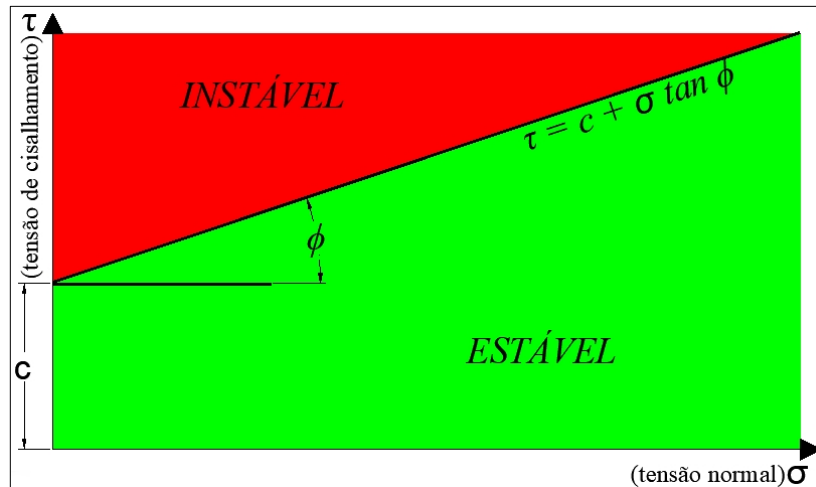


Fonte: Adaptado de Barros (2013).

Os dois critérios citados podem ser unidos em um só, uma vez que, se considerada a envoltória do critério de Mohr como uma linha reta, tem-se um critério análogo ao de Coulomb. Dessa forma, usando a curva traçada pela Equação 1 como envoltória para o critério de Mohr tem-se o chamado critério de Mohr-Coulomb, altamente utilizado na Mecânica dos solos, segundo Pinto (2006). A coFigura 11 ilustra o critério de Mohr-Coulomb, Segundo Das (2014) os parâmetros envolvidos podem ser determinados por ensaios de laboratório, sendo os mais utilizados na prática da engenharia:

- Ensaio de cisalhamento direto;
- Ensaio triaxial:
  - a. Ensaio triaxial adensado drenado;
  - b. Ensaio triaxial adensado não drenado;
  - c. Ensaio triaxial não adensado não drenado.

coFigura 11 – Critério de Mohr-Coulomb



Fonte: O autor (2019)

### 2.3.3. Estado de equilíbrio-limite e Fator de Segurança

Como visto, um talude resiste ao campo de força causado pelo seu peso próprio e pelo carregamento da água, essas forças tendem a levá-lo à ruptura. Se considerarmos o aumento progressivo dessas solicitações sobre um corpo de solo inclinado, segundo a terceira lei de Newton, o solo irá reagir com a mesma intensidade para que o equilíbrio seja mantido até que chegue a um estado crítico no qual, por suas propriedades geotécnicas, segundo os critérios já estudados, será incapaz de mantê-lo, rompendo-se, o equilíbrio limite, ocorre nesse estado (CARVALHO, 1991).

Os métodos de equilíbrio-limite consistem em estudar as condições de equilíbrio, visando encontrar a mais desfavorável (CAPUTO, 2017). Os pressupostos adotados nesses métodos, segundo Massad (2010), são:

- a) o solo tem comportamento de material rígido-plástico, isto é, rompe-se bruscamente, sem deformações anteriores;
- b) as equações de equilíbrio estático são válidas até a iminência da ruptura, enquanto se mantém a estaticidade;
- c) o coeficiente de segurança é constante ao longo da linha de ruptura, ignorando-se eventuais fenômenos de ruptura progressiva.

O coeficiente de segurança ou Fator de Segurança (FS) é definido para comparar a estabilidade de taludes em condições diferentes do equilíbrio-limite. Ele consiste na razão, Equação 2, entre as forças resistentes ( $F_{res}$ ) ao escorregamento e a resultante das forças

solicitantes ( $F_{sol}$ ). O estado de equilíbrio-limite é dado por um  $FS = 1$ , que ocorre quando as forças solicitantes e resistentes são iguais. Se o  $FS > 1$ , o talude está em equilíbrio, pois as forças resistentes são maiores que as solicitantes. Se  $FS < 1$ , o talude estará em desequilíbrio, porque ocorrerá exatamente o inverso.

$$FS = \frac{F_{res}}{F_{sol}} \quad ( 2 )$$

#### 2.3.4. Métodos de cálculo de estabilidade de taludes

Quanto as suas dimensões os taludes podem ser classificados em duas categorias, taludes infinitos e taludes finitos. Segundo Marangon (2004a) Taludes infinitos são os que possuem uma razão entre extensão e espessura muito grande e que, conforme afirma Fiori (2015), têm um perfil composto por essencialmente um tipo de solo. Segundo Marangon (2004a), para esse tipo de taludes os métodos de cálculo da estabilidade admitem uma linha potencial de ruptura paralela à superfície do terreno inclinado.

Os taludes finitos segundo Das (2014) são aqueles cujas dimensões são menores e que a altura crítica, que é a profundidade do plano no qual ocorre o equilíbrio limite, se aproxima do valor da altura do talude e para eles, conforme explica Caputo (2017) os métodos de cálculo consideram superfícies ruptura planas ou curvas.

Em todos os casos, analisar a estabilidade de um talude consiste em verificar o equilíbrio de um corpo formado por uma massa de solo, sujeito as solicitações já descritas, e às leis que governam a estática e a dinâmica dos corpos sólidos.

O foco é, portanto, de acordo com Fiori (2015), realizar a análise estática do volume de material sobre a superfície potencial de escorregamento, sendo essa circular ou não. Para tal, o equilíbrio pode ser aferido pelas equações da estática, conforme afirma Ferreira (2012), a saber: a Equação 3 para a verificação do equilíbrio das forças horizontais, a Equação 4 para a constatação do equilíbrio das forças verticais e a Equação 5 para a verificação do equilíbrio dos momentos:

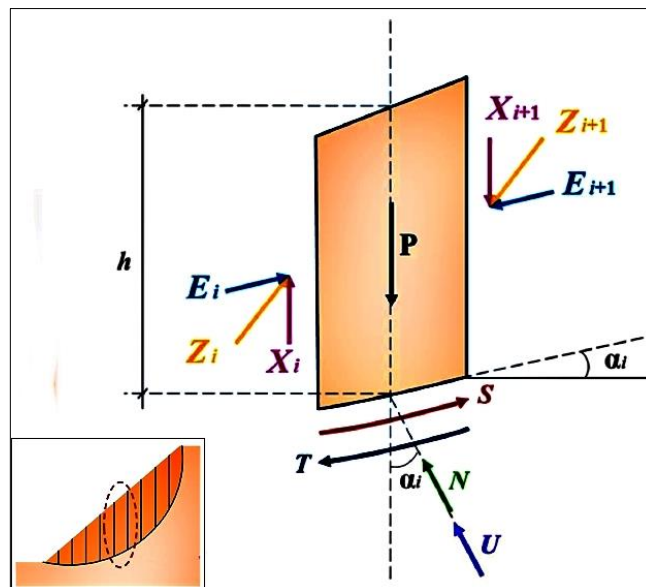
$$\sum F_h = 0 \quad ( 3 )$$

$$\sum F_v = 0 \quad ( 4 )$$

$$\sum M_o = 0 \quad ( 5 )$$

A Figura 12 mostra uma fatia genérica de solo de tamanho “ $h$ ” de um talude, acima da superfície de ruptura, e as forças que atuam sobre ela. Para o entendimento dos métodos utilizados no presente trabalho é sumamente necessário o entendimento das forças as quais essa porção de solo está submetida, e do seu estado de equilíbrio-limite. A fatia é solicitada por “ $P$ ” que é seu peso, ainda pode-se admitir sobrecargas, caso existam, como solicitações (CAPUTO, 2017). Atuando nas laterais tem-se “ $E_i$ ” que são as forças horizontais, “ $X_i$ ” que são as forças tangenciais e ainda “ $Z_i$ ” são as resultantes da interação entre as fatias, cujo efeito é desprezado em alguns métodos. Atuando na base, tem-se a força normal solicitante de “ $T$ ” e as forças de reação “ $N$ ” e “ $S$ ”, respectivamente normal e tangencial (CAPUTO, 2017; SOARES, 2017).

**Figura 12** – Forças atuantes em uma fatia de solo



**Fonte:** Adaptado de Soares (2017)

Na Tabela 3 são apresentados os métodos de equilíbrio limite que são utilizados nesse trabalho, as suas características quanto a forma da superfície de ruptura admitida e quanto às equações de equilíbrio que são satisfeitas. Dos métodos apresentados, o de Morgenstern-Price e de Spencer podem ser classificados como métodos rigorosos que conforme explica Ferreira (2012) são os que satisfazem as três equações da estática.

**Tabela 3** – Características dos métodos de equilíbrio limite

<b>Método</b>	<b>Características</b>
Fellenius (1927)	Superfície de ruptura circular
	Satisfaz o equilíbrio de momentos
Bishop Simplificado (1955)	Superfície de ruptura circular
	Satisfaz o equilíbrio de momentos
	Satisfaz o equilíbrio de forças verticais
Janbu Simplificado (1968)	Superfície de ruptura qualquer
	Satisfaz o equilíbrio de forças verticais
	Satisfaz o equilíbrio de forças horizontais
Morgenstern e Price (1965)	Superfície de ruptura qualquer
	Satisfaz o equilíbrio de momentos
	Satisfaz o equilíbrio de forças verticais
Spencer (1967)	Satisfaz o equilíbrio de forças horizontais
	Superfície de ruptura qualquer
	Satisfaz o equilíbrio de momentos
Spencer (1967)	Satisfaz o equilíbrio de forças verticais
	Satisfaz o equilíbrio de forças horizontais
	Satisfaz o equilíbrio de momentos

**Fonte:** Tonus (2009).

A Tabela 4 esquematiza as equações para o cálculo do Fator de Segurança para os métodos supracitados.

**Tabela 4** – Características dos métodos de equilíbrio limite

<b>Método</b>	<b>Fator de Segurança (FS)</b>	<b>Eq.</b>
Fellenius (1927)	$FS = \frac{\sum [c \cdot b + (P \cdot \cos \alpha - U \cdot b) \cdot \operatorname{tg} \phi]}{\sum P \cdot \operatorname{sen} \alpha}$	( 6 )
Bishop Simplificado (1955)	$FS = \frac{\sum (bc + P - ub) \operatorname{tg} \phi \frac{1}{M_{(\alpha)}}}{\sum P \cdot \operatorname{sen} \alpha}$	( 7 )
Janbu Simplificado (1968)	$FS = f_o \frac{\sum [bc + (P - ub) \operatorname{tg} \phi \frac{1}{M_{\alpha}}]}{\sum P \cdot \operatorname{sen} \alpha}$	( 8 )
Morgenstern e Price (1965)	Calculado por interações, com o uso de computadores	
Spencer (1967)	Calculado por interações, contendo as mesmas hipóteses de Morgenstern-Price.	

**Fonte:** O autor (2019)

Para o método de Fellenius, conforme Fabrício (2006), o cálculo do Fator de Segurança é feito admitindo uma superfície de ruptura circular e é unicamente aferido pelo equilíbrio de momentos. Ferreira (2012) explica que as forças de interação entre as fatias são dispensadas no cálculo por serem consideradas com a mesma inclinação, paralelas à base da fatia, e afirma que essa consideração é irreal uma vez que em todas as fatias a inclinação da base ( $\alpha$ ) é diferente.

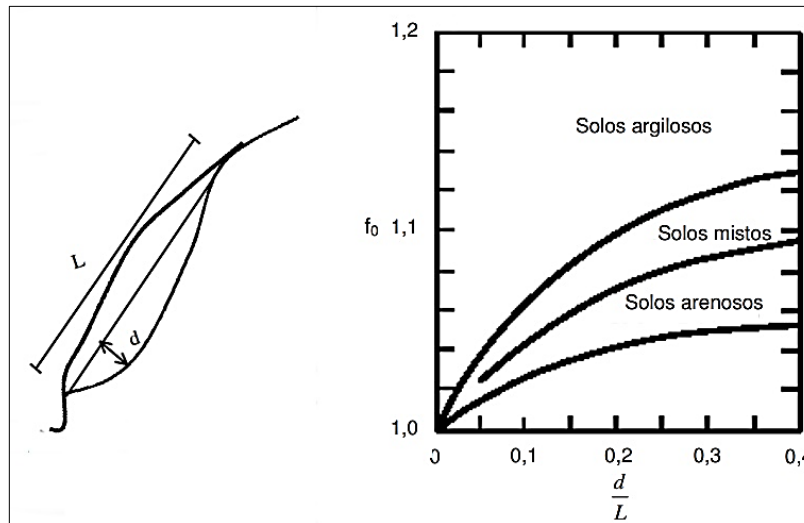
Fabrício (2006) frisa que esse método é muito conservador e apresenta erros de 50% para taludes suaves com poropressões elevadas e de 10% na ausência de poropressão. O Fator de Segurança (FS) é calculado, como mencionado antes, pela Equação 6.

No método de Bishop simplificado, conforme explica Fabrício (2006), o cálculo do FS é feito introduzindo na equação do método de Fellenius (Equação 6) a equação de imposição do equilíbrio das forças verticais, resultando assim na Equação 7. Nela está presente a variável descrita na Equação 9, que depende de um valor de FS inicial, o que torna o cálculo com esse método um processo iterativo.

$$m_{\alpha} = \cos \alpha \left[ 1 + \frac{\tan \alpha \cdot \tan \phi}{FS_i} \right] \quad ( 9 )$$

Segundo Tonus (2009) e Fabrício (2006), assim como o método de Bishop simplificado, a versão simplificada do método de Janbu é baseada no equilíbrio de forças, desprezando as componentes verticais, tangentes às laterais das fatias. Na Equação 8  $f_0$  é o fator de correção proposto na tentativa de satisfazer, mesmo que parcialmente, o equilíbrio dos momentos, ele depende do tipo de solo e da forma da superfície de deslizamento (TONUS, 2009) e é encontrado através o ábaco apresentado na Figura 13.

**Figura 13** – Variação do fator  $f_0$  em função do parâmetro  $d/L$  e do tipo de solo



Fonte: Fabrício (2006).

O Método de Morgenstern-Price, como já mencionado, é um método rigoroso, pois satisfaz todas as condições de equilíbrio. As fatias consideradas por esse método têm dimensões infinitesimais (FABRÍCIO, 2006). Segundo Ferreira (2012), para o cálculo utiliza-se de equações diferenciais, uma para o equilíbrio dos momentos e outra para o equilíbrio das forças numa fatia. Para esse problema o número de incógnitas é maior que o de equações, ou seja, ele é estaticamente indeterminado, necessitando de métodos computacionais para sua resolução.

Por último, no método de Spencer substituiu-se as forças de interação entre fatias por uma resultante estaticamente equivalente, que atua no ponto médio da base da fatia de solo (FERREIRA, 2012). Assim, com a manipulação das equações de equilíbrio pode-se desenvolver a solução para o cálculo do FS para esse método.

### 2.3.5. Condições de tensões críticas

Carvalho (1991) destaca que uma diferença essencial entre a análise da estabilidade dos taludes de uma barragem de terra e a análise da estabilidade de um talude natural é que nas barragens algumas situações necessitam de maior cuidado. Elas constituem as condições de tensões críticas.

A primeira delas é a Fase construtiva na qual à medida que as camadas de aterro vão sendo executadas e compactadas uma sobre as outras, em um determinado nível a pressão total vai se elevando, o que gera pressões intersticiais resultantes da compressibilidade do aterro e de seu baixo coeficiente de permeabilidade (MARANGON, 2004b; MEIRELLES, 2013),



essas tensões agem contra a resistência do solo (CARVALHO, 1991). Os esforços solicitantes são advindos do peso das terras e das pressões neutras induzidas, relacionadas com o tipo de solo, teor de umidade e ao ritmo de construção (MARANGON, 2004b; MEIRELLES, 2013).

A segunda condição crítica é a condição de operação, com o Reservatório Cheio, na qual o já citado fluxo de água pelo barramento, de montante à jusante, causa uma pressão de percolação, cuja direção é favorável à estabilidade do talude de montante (MARANGON, 2004b) no entanto, o talude de jusante fica submetido à sua condição mais crítica (CARVALHO, 1991).

A última é a condição Rebaixamento Rápido na qual o talude de montante sofre descompressão da massa de água e a pressão da água acumulada nos seus interstícios que, agindo em conjunto com o peso próprio do solo, configurarão a fase crítica para o talude de montante (CARVALHO, 1991). Entende-se, segundo Massad (2010), rápido como um período de alguns meses, que, diante da baixa permeabilidade do solo compactado pode assim ser chamado. A Tabela 5 expõe os fatores de segurança mínimos para cada uma dessas situações.

**Tabela 5** – Fatores de Segurança mínimo para verificação da estabilidade

<b>Condição de solicitação</b>	<b>Talude</b>	<b>Fsmín</b>
Final da construção	Montante	1,3
	Jusante	1,3
Regime permanente de Operação	Montante	1,5
	Jusante	1,5
Rebaixamento do reservatório (NA Máximo - NA Mínimo)	Montante	1,1

Fonte: Meirelles (2013)

## 2.4. Análise probabilística

Uma das principais limitações da análise determinística pelos métodos do equilíbrio limite é a sua pouca representatividade das variações nas características geotécnicas dentro de uma mesma massa de solo de grandes proporções como as barragens (SOARES, 2017). O uso dos valores médios, obtidos em ensaios de laboratório, envoltos em incertezas, quando unido à potencial variabilidade das condições dos solos, fazem com que os valores FS obtidos por esses métodos necessitem de análise quanto a validade e representatividade (FLORES, 2008). Flores (2008) considera que somente o valor de FS não indica nada sobre o funcionamento dos taludes ou sobre os parâmetros com mais influência na estabilidade.

Diante disso, o uso da análise probabilística torna-se uma ferramenta para contornar as incertezas, considerando-as no cálculo da estabilidade de taludes, e fornece, além do Fator de Segurança Probabilístico (FS<sub>P</sub>), uma probabilidade de falha (PF) o que permite saber o grau de confiabilidade da análise ( $\beta$ ) (GIACON JUNIOR, 2018). A análise probabilística não possui grande abrangência na prática da engenharia geotécnica, embora seu entendimento e suas vantagens já não sejam novidade (APAZA e BARROS, 2014).

#### ***2.4.1. Probabilidade de Falha e Grau de Confiabilidade***

O primeiro passo na realização da análise probabilística da estabilidade de talude é definir uma função de probabilidade representativa para cada parâmetro que seja uma incerteza na análise ou que tenha grande influência no resultado, pois elas serão integradas no processo de análise para estimar a distribuição de probabilidade do Fator de Segurança (FLORES, 2008). Fabrício (2006) considera que a distribuição de Gauss ou distribuição Normal é uma das mais utilizadas na teoria da probabilidade e esta será também empregada no presente trabalho.

Flores (2008) define probabilidade de falha (PF) como a probabilidade de um valor de Fator de Segurança ultrapassar o estado limite, a estabilidade de taludes é inferiormente limitada por FS=1. Ela pode ser obtida pelo cálculo do grau de confiabilidade ( $\beta$ ) definido como:

$$\beta = \frac{\mu_M}{\sigma_M} \quad ( 10 )$$

Na Equação 10,  $\mu_M$  e  $\sigma_M$  são, respectivamente, a média e o desvio padrão da margem de segurança (M), obtida pela Equação 11, para a distribuição normal de probabilidade, na qual R é a resistência e Q é a tensão à qual o sistema está exposto.

$$M = R - Q \quad ( 11 )$$

Assim, com a manipulação matemática das Equações 10 e 11, admitindo a distribuição normal como representativa para R e Q, e também para o Fator de Segurança, o grau de confiabilidade pode ser obtido pela Equação 12 (FABRÍCIO, 2006; FLORES, 2008).

$$\beta = \frac{E[FS] - 1}{\sigma_{FS}} \quad ( 12 )$$

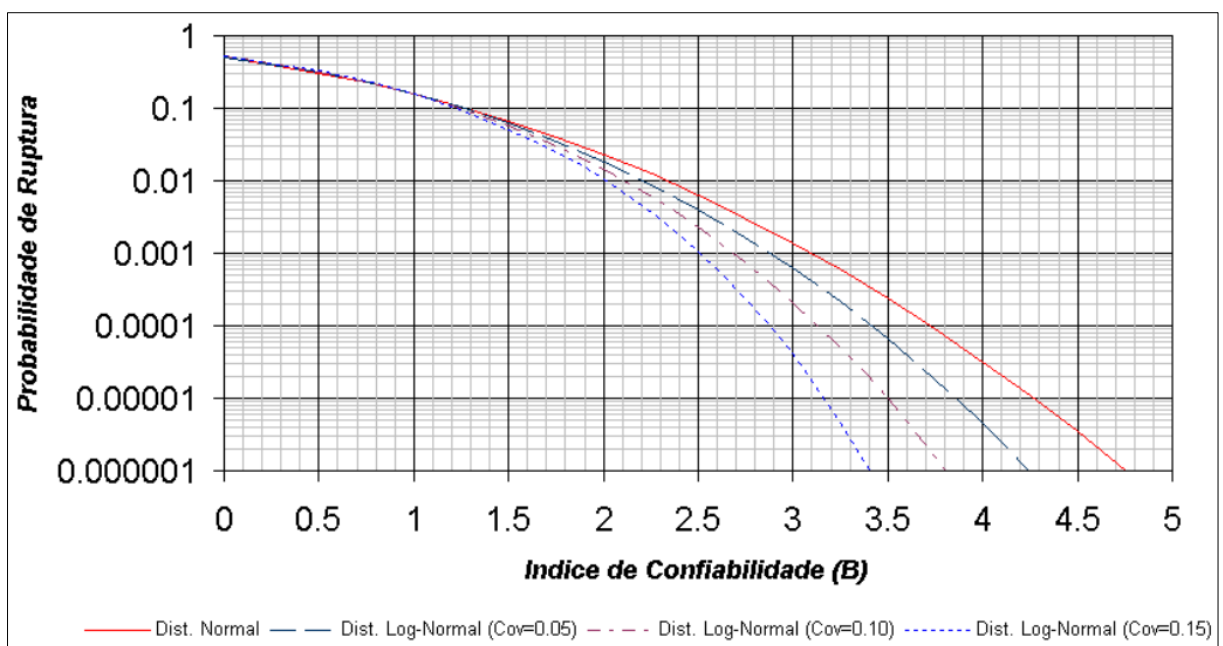
Finalmente, segundo Fabrício (2006) e Flores (2006) o cálculo da probabilidade de falha (PF) é definido como:

$$PF = 1 - \Phi(\beta) = \Phi(-\beta) \quad ( 13 )$$

onde  $\Phi(-\beta)$  é obtido pela função de densidade de probabilidade normal.

A Figura 14, apresentada por Flores (2008), é o gráfico da Probabilidade de Falha em função do grau de confiabilidade para várias distribuições de probabilidade. Dele pode-se tirar as seguintes conclusões: para um grau de confiabilidade menor ou igual a 2 há pouca diferença entre os valores de PF obtido por diferentes distribuições de probabilidade; o valor obtido pela distribuição normal para pequenos valores de grau de confiabilidade é ligeiramente maior que os outros, dessa forma, assumir a distribuição de probabilidade normal, na ausência de dados é um procedimento a favor da segurança. Ainda, Flores (2008) considera ao citar Baecher (1982) que para barragens pode ser recomendada uma probabilidade de falha de  $10^{-4}$ .

**Figura 14** – Probabilidade de Falha em função do grau de confiabilidade



Fonte: Flores (2008).

### 2.4.2. Simulação de Monte-Carlo

Dentre os métodos probabilísticos utilizados em geotecnia, figura a simulação de Monte Carlo, que será utilizado nesse trabalho para a realização das análises probabilísticas. O uso desse método segundo Flores (2008) é vantajoso pois ele fornece a distribuição de probabilidade de falha e do Fator de Segurança dos taludes. Considera-se também o fato de que não há aumento de complexidade na análise com o aumento do número de variáveis aleatórias a serem consideradas.

O método consiste na geração aleatória de N valores para os n parâmetros incertos que fazem parte do cálculo do Fator de Segurança (FABRÍCIO, 2006). Como já visto, para a análise da estabilidade dos taludes em barragens de terra, esses parâmetros são a coesão (c), ângulo de atrito ( $\phi$ ) e peso específico dos solos ( $\gamma$ ). Com esses valores são feitas N análises por métodos determinísticos, selecionando o menor Fator de Segurança encontrado em cada análise.

O grau de confiabilidade ( $\beta$ ) pode ser calculado através da Equação 12, com o uso da média e do desvio padrão dos FS encontrados nas análises anteriormente citadas. Tendo ele sido calculado, pode-se encontrar a probabilidade de falha do talude (FABRÍCIO, 2006). Nesse processo, para a máxima minoração dos erros e das incertezas é necessário grande número de análises determinísticas. Harr (1987, *apud* FABRÍCIO, 2006) determinou a Equação 14 para a determinação do número de simulações necessárias ( $N_s$ ).

$$N_s = \left( \frac{h_{\alpha/2}^2}{4\varepsilon^2} \right)^n \quad ( 14 )$$

onde:

$h_{\alpha/2}$  = função de confiabilidade (1- $\alpha$ ), valor tabelado;

$\varepsilon$  = precisão em %

n = número de variáveis.

Pode-se observar que o número de simulações aumenta de forma exponencial em função do número de variáveis, Fabrício (2006) calcula que para precisão de 90% o número de análises para uma variável será 67,4489 e para três variáveis 300.763 simulações.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

O presente trabalho baseia-se na coleta de dados sobre barragens para a realização da análise probabilística da estabilidade de seus taludes nas condições críticas e a determinação da probabilidade de falha com o uso de *software* especializado para essa função. Sendo assim, encaixa-se nas afirmações de Richardson (2011) sobre pesquisa quantitativa, que a descreve como pesquisa baseada em dados passíveis de mensuração, visando explicar e verificar sua existência, relação ou influência, por meio da aplicação de ferramentas estatísticas.

O presente capítulo apresenta os materiais e métodos utilizados para concretização dos objetivos do presente estudo nas seguintes seções: Etapas de execução do trabalho, Levantamento de dados e Método de execução das análises da estabilidade de taludes.

#### 3.1. Etapas de execução do trabalho

Esta pesquisa deu-se de acordo com o fluxograma demonstrado na Figura 15, que ilustra a divisão do presente trabalho em etapas e expõe as atividades desenvolvidas em cada uma delas.

**Figura 15** – Etapas de desenvolvimento do trabalho

ETAPA I	ETAPA II	ETAPA III	ETAPA IV
Revisão Bibliográfica	Modelagem computacional	Análise com o uso do software	Revisão dos resultados
Levantamento de dados			

Fonte: O autor (2019).

A revisão bibliográfica foi realizada com o objetivo de elaborar um arcabouço teórico e proporcionar um domínio sobre o tema geral, para um posterior afinamento e direcionamento para foco dessa pesquisa: as barragens de terra e em especial a estabilidade de seus taludes. O fruto do levantamento bibliográfico foi o Referencial Teórico, apresentado na

seção 2, onde constam os pontos mais relevantes da teoria cujo entendimento é fundamental para a execução desse trabalho. Os tópicos a seguir abrangem todas as demais atividades realizadas.

### **3.2. Levantamento de dados**

Os dados sobre as barragens foram colhidos de fontes distintas. A seguir serão expostas as fontes e as informações nelas encontradas que são relevantes para o presente estudo. Os barramentos aqui analisados são a Barragem Faé e a Barragem Orós.

#### ***3.2.1. Barragem Faé***

A fonte das informações sobre a Barragem Faé foi o trabalho de Sousa e Vieira (2007) no qual realizaram a análise probabilística da estabilidade do talude de jusante em regime de operação utilizando o programa SLOPE/W. Em seu estudo, os autores disponibilizaram relevantes informações sobre as características da barragem que foram utilizadas nas análises aqui realizadas.

A barragem Faé está localizada no município de Quixelô, no estado do Ceará, distante da capital 344 km e que barra o riacho Faé. Sua construção foi iniciada em 2002, sob a responsabilidade do estado do Ceará, e a conclusão da obra deu-se em 2004. Sua capacidade de acumulação é de 24.408.688 m<sup>3</sup>, sua bacia hidrográfica tem 309 km<sup>2</sup> de área e sua bacia hidráulica 572,39 ha (SOUSA E VIEIRA, 2007). A Figura 16 mostra a localização da Barragem Faé.

**Figura 16 – Localização da Barragem Faé**

Fonte: Google Earth (2019); Bing Maps (2019)

Possuindo um maciço com altura máxima de 20m, 329 m de extensão, cota de coroamento igual a 244,7 m e largura de coroamento igual a 6 m, a barragem Faé, demonstrada na Figura 17, é classificada como uma barragem de Terra homogênea. Sua tomada d'água é uma galeria de 91 m de comprimento e seu vertedouro em perfil creager possui 80 m de largura.

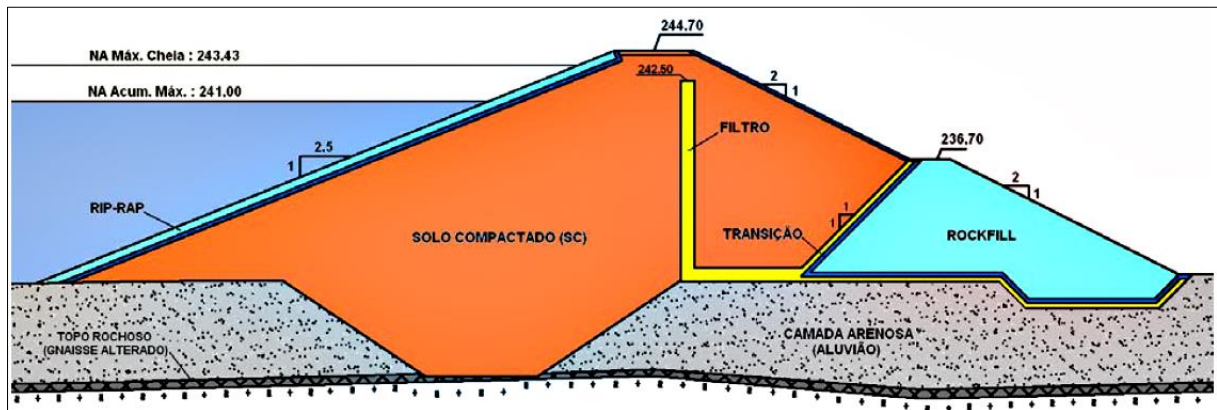
**Figura 17 – Barragem Faé**

Fonte: Souza e Vieira (2007).



A barragem possui em sua seção tipo, demonstrada na Figura 18, uma trincheira de vedação (cut-off), um sistema de filtros, rip-rap e rockfill. Seus filtros, tanto o horizontal quanto o vertical, têm largura de 1 m (SOUZA; VIEIRA, 2007).

**Figura 18** – Seção tipo da barragem Faé



Fonte: Souza e Vieira (2007).

O corpo do barramento tem como seu material principal o solo compactado, classificado como solo do tipo SC do Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUCS) e está posto sobre uma camada arenosa aluvionar, posicionada sobre um topo rochoso de gnaisse alterado. As propriedades geotécnicas dos materiais de construção e da fundação são expostas pela Tabela 6, nela os asteriscos denotam valores não especificados por Sousa e Vieira (2007). Os autores disponibilizaram ainda alguns valores de desvio padrão das propriedades geotécnicas, expostos pela Tabela 7.

**Tabela 6** – Propriedades geotécnicas dos materiais de construção da Barragem Faé

Local	Tipo de solo	$\gamma$ (KN/m <sup>3</sup> )	$\phi$ (°)	c (KPa)	K (10e-6m/s)
Zona 1	SC	*	32,20	22,2	*
Filtros e drenos	Areia	*	30,00	0	10
Rockfill e rip-rap	Enrocamento	*	40,00	0	*
Fundação	Rocha	*	33,5	0	*

Fonte: Souza e Vieira (2007)



**Tabela 7** – Desvio padrão das propriedades geotécnicas

<b>Local</b>	<b>Tipo de solo</b>	<b><math>\gamma</math> (KN/m<sup>3</sup>)</b>	<b><math>\phi</math> (°)</b>	<b>C (KPa)</b>
Zona 1	SC	*	4,40	21,3
Fundação	Rocha	*	2	*

Fonte: Souza e Vieira (2007)

Ainda, os resultados obtidos por Souza e Vieira (2007) para a análise probabilística do talude de Jusante na condição de reservatório cheio utilizando a Simulação de Monte Carlo e a método de Bishop simplificado foram de Fator de Segurança probabilístico médio igual a 1,925 com probabilidade de falha igual a 0,37%.

### 3.2.2. Barragem Orós

As informações apresentadas aqui sobre a barragem Orós estão disponíveis no site do Departamento Nacional de Obras Contra as Secas – DNOCS (2019), órgão responsável por sua execução e que possui grande acervo técnico referente a construção, operação e manutenção de barragens. O site disponibiliza um banco de dados que apresenta documentos com informações sobre algumas barragens do estado do Ceará e de outros estados.

A Barragem Presidente Juscelino Kubitschek, mais conhecida como Barragem Orós está localizada no município cearense de Orós, distante 450 km de Fortaleza, e barra o rio Jaguaribe. Sua concepção e execução deu-se sob a responsabilidade do DNOCS visando a perenização do rio Jaguaribe, irrigação do Médio e Baixo Jaguaribe, piscicultura, culturas agrícolas de áreas de montante, turismo e aproveitamento hidrelétrico.

O barramento em forma de arco teve o início da sua execução em 1958 com a escavação da fundação e passou por um sinistro em 1960 devido às chuvas torrenciais que atingiram a construção em março do referido ano e levaram dos 2.000.000 m<sup>3</sup> de aterro já construídos 877.500 m<sup>3</sup>. Sua inauguração deu-se no dia 11 de janeiro de 1961 (DNOCS, 2019). A Figura 19 mostra a localização da Barragem Orós.

**Figura 19** – Localização da Barragem Orós

**Fonte:** Google Earth (2019)

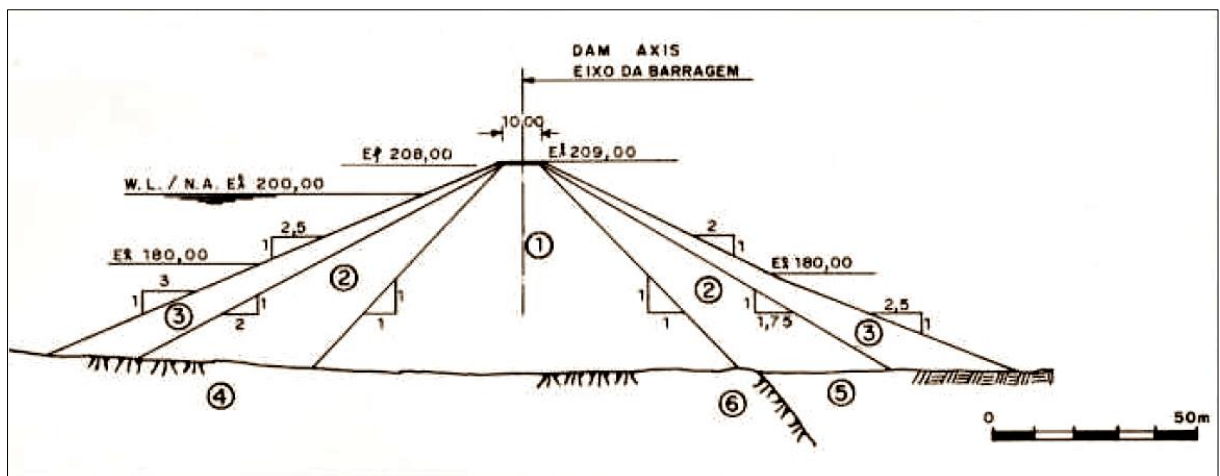
Segundo as informações do DNOCS (2019), com uma capacidade de acumulação de 2.100.000.000 m<sup>3</sup>, uma bacia hidrográfica de 25.000 km<sup>2</sup> e uma bacia hidráulica de 35.00 ha, Orós, exibida na Figura 20, possui perfil zoneado e sua forma arqueada apresenta um raio de 160 m. A altura máxima do maciço é de 54 m e a largura máxima da base de 278 m, sua extensão pelo coroamento é de 670 m e a largura dele é de 10 m. A tomada d'água é em galeria, com 26 m de comprimento, posicionada no barramento à cota 175, aproximadamente. O volume total de aterro é de 3.224.220m<sup>3</sup> e seu vertedouro é do tipo superfície livre com largura de 180m. A Figura 21 apresenta a geometria da seção transversal da barragem.

**Figura 20** – Barragem Orós



Fonte: DNOCS (2019)

**Figura 21** – Seção tipo da Barragem Orós



Fonte: DNOCS (2019)

Segundo o DNOCS (2019) os materiais empregados na construção e os componentes da fundação, são descritos como:

- na zona 1, uma mistura de argila, silte e areia, com predominância de argila, compactada em camadas de 15cm com rolo-pé-carneiro;

- nas zonas 2, uma mistura de areias com alguns pedregulhos, obtido do leito do rio e de outras jazidas nos seus afluentes, adensada em camadas de 30cm com rolos vibratórios;
- nas Zonas 3, enrocamento obtido das escavações do vertedouro, lançado em camadas de aproximadamente 1m de espessura;
- na parte da fundação descrita como 4, rocha tratada com injeções de cimento para a não fuga de água por ela;
- na parte da fundação descrita como 5, depósito de areia, sendo que 6 denota a interface entre o material em 4 e o material em 5.

Durante seu projeto, o método utilizado para as análises da estabilidade dos taludes foi o sueco e destaca-se que para o cálculo foi considerado que a zona 1 é inteiramente impermeável, que o material das zonas 2 e 3 são permeáveis, e que a fundação abaixo da zona 1 é impermeável, diferente das outras porções dela. A Tabela 8 expõe as propriedades geotécnicas que foram utilizadas nesses cálculos, disponibilizadas nos documentos do DNOCS (2019), os asteriscos representam valores não especificados. A Tabela 9 exhibe os resultados das análises de estabilidade realizadas na elaboração do projeto.

**Tabela 8** – Propriedades geotécnicas dos materiais de construção da Barragem Orós

Local	Tipo de solo	$\gamma$ (KN/m <sup>3</sup> )	$\phi$ (°)	c (KPa)	K (10e-6m/s)
Zona 1	Argila/Silte/Areia	17,60	30,96	*	0
Zona 2	Areia/Pedregulho	*	33,02	0	*
Zona 3	Enrocamento	*	33,02	0	*
Fund. 4	Rocha	*	*	*	0
Fund. 5	Areia (depósito)	19,81	27	0	*

Fonte: DNOCS (2019)

**Tabela 9** – Fatores de Segurança para as condições críticas, Barragem Orós

Condição	Talude	FS
Reservatório cheio	Montante	1,91
	Jusante	1,41
Rebaixamento Rápido (N.M. até a cota 175, nível da tomada d'água)	Montante	1,93
	Jusante	1,85

Fonte: DNOCS (2019).

### 3.3. Método de execução das análises da estabilidade de taludes

Completada a fase de coleta dos dados, foi iniciado o processo de modelagem computacional que engloba tanto o lançamento da geometria de cada uma das barragens no *Software* utilizado, quanto as considerações que foram feitas para a alocação dos materiais de construção ao longo da seção transversal.

O *software* Slide 6.0 desenvolvido pela empresa Rocscience é apto a realizar o cálculo dos fatores de segurança por diversos métodos e a realizar a análise probabilística considerando a variabilidade dos parâmetros geotécnicos, utilizando a metodologia de geração de variáveis aleatórias de Monte Carlo. Os métodos de análise de estabilidade de taludes utilizados nesse trabalho foram o de Fellenius, Bishop Simplificado, Janbu, Spencer e o de Morgenstern-Price. Foram realizadas para cada um deles 7.000 interações.

#### 3.3.1. Lançamento da geometria no Slide 6.0

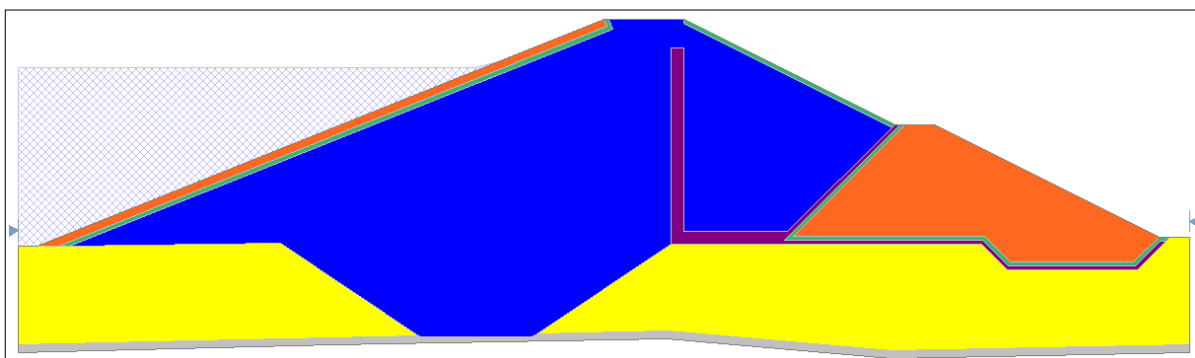
Para o lançamento da geometria das barragens no Slide 6.0 foi necessária a discretização da seção transversal em coordenadas. Para tal processo utilizou-se o *software* AutoCAD, da Autodesk, para coletar as coordenadas tanto das delimitações externas do traçado da seção transversal quanto dos componentes internos de cada barragem. O procedimento utilizado foi o seguinte:

- I. Desenhou-se as bordas da seção transversal no AutoCAD utilizando uma única polilinha, com o comando POLILINHA (POLYLINE);
- II. Desenhou-se, da mesma forma, as delimitações dos materiais na parte interna da seção transversal;
- III. Selecionou-se cada uma das polilinhas traçadas e utilizou-se o comando LISTA (LIST) para listar as coordenadas de cada vértice do objeto selecionado;
- IV. Com as coordenadas dos vértices das polilinhas pôde-se introduzir a geometria, inserindo as bordas externas no Slide 6.0 usando a função ADD EXTERNAL BOUNDARY, com o auxílio da COORDINATE TABLE;
- V. Repetiu-se o passo anterior para as delimitações dos materiais da seção transversal utilizando a função ADD MATERIAL BOUNDARY.

Os modelos criados no AutoCAD para cada barragem e as coordenadas coletadas são apresentadas no APÊNDICE A, referente a Faé, e no APÊNDICE B, referente a Orós. As

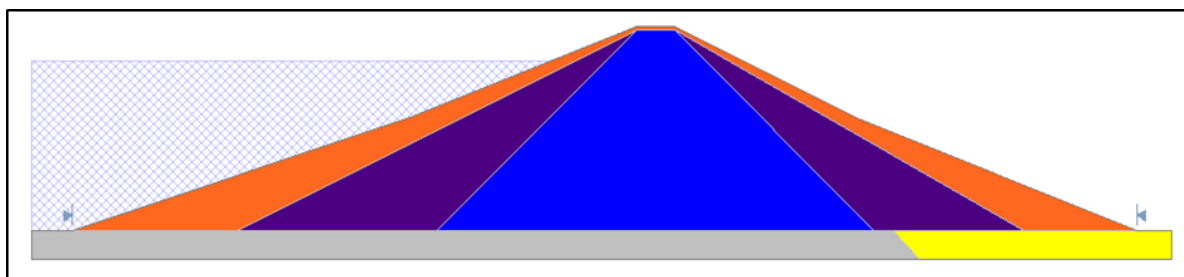
figuras abaixo são o resultado do processo de lançamento da geometria da seção tipo dos barramentos no Slide 6.0.

**Figura 22** – Seção tipo da Barragem Faé no Slide 6.0



Fonte: O autor (2019)

**Figura 23** – Seção tipo da Barragem Orós no Slide 6.0



Fonte: O autor (2019)

### 3.3.2. Arranjo dos materiais de construção

Após a delimitação da seção tipo de cada barragem foi realizada a alocação dos materiais de construção ao longo dela. As lacunas nos dados devidas às informações que não foram fornecidas nos documentos que serviram como fonte para esse trabalho, mas que são cruciais para a sua realização, foram preenchidas utilizando a tabela elaborada por Vieira *et. al.* (1996) na qual constam as propriedades médias dos solos, organizadas de acordo com o SUCS. Ela está disponível no ANEXO A. A Tabela 10 expõe as propriedades médias nas unidades que são utilizadas pelo Slide 6.0.

**Tabela 10** – Propriedades Médias dos Solos de acordo com o SCUS nas unidades utilizadas pelo *software* Slide 6.0.

Classificação USC	$\gamma$ (KN/m <sup>3</sup> )	$\phi$ (°)	c (KPa)	K (10e-6m/s)
GW	18,600	38,310	-	270
GP	17,300	36,500	-	640
GM	17,800	33,820	-	0,003
GC	18,000	30,960	-	0,003
SW	18,600	38,310	39,227	-
SP	17,300	36,500	22,555	0,15
SM	17,800	33,820	50,995	0,075
SM-SC	18,600	33,420	50,014	0,008
SC	18,000	30,960	74,531	0,003
ML	16,200	31,800	66,685	0,0059
ML-SC	17,100	31,800	62,763	0,0013
CL	17,000	28,370	86,299	0,0008
MH	12,800	25,170	71,589	0,0016
CH	14,700	19,290	101,989	0,0005

Fonte: Adaptado de Vieira *et. al.* (1996)

Na Tabela 11 estão organizados os valores das propriedades geotécnicas dos materiais de construção constituintes para a Barragem Faé, com as lacunas de informações preenchidas com o método citado anteriormente. Esses foram os valores introduzidos no *Software* para o cálculo dos fatores de segurança. De igual forma, a Tabela 12 está para a Barragem Orós.

**Tabela 11** – Preenchimento dos valores das propriedades geotécnicas dos materiais de construção da Barragem Faé

Local	Tipo de Solo	SCUS	$\gamma$ (KN/m <sup>3</sup> )	$\phi$ (°)	c (KPa)	K (10e-6m/s)
Zona 1	SC	SC	18,00	32,20	22,20	0,003
Filtros e drenos	Areia	SW	18,60	30,00	0,00	10,000
Rockfill e rip-rap	Enrocamento	GW	18,60	40,00	0,00	270,000
Fundação	Areia aluvionar	SP	17,30	33,50	0,00	0,150

Fonte: Souza e Vieira (2007); Vieira *et. al.* (1996).

**Tabela 12** – Preenchimento dos valores das propriedades geotécnicas dos materiais de construção da Barragem Orós

Local	Tipo de Solo	SCUS	$\gamma$ (KN/m <sup>3</sup> )	$\phi$ (°)	C (KPa)	K (10e-6m/s)
Zona 1	Argila/Silte/Areia	CL	17,603	30,964	86,299	0,0008
Zona 2	Areia/Pedregulho	SW	18,600	33,024	0	0,15
Zona 3	Enrocamento	GW	18,600	33,024	0	270
Fund. 4	Rocha	-	19,000	45,000	500	0
Fund. 5	Areia (depósito)	SP	19,810	27,000	22,555	0,15

Fonte: DNOCS (2019); Vieira *et. al.* (1996)

Para a realização da análise probabilística foi necessário, além das propriedades médias, o desvio padrão de cada uma das propriedades geotécnicas. Para a mensuração dos valores de desvio padrão adotou-se a metodologia apresentada por Silva (2015) como a mais utilizada para a estimativa do desvio padrão de valores das propriedades geotécnicas dos solos.

A autora apresenta a relação entre o desvio padrão (s) e a média aritmética (m) dos valores, o coeficiente de variação (CV), em porcentagem, definido pela Equação 15.

$$CV = \frac{s}{m} * (100\%) \quad ( 15 )$$

Silva (2015) explica que existem valores tabelados para os coeficientes de variação do peso específico, coesão e ângulo de atrito efetivo, obtidos através de um banco de dados com muitas amostras e estudos que vêm sendo realizado desde a década de 1970. A Tabela 13 mostra os valores de coeficientes de variação das propriedades geotécnicas.

**Tabela 13** – Covariância padrão para os principais parâmetros geotécnicos

Parâmetro	Covariância Padrão (%)
Ângulo de atrito efetivo	10
Coesão	40
Peso específico	3

Fonte: Silva (2015)

Assim, a Tabela 14 apresenta os desvios padrões dos parâmetros geotécnicos dos materiais da Barragem Faé e a Tabela 15 os da Barragem Orós, elaboradas utilizando a metodologia de Silva (2015).



**Tabela 14** – Desvio padrão das propriedades geotécnicas dos materiais de construção da Barragem Faé

Local	Tipo de Solo	SCUS	$\gamma$ (KN/m <sup>3</sup> )	$\phi$ (°)	c (KPa)
Zona 1	SC	SC	0,540	4,400	8,88
Filtros e drenos	Areia	SW	0,558	3,000	0,000
Rockfill e rip-rap	Enrocamento	GW	0,558	4,000	0,000
Fundação	Areia aluvionar	SP	0,519	2,000	0,000

Fonte: O autor (2019)

**Tabela 15** – Desvio padrão das propriedades geotécnicas dos materiais de construção da Barragem Orós

Local	Tipo de Solo	SUCS	$\gamma$ (KN/m <sup>3</sup> )	$\phi$ (°)	c (KPa)
Zona 1	Argila/Silte/Areia	CL	0,528	3,096	34,520
Zona 2	Areia/Pedregulho	SW	0,558	3,302	0,000
Zona 3	Enrocamento	GW	0,558	3,302	0,000
Fund. 4	Rocha	-	0,570	4,500	-
Fund. 5	Areia (depósito)	SP	0,594	2,700	9,022

Fonte: O autor (2019)

### 3.3.3. Análise nas condições críticas

As barragens foram submetidas as condições críticas de regime de operação e de rebaixamento rápido. A estabilidade do talude de montante foi aferida na condição crítica de rebaixamento rápido e a do talude de jusante na condição de regime de operação com carga hidráulica plena. Os fatores de segurança adotados como referência para a estabilidade são: 1,5 para a condição de operação e 1,1 para rebaixamento rápido do reservatório, conforme recomenda Meirelles (2013).

A Barragem Faé tem uma carga hidráulica de 13,5 m e a Barragem Orós de 45,0 m. Todas elas foram submetidas a um rebaixamento rápido de 0,15 m/dia até que o nível de água alcançasse metade do valor de carga hidráulica, condições que tendem a levar o talude ao colapso na maior parte dos casos (SHERARD, 1953). Para essas condições, a Barragem Faé teve seu rebaixamento até 6,75 m em 45 dias, tendo então 45 estágios de análise e a Barragem Orós 150 estágios até 22,5 m.

## 4 RESULTADOS

Este capítulo contém os resultados das análises da estabilidade dos taludes de montante e de jusante das Barragens Faé e Orós nas condições críticas, realizadas com a utilização do *software* Slide 6.0. Primeiro são apresentados os resultados para a condição de operação (reservatório cheio) e posteriormente os resultados para a condição de rebaixamento rápido.

Para simplificação da exposição dos resultados optou-se por mostrar nos tópicos a seguir as superfícies de ruptura e os histogramas do Fator de Segurança somente para o método de Morgenstern-Price, por ser este um dos métodos rigorosos, em que as condições de estabilidade equilíbrio dos momentos e equilíbrio das forças tanto horizontais quanto verticais são satisfeitas. Dos outros métodos, nesse capítulo serão citados os Fatores de Segurança, tanto o determinístico ( $FS_D$ ) quanto o probabilístico ( $FS_P$ ), e a Probabilidade de Falha (PF).

Os demais resultados, obtidos pelos outros métodos, para a Barragem Faé estão dispostos no APÊNDICE A e para a Barragem Orós no APÊNDICE B, constando nos tais, os histogramas das propriedades geotécnicas dos materiais de construção das barragens, o histograma de Fator de Segurança e as superfícies de ruptura com maior relevância como resultado deste trabalho.

### 4.1. Condição crítica para o talude de Jusante – reservatório cheio

#### 4.1.1. Barragem Faé

A Tabela 16 mostra os resultados obtidos para cada método de análise, nela são expostos os valores de Fator de Segurança Determinístico ( $FS_D$ ), Fator de Segurança Probabilístico ( $FS_P$ ) e Probabilidade de Falha (PF). O método de Janbu apresentou o menor valor de Fator de Segurança determinístico, 1,936, e o Fator de Segurança Probabilístico com menor valor foi o determinado pelo método de Fellenius, 1,810, para todos os métodos a Probabilidade de Falha foi de 0,00%.

**Tabela 16** – Barragem Faé: Fatores de Segurança, probabilísticos e determinísticos, e Probabilidade de Falha para cada método de cálculo na condição de reservatório cheio

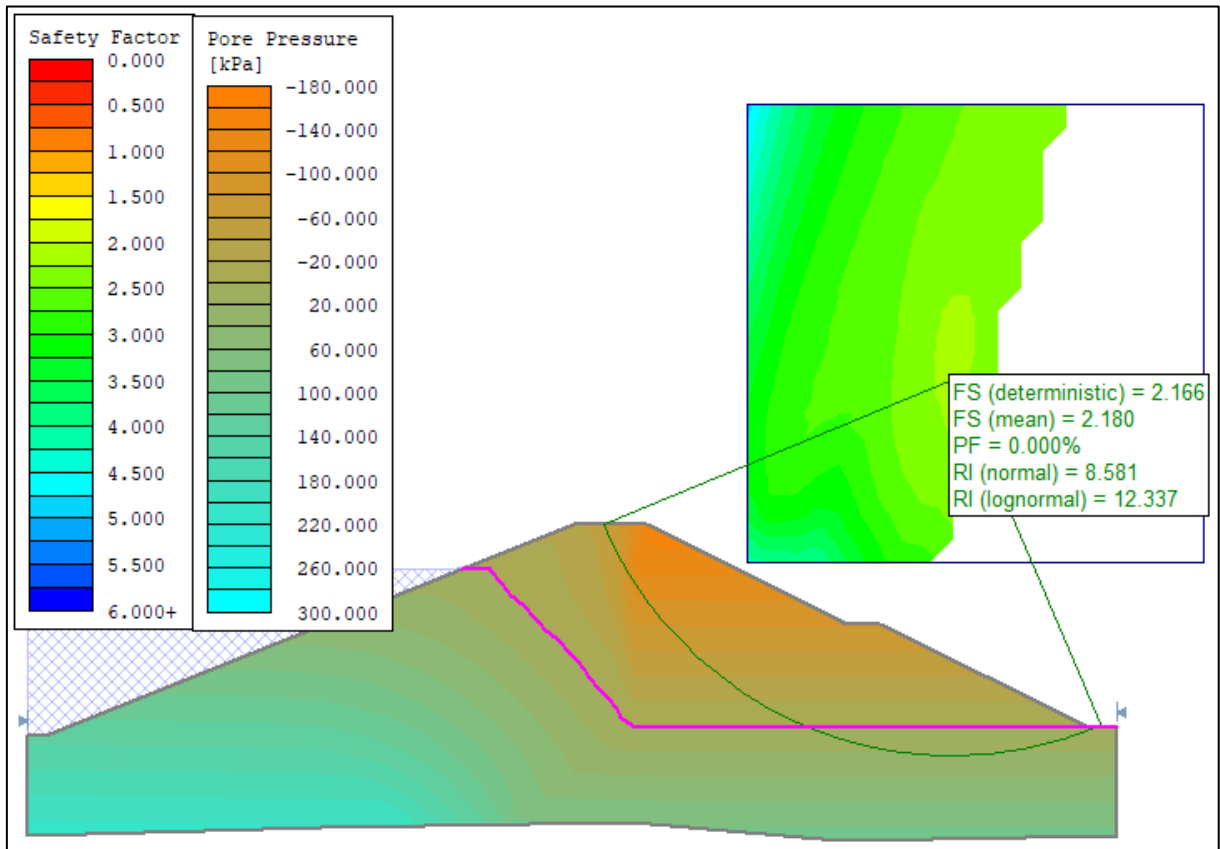
	<b>Método de Análise</b>				
	<b>Fellenius</b>	<b>Bishop S.</b>	<b>Janbu</b>	<b>Spencer</b>	<b>Morg.-Price</b>
FSD	1,965	2,164	1,936	2,170	2,166
FSP	1,810	2,179	1,951	2,187	2,180
PF	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%

**Fonte:** O autor (2019)

A média dos valores de  $FS_D$  foi 2,080 com desvio padrão de 0,119 e a dos de  $FS_P$  foi 2,061, com desvio padrão de 0,172. A amplitude dos resultados obtidos para  $FS_D$  foi de 0,234 e amplitude para  $FS_P$  foi de 0,377, o que denota a pequena variação dos valores de Fator de Segurança. Ainda, pode-se notar que a diferença entre  $FS_D$  e  $FS_P$  foi de 0,155 para o método de Fellenius, 0,015 para os métodos de Bishop Simplificado e Janbu, 0,017 para o de Spencer e de 0,014 para o método de Morgenstern-Price, com os valores de  $FS_D$  sempre menores que os valores de  $FS_P$  exceto no método de Fellenius.

A Figura 24 mostra a superfície potencial de ruptura traçada pelo *software* para o método de Morgenstern-Price, nela pode-se ver a variação da poropressão ao longo do corpo do barramento e o fator de segurança obtido pelo método.

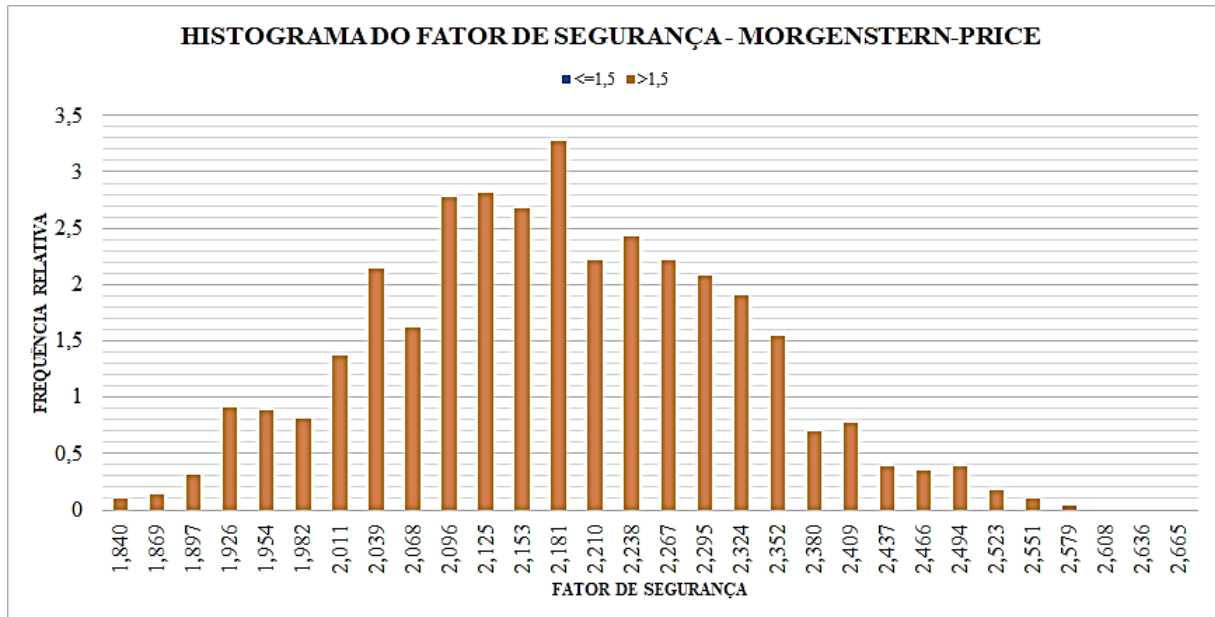
**Figura 24** – Barragem Faé: superfície de ruptura para o método de Morgenstern-Price (reservatório cheio)



Fonte: O autor (2019)

A Figura 25 mostra a distribuição dos valores de Fator de Segurança obtidos na análise probabilística, por ela pode-se notar que em nenhuma das interações realizadas no processo de cálculo o valor do FS obtido esteve abaixo do valor limite de 1,5.

**Figura 25** – Barragem Faé: histograma do fator de segurança para o método de Morgenstern-Price (reservatório cheio)



Fonte: O autor (2019)

#### 4.1.2. Barragem Orós

Para a Barragem Orós, os resultados obtidos de Fator de Segurança Determinístico ( $FS_D$ ), Fator de Segurança Probabilístico ( $FS_P$ ) e Probabilidade de Falha (PF) por cada método de análise, são mostrados na Tabela 17. O método de Janbu apresentou os menores valores de Fator de Segurança, 1,877 para  $FS_D$  e 1,885 para o  $FS_P$ . O maior valor de  $FS_D$  foi obtido pelo método de Morgenstern-Price, 1,984, e o de  $FS_P$  foi obtido pelo método de Bishop simplificado, 2,002.

**Tabela 17** – Barragem Orós: Fatores de Segurança, probabilísticos e determinísticos e Probabilidade de Falha para cada método de cálculo (reservatório cheio)

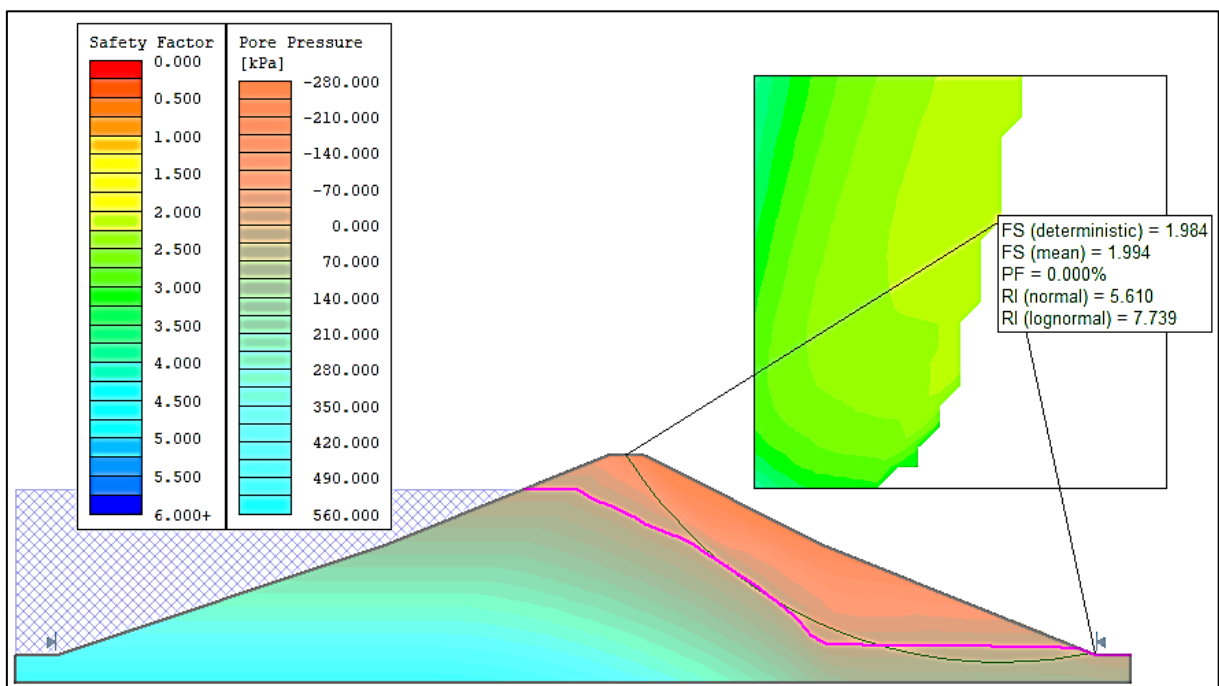
	Método de Análise				
	Fellenius	Bishop S.	Janbu	Spencer	Morg.-Price
FSD	1,892	1,994	1,877	1,987	1,984
FSP	1,900	2,002	1,885	1,995	1,994
PF	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%

Fonte: O autor (2019)

Os  $FS_D$  tiveram uma média de 1,947 com desvio padrão de 0,05723, enquanto a dos valores de  $FS_P$  foi 1,955 com desvio padrão de 0,05756. Para o Orós, nota-se também a a pequena variação dos valores de Fator de Segurança, visto que a amplitude dos resultados obtidos para  $FS_D$  foi de 0,117 e amplitude para  $FS_P$  foi de 0,117. Nota-se ainda que a diferença entre  $FS_D$  e  $FS_P$  foi de 0,008 para todos os métodos, exceto para o de Morgenstern-Price, com diferença de 0,01.

A superfície potencial de ruptura descrita para o método de Morgenstern-Price está exposta na Figura 26, observa-se os valores de  $FS_D$  igual a 1,984 e de  $FS_P$  igual a 1,994 com Probabilidade de Falha igual a 0,000%.

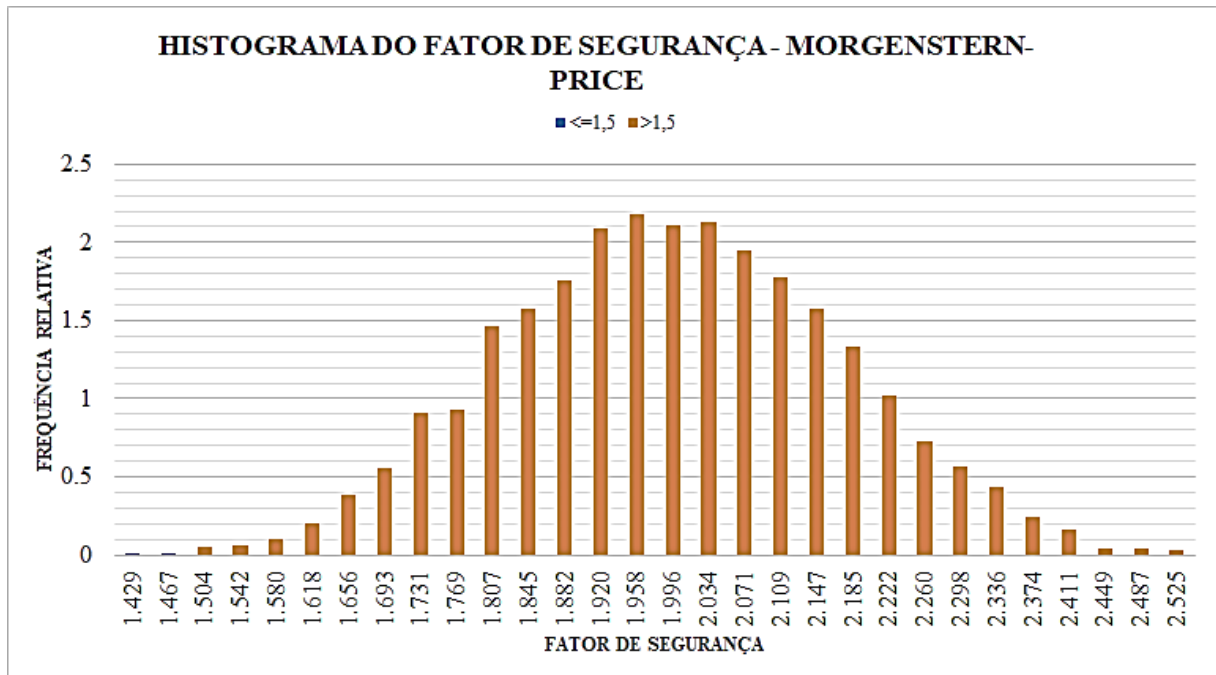
**Figura 26** – Barragem Orós: Superfície de ruptura para o método de Morgenstern-Price (reservatório cheio)



Fonte: O autor (2019)

A Figura 27 mostra a distribuição de frequência dos Fatores de Segurança obtidos com o uso do método de Morgenstern-Price, descrito na Figura 26. Dos valores obtidos com as interações realizadas pelo software poucos foram menores ou iguais que 1,5.

**Figura 27** – Barragem Orós: histograma do Fator de segurança para o método de Morgenstern-Price (reservatório cheio)



Fonte: O autor (2019)

## 4.2. Condição crítica para o talude de montante – rebaixamento rápido

### 4.2.1. Barragem Faé

Impostos os 45 dias de um rebaixamento de 0,15 m/dia a Tabela 18 sintetiza os valores e estágios mais relevantes da análise. O método de Janbu foi o método que estimou o menor número de dias até o estado limite descrito pela literatura, FS menor que 1,1. No 28º dia do rebaixamento o talude de montante da barragem Faé, segundo o método de Janbu, apresentou o  $FS_D$  igual a 1,092 e o  $FS_P$  igual a 1,057 com 41,041% de Probabilidade de Falha.

**Tabela 18** – Barragem Faé: dia em que ocorre Fator de Segurança Probabilístico < 1,1 e dia no qual ocorre máxima Probabilidade de Falha

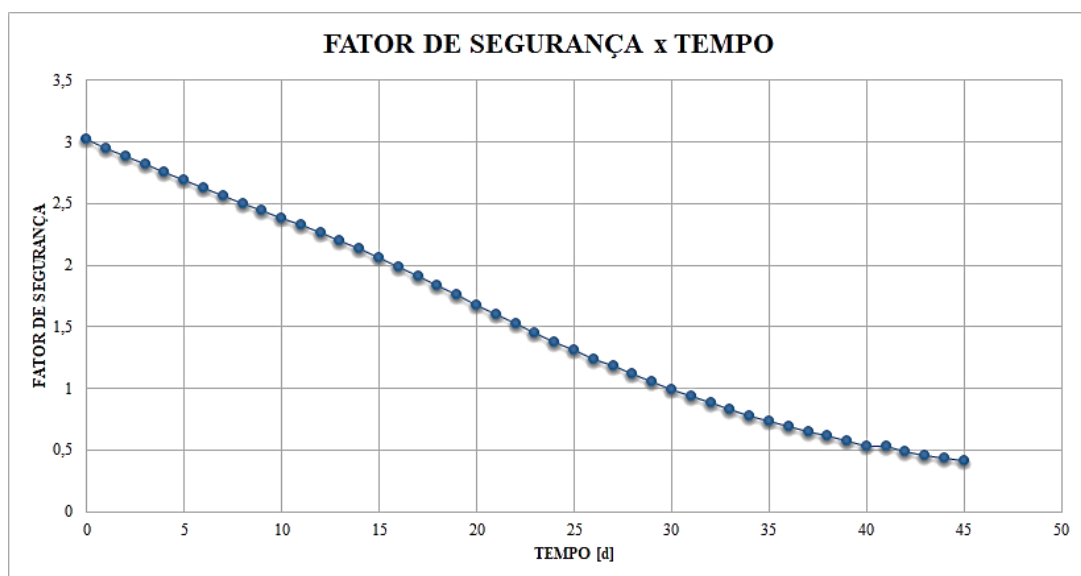
	FSP < 1,1				PFmáx			
	DIA	FSD	FSP	PF	DIA	FSD	FSP	PF
Fellenius	35	1,051	1,077	41,000%	45	0,783	0,806	79,400%
Bishop S.	29	1,065	1,098	40,600%	45	0,414	0,568	99,459%
Janbu	28	1,057	1,092	41,041%	45	0,410	0,583	98,699%
Spencer	29	1,057	1,097	41,023%	45	0,430	0,587	100,000%
Morg.-Price	29	1,053	1,091	41,525%	45	0,412	0,581	99,426%

Fonte: O autor (2019)

A máxima Probabilidade de Falha deu-se no último estágio de análise no 45º dia para todos os métodos, o método de Spencer apresentou PF de 100% com  $FS_D$  igual a 0,43 e  $FS_P$  igual a 0,587. Por sua vez, o método de Morgenstern-Price apresentou no 45º dia  $FS_D$  igual a 0,412,  $FS_P$  igual a 0,581 e probabilidade de 99,426%.

A Figura 28 mostra a variação do Fator de Segurança determinístico calculado com o método de Morgenstern-Price ao longo dos dias de rebaixamento, indo do valor 3,018, do estágio 0, até 0,412 do 45º dia de análise. Também foi possível, através da análise probabilística realizada pelo Slide 6.0 traçar o gráfico da variação da Probabilidade Falha ao longo do tempo, mostrado na Figura 29.

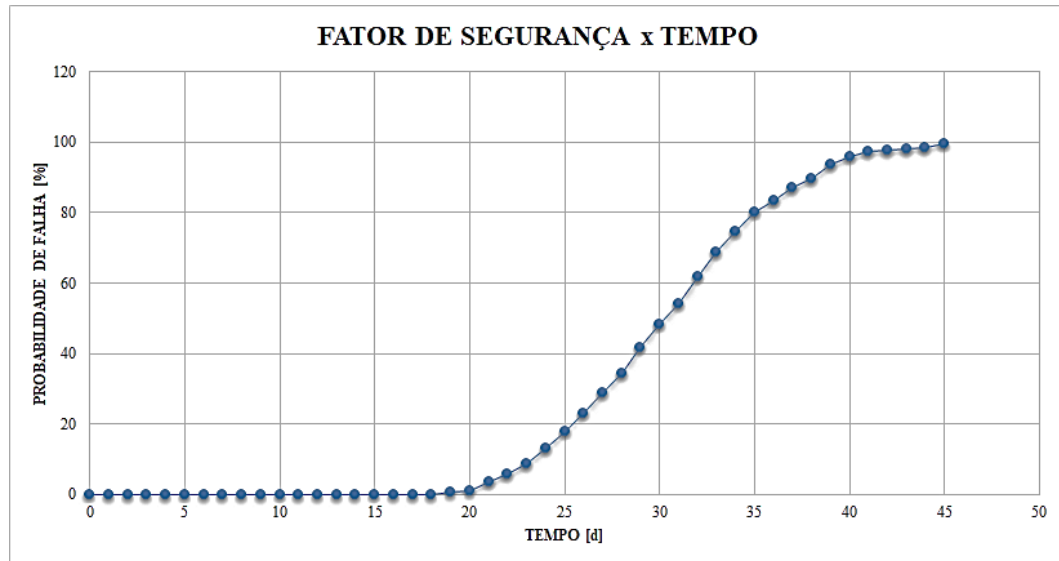
**Figura 28** – Barragem Faé: gráfico do fator de segurança vs. tempo (d) para o método Morgenstern-Price



Fonte: O autor (2019)



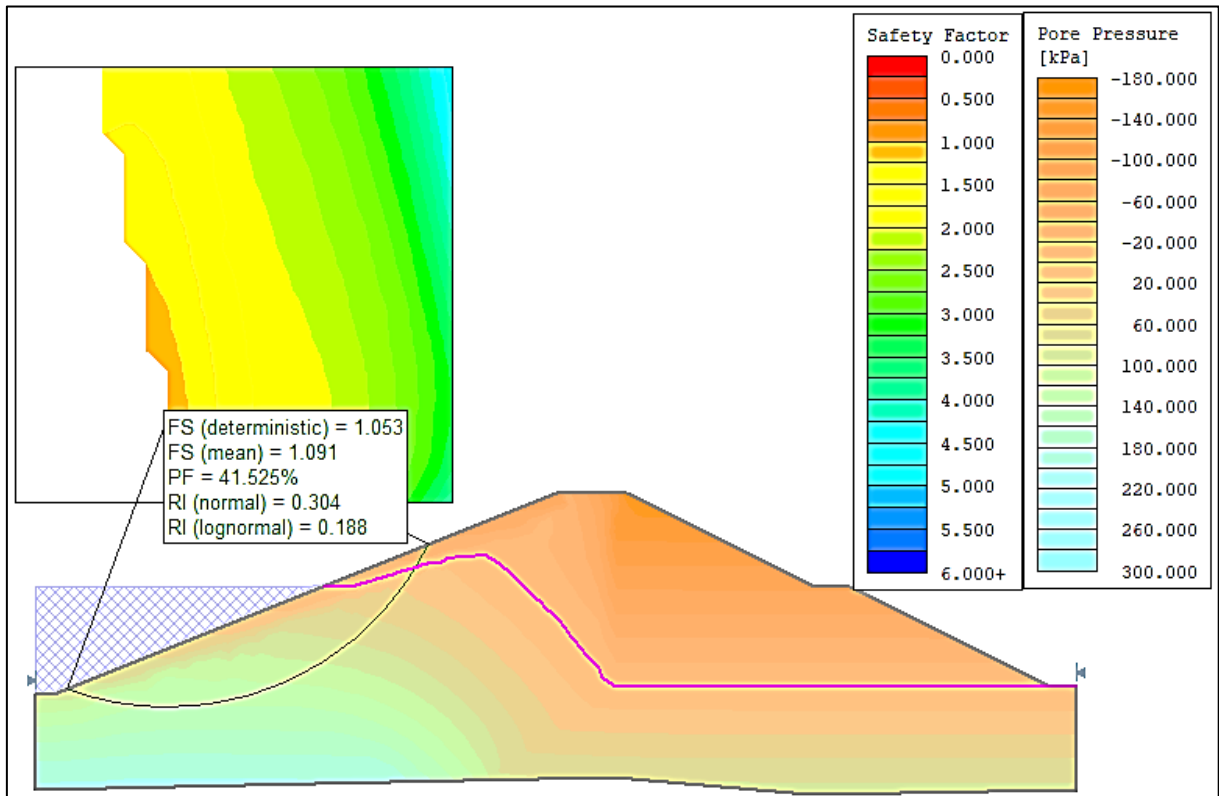
**Figura 29** – Barragem Faé: gráfico Probabilidade de Falha vs. tempo (d) para o método Morgenstern-Price



Fonte: O autor (2019)

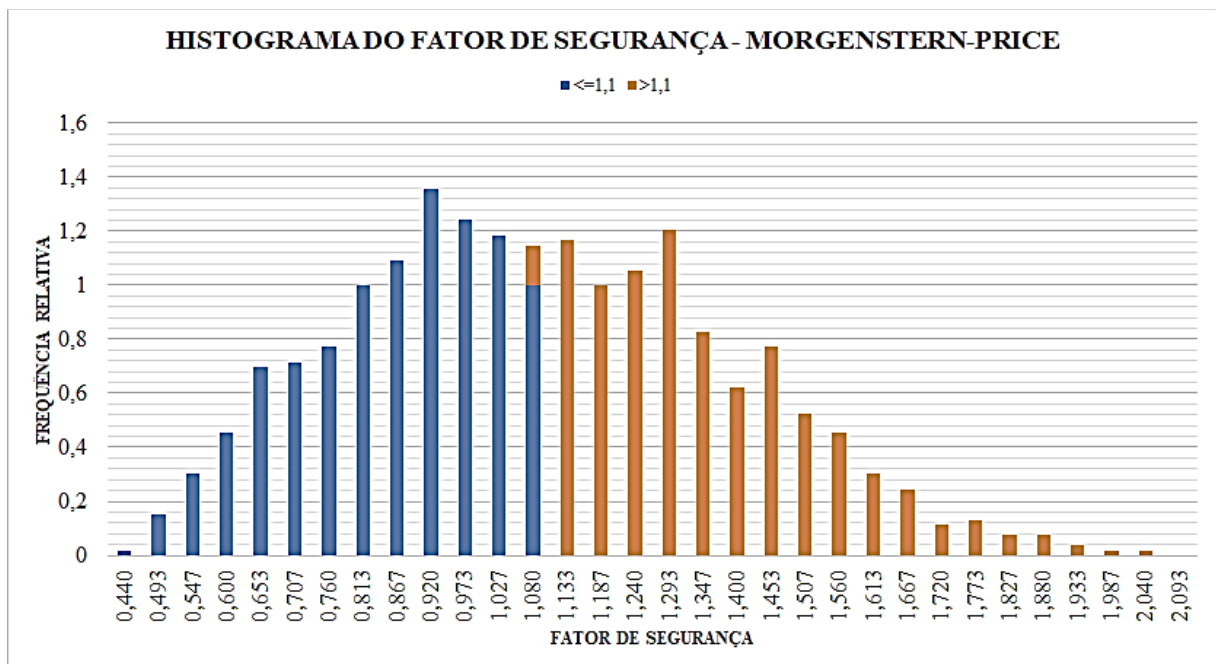
Ainda, como mostra a Figura 30, o método de Morgenstern-Price previu um  $FS_D$  de 1,053 e um  $FS_P$  de 1,097, com Probabilidade de Falha de 41,023%, ao 29º dia de rebaixamento. Cabe observar que em média, todos os métodos alcançam o fator de segurança limite próximo ao 30º dia de rebaixamento com valor médio de  $FS_D$  igual a 1,057, de  $FS_P$  igual a 1,091 e a probabilidade de Falha em torno de 41%. O histograma do Fator de Segurança, com os valores obtidos pelo método citado, apresentado na Figura 31, 53,16% das interações realizados obtiveram valores de fator de segurança menores que 1,1.

**Figura 30** – Barragem Faé: superfície de ruptura para o método de Morgenstern-Price (rebaixamento rápido, dia 29)



Fonte: O autor (2019)

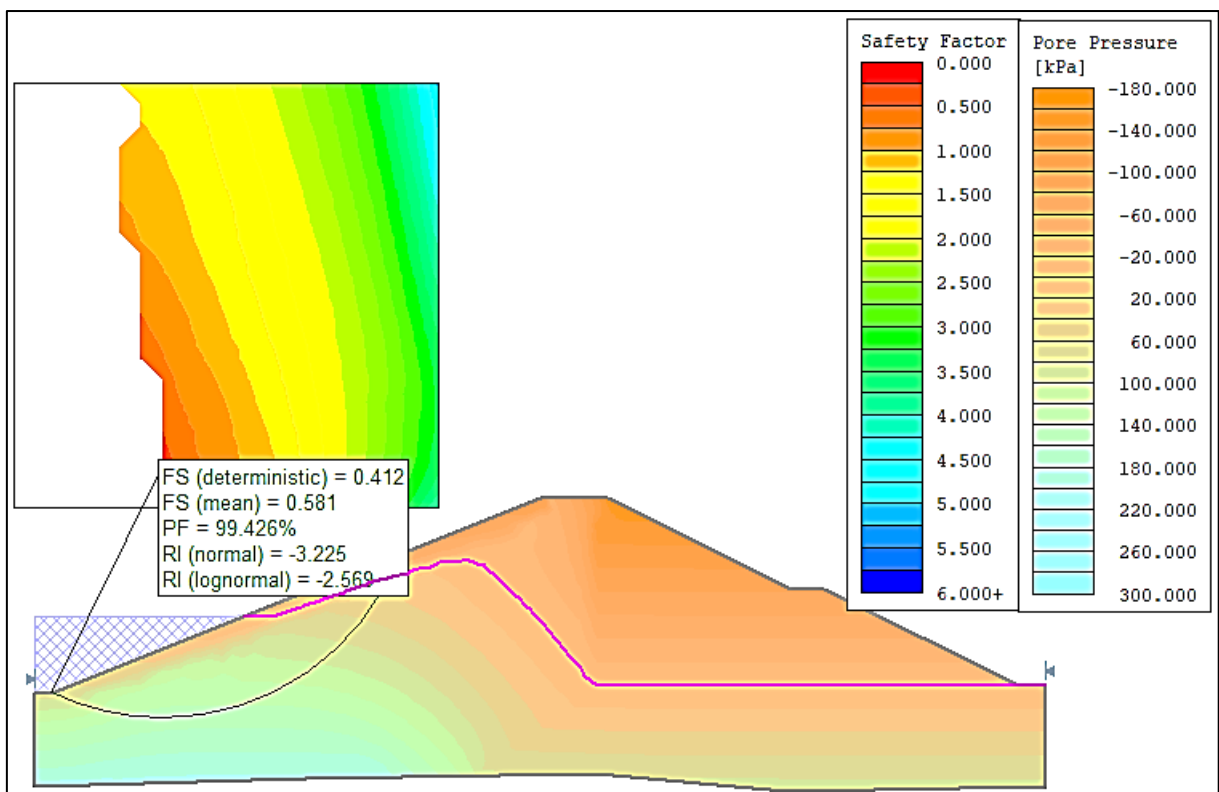
**Figura 31** – Barragem Faé: histograma do Fator de Segurança para o método de Morgenstern-Price (rebaixamento rápido, dia 29)



Fonte: O autor (2019)

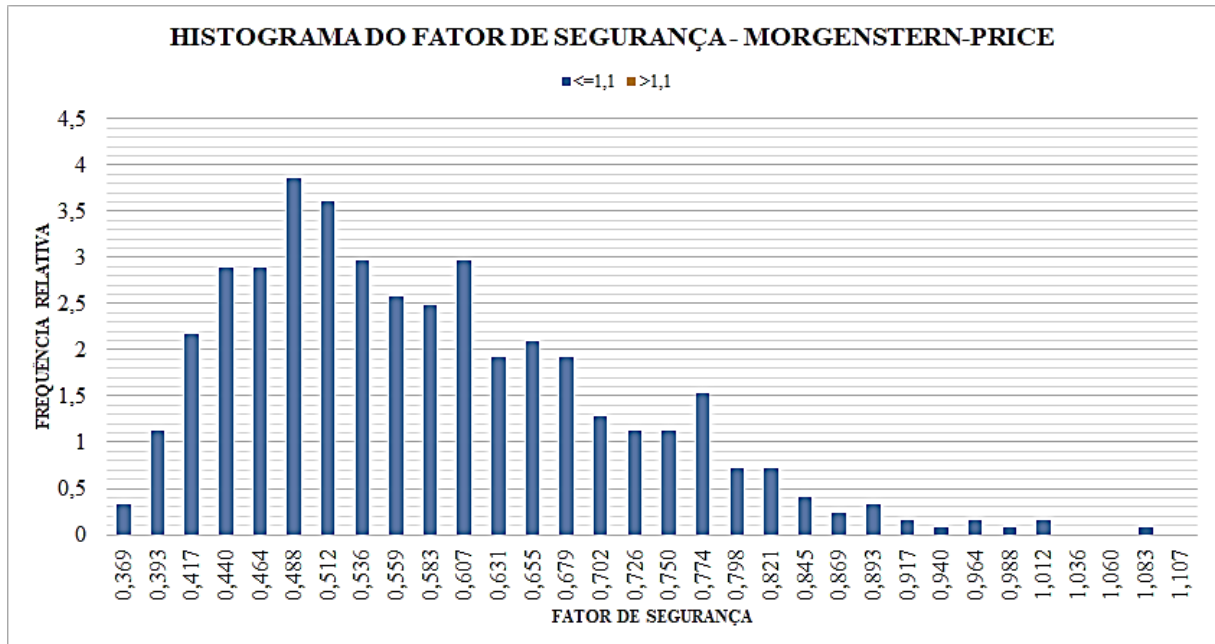
A Figura 32 é a superfície de ruptura traçada no último estágio de análise, 45°, no qual é previsto um  $FS_D$  de 0,412 e um  $FS_P$  de 0,581, com Probabilidade de Falha de 99,426%, a maior encontrada. A Figura 33 mostra que nesse estágio já todas as interações apresentam valores menores que 1,1. Ainda, nesse estágio todos os métodos apresentaram em média  $FS_D$  de 0,417 e  $FS_P$  de 580, sendo que o método de Fellenius mostrou os valores mais distantes da média.

**Figura 32** – Barragem Faé: superfície de ruptura para o método de Morgenstern-Price (rebaixamento rápido, PF=99,426%)



Fonte: O autor (2019)

**Figura 33** – Barragem Faé: histograma do Fator de Segurança para o método de Morgenstern-Price (rebaixamento rápido, PF=100%)



Fonte: O autor (2019)

#### 4.2.2. Barragem Orós

Realizadas as análises nos 150 estágios com um regime de rebaixamento de 15 cm/dia, obteve-se como valores mais relevantes os sintetizados na Tabela 19. Percebe-se que método de Janbu, também para a Barragem Orós, foi o método que estimou o menor número de estágios até o estado de FS menor que 1,1, 38 estágios. No 38º estágio obteve em seu cálculo  $FS_D$  igual a 1,092 e o  $FS_P$  igual a 1,057 com 23,6% de Probabilidade de Falha.

**Tabela 19** – Barragem Orós: dia em que ocorre Fator de Segurança Probabilístico < 1,1 e dia no qual ocorre máxima Probabilidade de Falha

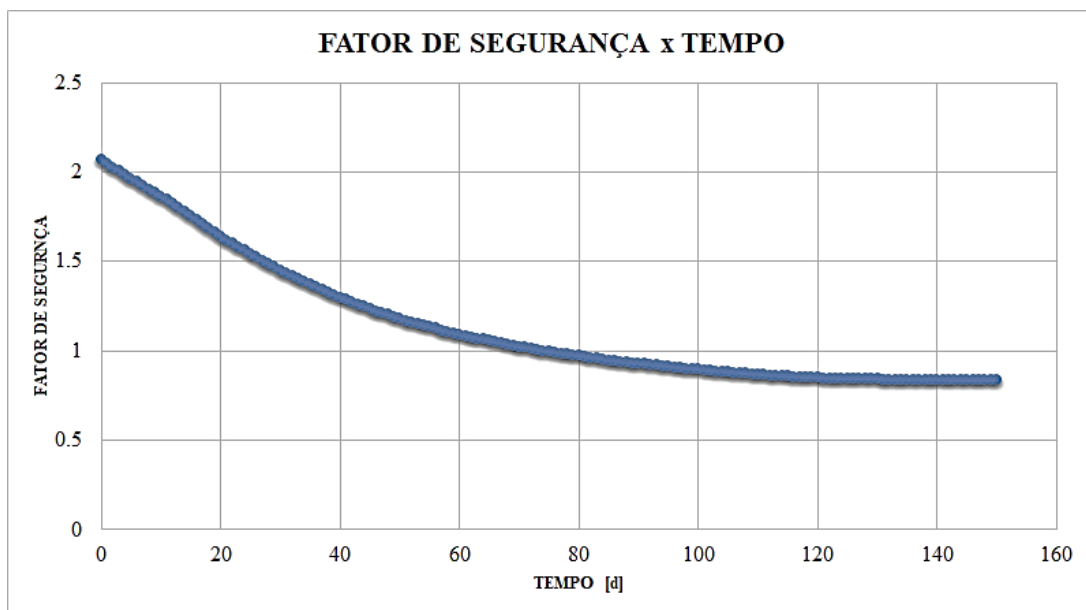
	FSP < 1,1				PFmáx			
	DIA	FSD	FSP	PF	DIA	FSD	FSP	PF
Fellenius	41	1,076	1,092	25,200%	141	0,715	0,725	100,00%
Bishop S.	56	1,083	1,099	21,500%	150	0,802	0,813	98,20%
Janbu	38	1,076	1,092	23,600%	113	0,742	0,754	100,00%
Spencer	62	1,084	1,098	19,400%	150	0,839	0,857	94,50%
M.-Price	62	1,092	1,076	21,900%	150	0,835	0,853	94,90%

Fonte: O autor (2019)

Para os métodos de Bishop, Spencer e Morgenstern-Price a máxima Probabilidade de Falha deu-se no último estágio de análise, 150º dia, já os métodos de Fellenius e Janbu apresentaram PF igual a 100% respectivamente no estágio 141º e 113º. O método de Janbu no 113º dia de rebaixamento calculou  $FS_D$  igual a 0,742 e  $FS_P$  igual a 0,754. O método de Morgenstern-Price apresentou no 150º dia  $FS_D$  igual a 0,835,  $FS_P$  igual a 0,853 e Probabilidade de Falha de 94,9%.

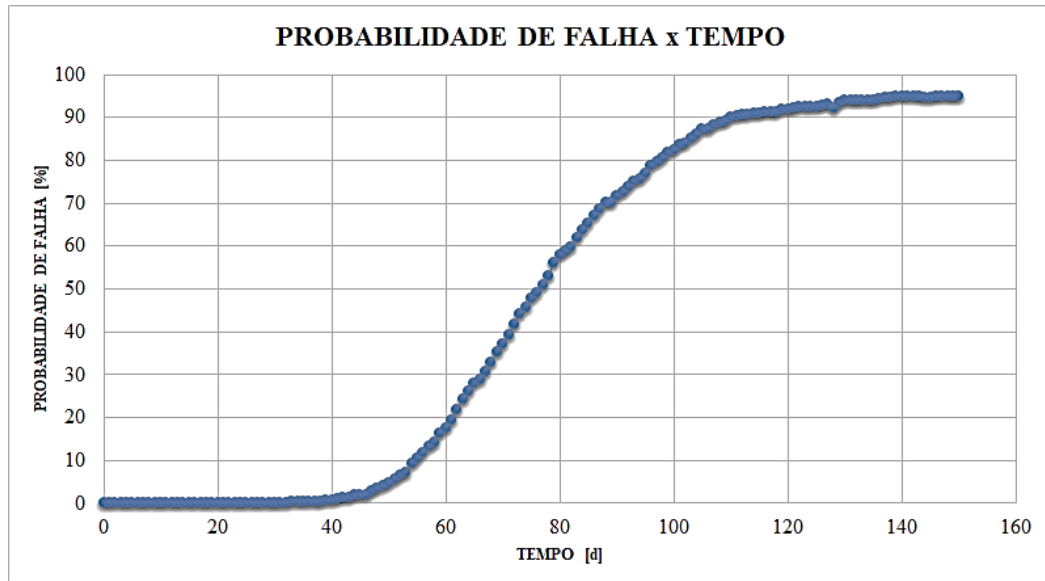
A Figura 34 mostra a variação do Fator de Segurança determinístico calculado com o método de Morgenstern-Price ao longo dos dias de rebaixamento, indo do valor 2,07, do estágio 0, até 0,835 do 150º dia de análise. O gráfico da variação da Probabilidade Falha ao longo do tempo é mostrado na Figura 35.

**Figura 34** – Barragem Orós: gráfico do fator de segurança vs. tempo (d) para o método Morgenstern-Price



Fonte: O autor (2019)

**Figura 35** – Barragem Orós: gráfico Probabilidade de Falha vs. tempo (d) para o método Morgenstern-Price

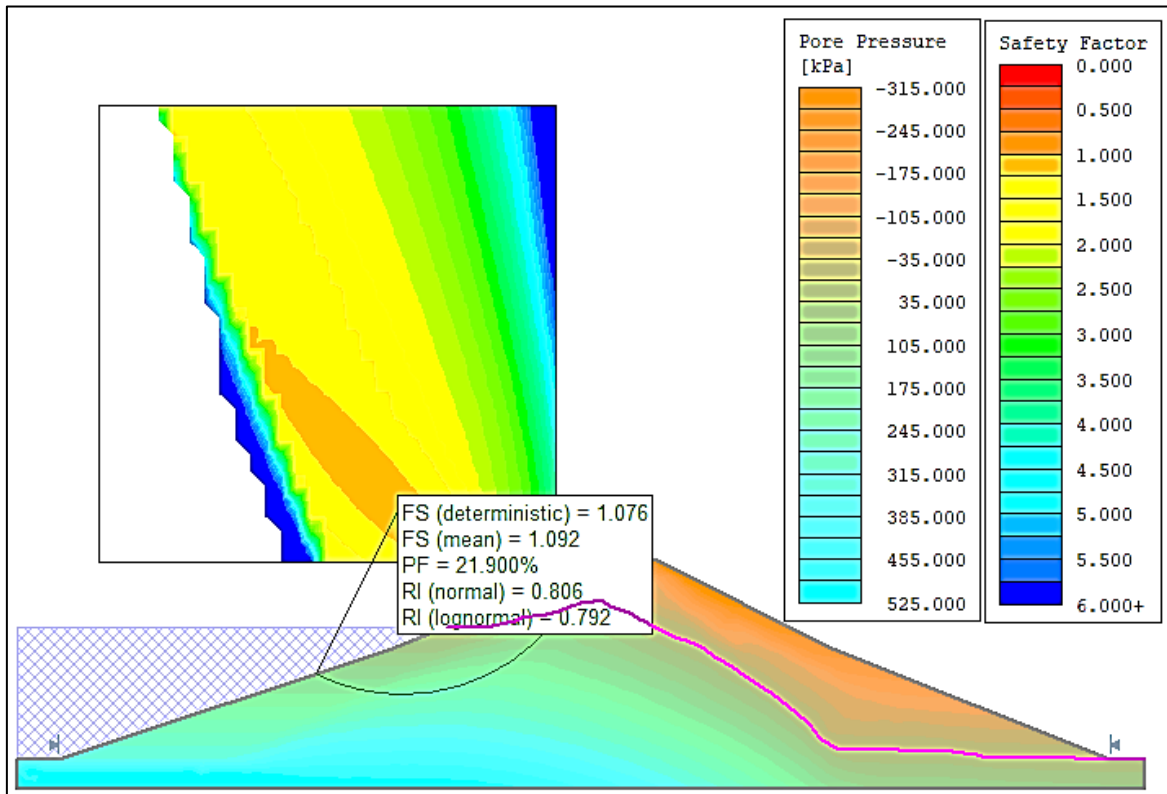


**Fonte:** O autor (2019)

Os resultados calculados pelo método de Morgenstern-Price para o 62º dia de rebaixamento são mostrados na Figura 36. Percebe-se pela figura que o  $FS_D$ , nesse estágio, é igual a 1,076 e o  $FS_P$  é igual a 1,092. A Probabilidade de Falha apresentada no estágio 62 foi de 21,9%.

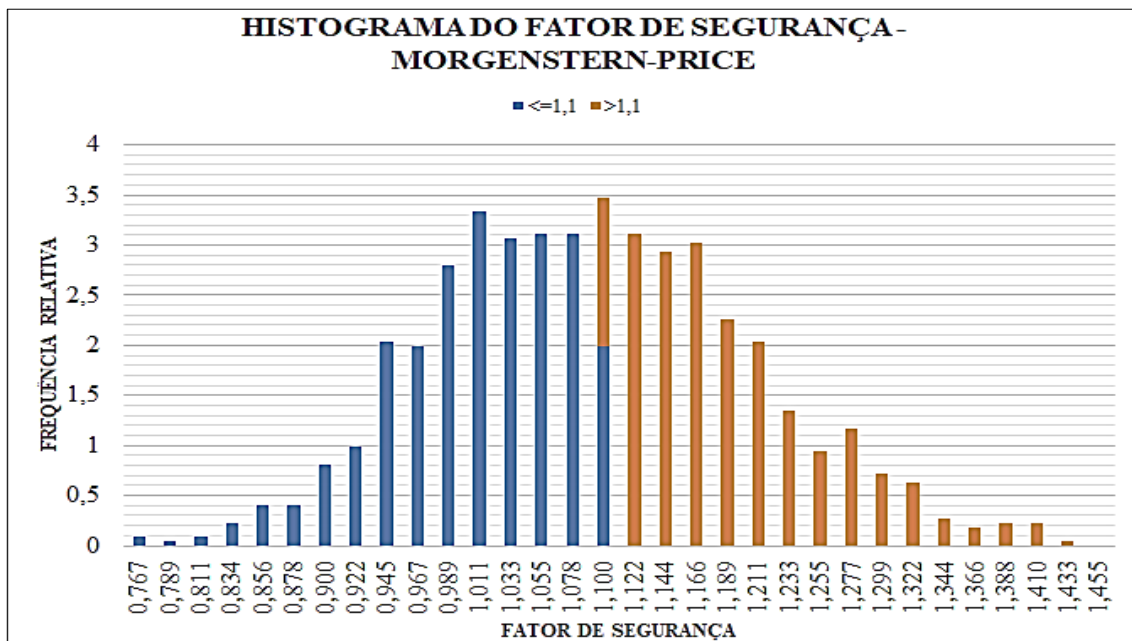
Para o Janbu o estágio no qual ocorreria a condição de Fator de Segurança menor ou igual a 1,1 seria o 38º, o menor valor obtido, e para os métodos de Spencer e Morgenstern-Price no estágio 62º, obtendo-se uma amplitude nos resultados de 24 dias. A Figura 37 mostra o histograma do Fator de Segurança para o método de Morgenstern-Price, nele constatamos que 54,0% das interações resultaram em valores de fatores de segurança menores que 1,1.

**Figura 36** – Barragem Orós: superfície de ruptura para o método de Morgenstern-Price (rebaixamento rápido, dia 62)



Fonte: O autor (2019)

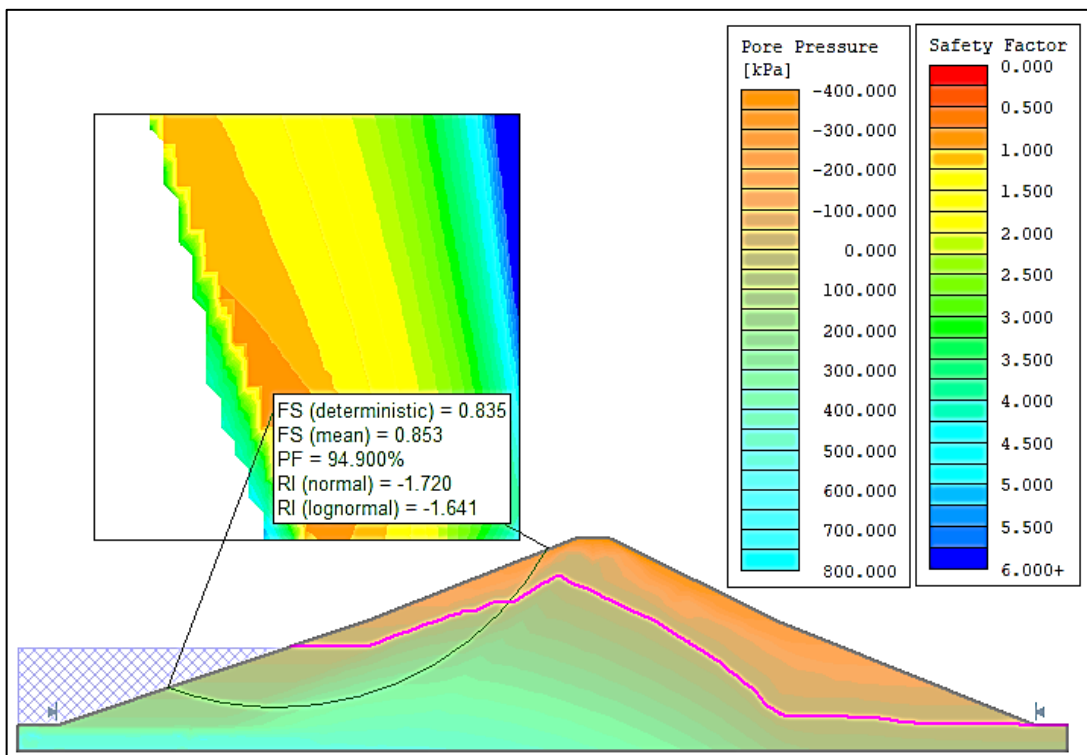
**Figura 37** – Barragem Orós: histograma do Fator de Segurança para o método de Morgenstern-Price (rebaixamento rápido, dia 62)



Fonte: O autor (2019)

Por fim, a Figura 38 mostra a superfície de ruptura para a maior Probabilidade de Falha encontrada pelo método de Morgenstern-Price, nessa condição a Figura 39 mostra a distribuição de frequência dos valores de Fator de Segurança. O  $FS_D$  obtido foi de 0,835 e o  $FS_P$  foi de 0,853 com a Probabilidade de Falha de 94,90%. Pelo histograma pode-se concluir que 99,7% das interações obtiveram valores menores que 1,1.

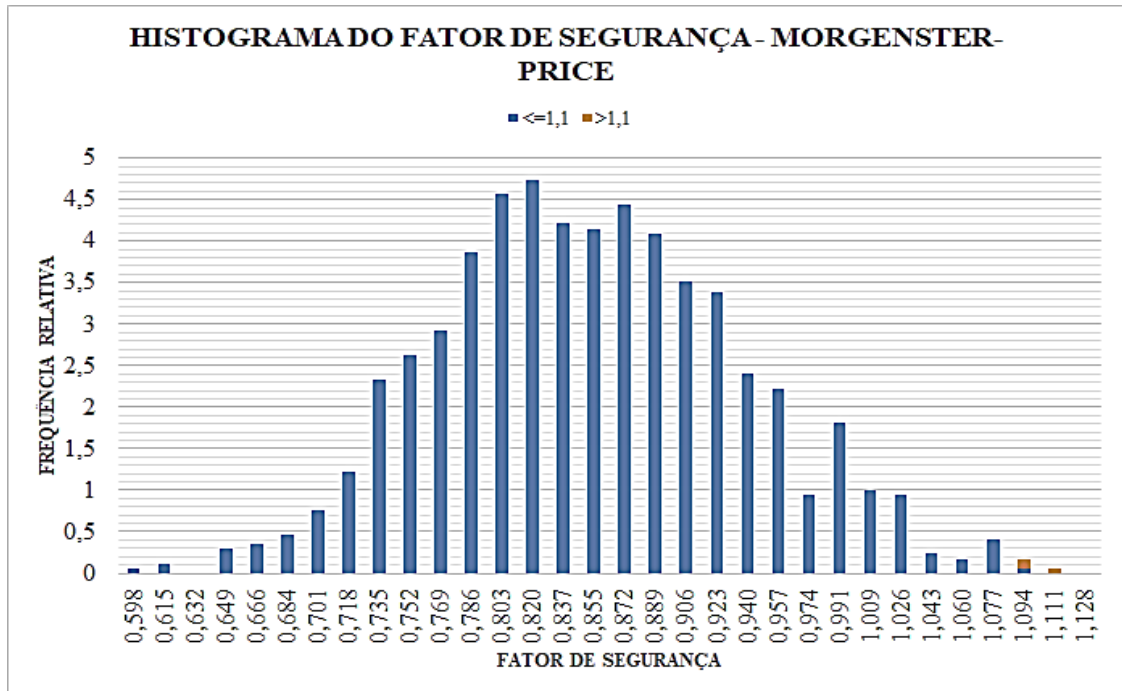
**Figura 38** – Barragem Orós: superfície de ruptura para o método de Morgenstern-Price (rebaixamento rápido, PF=94,90%)



Fonte: O autor (2019)



**Figura 39** – Barragem Orós: histograma do Fator de Segurança para o método de Morgenstern-Price (rebaixamento rápido, PF=94,90%)



Fonte: O autor (2019)

## 5 CONCLUSÃO

A presente seção destina-se a apresentação das conclusões das análises da estabilidade dos taludes de montante e jusante das barragens Faé e Orós, nas condições críticas. São, também nesta seção, apresentadas as dificuldades encontradas ao longo do desenvolvimento do presente estudo.

O método escolhido para a realização dos cálculos do Fator de Segurança influencia no resultado obtido, tanto na análise probabilística quanto na análise determinística, cabendo ao projetista escolher entre os métodos mais ou menos conservadores, assim como nesse trabalho tomamos como referência os resultados obtidos pelo método de Morgenstern-Price, que embora seja um dos métodos menos conservadores, apresentando valores de FS mais altos, é um dos métodos rigorosos.

Pôde-se constatar que majoritariamente, nas análises realizadas, os menores valores de Fator de Segurança foram obtidos ou pelo método de Janbu, na maioria dos casos, ou pelo método de Fellenius, apresentando por isso os maiores valores de Probabilidade de Falha. Os dois métodos apresentaram valores bem próximos na maioria das análises, o que se esperava pois os dois são os métodos mais conservadores.

Para a condição de reservatório cheio, considerando precisão de três casas decimais, nenhuma das barragens apresentou Probabilidade de Falha maior que 0,000% para o talude de jusante em nenhum dos métodos. Os métodos de Bishop simplificado, Spencer e Morgenstern-Price foram os que apresentaram maiores valores de Fator de Segurança, tanto determinístico quanto probabilístico, com resultados que diferiram entre si em no máximo 0,01 entre si.

Nessa condição, considerando o método de Morgenstern-Price, a Barragem Faé apresentou Fator de Segurança Probabilístico igual a 2,180. Em comparação com obtido Souza e Vieira (2007) 1,925 obtido por meio de Bishop simplificado, considerando a pequena diferença de valores entre os métodos rigorosos, já mencionada, pode-se afirmar que a análise realizada por esse trabalho obteve valores próximos a este. Para a Barragem Orós, o fator de segurança calculado foi de 1,994, com uma grande diferença do valor obtido nas análises feitas para o seu projeto, 1,41. Considera-se que tal diferença se deve às poucas informações sobre as propriedades geotécnicas dos materiais de construção e as conseqüentes considerações feitas nesse trabalho sobre eles.

Na condição de rebaixamento rápido do nível de água, a Barragem Faé chegou à condição de Fator de Segurança menor que 1,1 no 29º estágio, com uma Probabilidade de Falha de 41,525% e um  $FS_p$  igual a 1,091, para esse caso não temos valores da literatura para

comparação. A barragem Orós, chegou à mesma condição no 62º estágio com probabilidade de Falha de 21,9% e  $FS_P$  igual a 1,076.

A principal dificuldade para a realização desse trabalho foi a incompletude das informações disponíveis sobre os valores das propriedades geotécnicas dos materiais de construção barragens aqui estudadas. Essa falta de informação, tanto no ato do projeto quanto em trabalhos como esse, impele o realizador das análises da estabilidade dos taludes a fazer as melhores aproximações possíveis para esses valores, no entanto, esse processo implica em uma incerteza que pode interferir na segurança estimada.

Assim, é de suma importância destacar que quanto maior o número de informações, maior é a representatividade do modelo de análise, melhorando a confiabilidade dos resultados. Cabe também destacar que uma complementação da análise determinística com a realização da análise probabilística considerando variação das propriedades geotécnicas é essencial para um maior controle dos resultados obtidos e é o aconselhável.

Como sugestão para trabalhos futuros tem-se:

- Realizar análise para solos não saturados;
- Realizar estudos para uma possível ampliação dos bancos de dados sobre as barragens aqui apresentadas;
- Ampliação do número de barragens cearenses analisadas.

## REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS – ANA. **Manual do Empreendedor sobre Segurança de Barragens: instruções para Apresentação do Plano de Segurança da Barragem.** v. 1. Brasília: ANA, 2016.
- ARAÚJO, J. Carlos de; MELO, A. M. Cartaxo de; FREITAS, J. C. Amorim de. Otimização da altura de uma barragem de terra homogênea. In: **Rev. Tecnol.**, Fortaleza, v. 25, n. 1, p. 30-42, jun. 2004.
- APAZA, M. A. Flores; BARROS, J. M. de Camargo. Análise probabilística de estabilidade de taludes pelo método de Monte Carlo. In: **XVII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica - COBRAMSEG.** 2014. 8p.
- BARROS, P. L. de Almeida. **Resistência ao Cisalhamento.** 2013. [online] Disponível em: <http://www.fec.unicamp.br/~persio/ic523/rescis.pdf>. Acesso em: 16 de set. 2019.
- BASSANELI, H. Rodrigues *et. al.* Estabilidade de taludes. In: **Rev. Jornada Científica**, São Paulo, v. 1, n. 2, out. 2016.
- CAPUTO, H. Pinto. **Mecânica dos solos e suas aplicações.** v. 2. 7.ed. Rio de Janeiro: LTC, 2017.
- CAROÇA, C. M. P. C. Lopes. **Metodologia de Estudo Geológico-Geotécnico a utilizar em Projectos de barragens de Terra de Perfil Zoneado.** 2007. 170 f. Relatório de Estágio – Universidade de Lisboa, Faculdade de Ciências, Pós-Graduação de Especialização em Geologia Aplicada, Lisboa, 2007.
- CARVALHO, L. Hernani de. **Curso de Barragens de Terra: com vistas ao Nordeste Brasileiro.** 1. ed. v. 1. Fortaleza: Departamento Nacional de Obras Contra a Seca - DNOCS, 1983.
- CARVALHO, L. Hernani de. **Curso de Barragens de Terra: com vistas ao Nordeste Brasileiro.** 1. ed. v. 2. Fortaleza: Departamento Nacional de Obras Contra a Seca - DNOCS, 1984.
- CARVALHO, L. Hernani de. **Curso de Barragens de Terra: com vistas ao Nordeste Brasileiro.** 1. ed. v. 3. Fortaleza: Departamento Nacional de Obras Contra a Seca - DNOCS, 1991.
- CEARÁ, Secretaria dos Recursos Hídricos do Estado do Ceará. **Plano de Ações Estratégicas de Recursos Hídricos do Ceará.** Fortaleza: SRH-CE, 2018.
- COSTA, W. Duarte. **Geologia de Barragens.** 1. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2012.
- DAS, Braja M. **Fundamentos de engenharia geotécnica.** 7. ed. São Paulo: Cengage Learning, 2014.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE OBRAS CONTRAS A SECA - DNOCS. **Barragem Orós**. [online] Disponível em:

[https://www.dnocs.gov.br/~dnocs/doc/canais/barragens/Barragem do Ceara/oros.htm](https://www.dnocs.gov.br/~dnocs/doc/canais/barragens/Barragem%20do%20Ceara/oros.htm). Acesso em: 23 de abr. 2019.

FABRÍCIO, J. V. Falabella. **Análises probabilísticas da estabilidade de taludes e contenções**. 2006. 170 f. Dissertação (mestrado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Civil. Rio de Janeiro, 2006.

FERREIRA, J. L. Ferrás. **Análise de estabilidade de taludes pelos métodos de Janbu e Spencer**. 2012. 144 f. Dissertação (mestrado) – Universidade do Porto, Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Porto, 2012.

FIORI, A. PIO. **Fundamentos de mecânica dos solos e das rochas: aplicações na estabilidade de taludes**. São Paulo: Oficina dos Textos, 2015.

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.

GIACON JUNIOR, A. J. **Análise probabilística da estabilidade de taludes via teoria da confiabilidade**. 86f. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia de Bauru, Universidade Estadual Paulista, Bauru, 2018.

GIL, E. José. **Curso de segurança de barragens: Módulo I – Barragens: aspectos legais, técnicos e socioambientais: Unidade 8: Aspectos geológicos e geotécnicos**. v. 8. Brasília: ANA, 2013.

MARANGON, M. **Tópicos em geotecnia e obras de terra: unidade 4 – Estabilidade de taludes**. 2004a. [online] Disponível em: [http://www.ufjf.br/nugeo/files/2009/11/togot\\_Unid04EstabilidadeTaludes01.pdf](http://www.ufjf.br/nugeo/files/2009/11/togot_Unid04EstabilidadeTaludes01.pdf). Acesso em: 17 de set. 2019.

MARANGON, M. **Tópicos em geotecnia e obras de terra: unidade 05 - barragens de terra e enrocamento**. 2004b. [online] Disponível em: [http://www.ufjf.br/nugeo/files/2009/11/togot\\_unid05.pdf](http://www.ufjf.br/nugeo/files/2009/11/togot_unid05.pdf) . Acesso em: 19 de set. 2019.

MASSAD, Faïçal. **Obras de terra: curso básico de geotecnia**. 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2010.

MEDEIROS, H. Lima de. **Otimização do parâmetro de forma para utilização no método numérico sem malhas**. 2014. 100 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Recursos Hídricos, Fortaleza, 2014.

MEIRELLES, F. S. Cruz. **Curso de segurança de barragens: Módulo I – Barragens: aspectos legais, técnicos e socioambientais: Unidade 9: Barragens de terra e enrocamento**. v. 9. Brasília: ANA, 2013.

MENESCAL, R. Abreu *et al.* Acidentes e incidentes em barragens no Estado do Ceará. In: **XXIV Seminário Nacional de Grandes Barragens**. 2011. p. 91-108.

OLIVEIRA, D. Alves de. **Análise do fluxo d'água na barragem Engenheiro Armando Gonçalo – Açú/RN**. 2014. 128 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Natal, 2014.

PINTO, Carlos de Sousa. **Curso Básico de Mecânica dos Solos em 16 aulas**. 3. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2006.

QUINTAS, F. E. Geraldês. **Planejamento da construção de Barragens de Terra**. 2002. 181 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade do Porto, Faculdade de Engenharia, Departamento de Engenharia Civil, Porto, 2002.

RICHARDSON, R. J. **Pesquisa Social: Métodos e Técnicas**. 3ª ed. São Paulo, SP: Atlas, 2011.

SHERARD, James L. **Influence of soil properties and construction methods on the performance of homogeneous earth dams**. 1953. 244 f. Tese (Doutorado), Harvard University, Cambridge, 1953.

SILVA, C. Cerceau. **Análise de estabilidade de um talude de cava de alegria utilizando abordagem probabilística**. Ouro Preto: Universidade Federal de Ouro Preto - UFOP, 2015. 134 f.

SOARES, B. Rodrigues. **Análise Probabilística de estabilidade de taludes de barragens de terra no Estado do Ceará**. 2017. 136 f. Trabalho de Conclusão de Curso - Universidade de Fortaleza, Centro de Ciências Tecnológicas, Graduação em Engenharia Civil, Fortaleza 2017.

SOUZA, V. A. Demétrio de; VIEIRA, V. de P. P. Barbosa. Análise probabilística da estabilidade do talude de jusante de uma barragem de terra em regime de operação. In: **XXVII Seminário Nacional de Grandes Barragens**. Belém: Comitê Brasileiro de Barragens, 2007.

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**. 2009. 147f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2009.

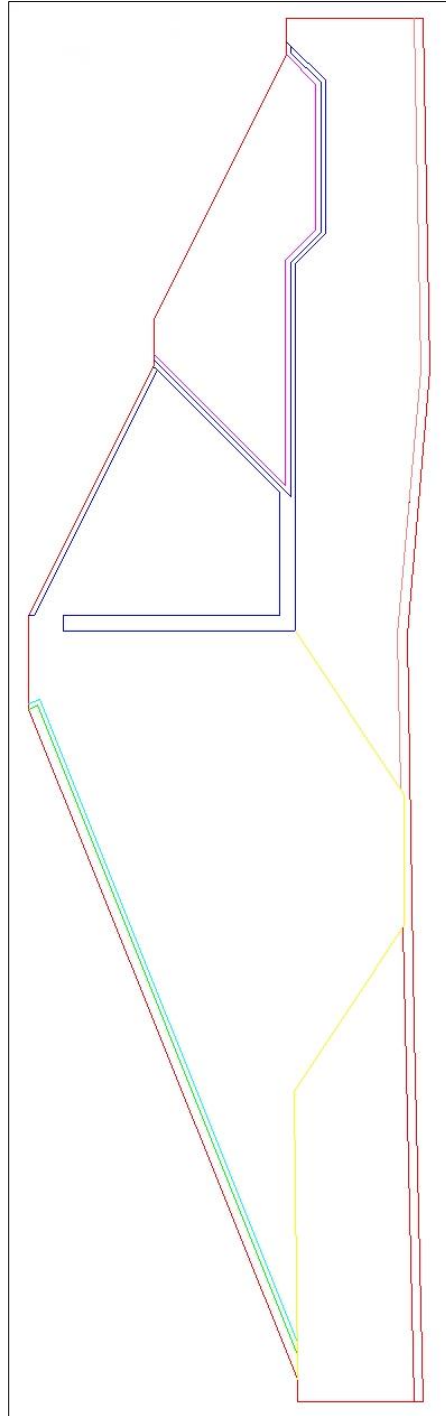
TONUSSI, A. Pagotto. **Estudo de ruptura de barragem por piping**. 2017. 65 f. Trabalho de Conclusão de Curso - Universidade do Sul de Santa Catarina, Centro de Ciências Tecnológicas, Graduação em Engenharia Civil, Florianópolis, 2017.

VIEIRA, V. de P. P. Barbosa; GOUVEIA NETO, A.; MIRANDA, A. N. e MALVEIRA, V. T. **Roteiro para projetos de pequenos açudes**. Fortaleza: Universidade Federal do Ceará - Centro de Tecnologia, 1996.

## APÊNDICE A – BARRAGEM FAÉ

### A.1. MODELAGEM E MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO

**FIGURA A.1.1** – Geometria da Barragem Faé no AutoCAD

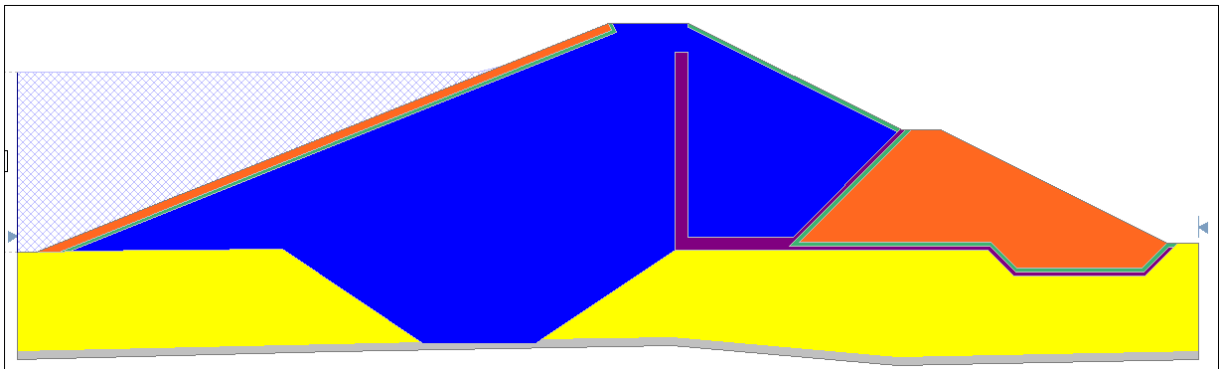


**TABELA A.1.1** – Coordenadas dos vértices das polilinhas da geometria da Barragem Faé no AutoCAD

VÉRT.	EXTERNO		INTERNO 01		INTERNO 02		INTERNO 03		INTERNO 04		INTERNO 05			
	x	y	x	y	x	y	x	y	x	y	x	y	x	y
1	-1.4353	-8.0614	48.871	17.1484	65.5931	9.1445	64.5657	8.9656	85.295	0.3696	47.871	0.1259		
2	-1.4353	-0.0156	48.871	16.813	57.1746	0.7259	64.7893	9.1892	85.595	0.6696	37.4233	-6.8392		
3	0	0	64.5657	8.9656	71.5882	0.7259					28.9879	-6.8392		
4	42.871	17.1484	56.726	1.1259	73.52	-1.2059					18.4285	0.2004		
5	48.871	17.1484	48.871	1.1259	82.8711	-1.2059					0	0		
6	64.8788	9.1445	48.871	14.9484	84.7465	0.6696								
7	67.7788	9.1445	47.871	14.9484										
8	84.7465	0.6696	47.871	0.1259										
9	87.0943	0.6696	71.3397	0.1259										
					VÉRT.									
10	87.0943	-8.0687	73.2715	-1.8059	1	42.871	17.1484	43.1941	17.1484	37.7886	-6.5957	-1.4353	-7.4612	
11	64.5619	-8.4993	83.1196	-1.8059	2	43.0938	16.5913	43.4838	16.4242	47.6632	-6.4195	28.8616	-6.755	
12	47.6424	-7.02	85.295	0.3696	3	1.6607	0.0181	2.491	0.0271	64.5824	-7.8988			
13	22.3523	-7.4712	84.8708	0.3696	4					87.0943	-7.4685			
14	-1.4353	-8.0614	82.9954	-1.5059										
15			73.3958	-1.5059										
16			71.464	0.4259										
17			56.4503	0.4259										
18			65.1689	9.1445										

AS CORES LIGAM O CONJUNTO DE COORDENADAS AO ELEMENTO NA FIGURA A.1.1

**FIGURA A.1.2** – Geometria da Barragem Faé no Slide 6.0



**TABELA A.1.2** – Materiais e suas propriedades, valores médios, inseridas no Slide 6.0

Material Name	Color	Unit Weight (kN/m <sup>3</sup> )	Strength Type	Cohesion (kN/m <sup>2</sup> )	Phi	KS (m/s)	Soil Type
Z1_SC	Blue	18	Mohr-Coulomb	22.2	32.2	3e-009	Sand
F/D_A_SW	Purple	18.6	Mohr-Coulomb	0	30	1e-005	Sand
RF/RR_ENR_GW	Orange	18.6	Mohr-Coulomb	0	40	0.00027	General
F1_A.ALUV_SP	Yellow	20	Mohr-Coulomb	1	35	1.5e-007	Sand
TRA_SW	Green	18.6	Mohr-Coulomb	0	30	1e-005	Sand

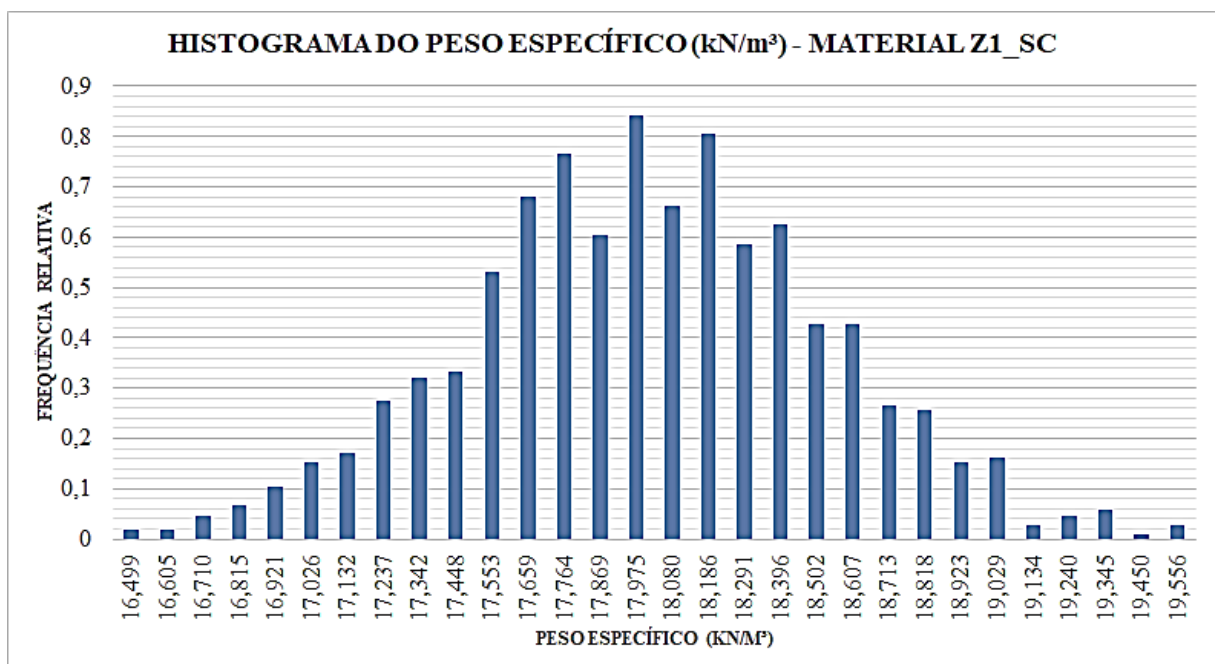


TABELA A.1.3 – Propriedades geotécnicas, valores médios e desvio padrão, no Slide 6.0

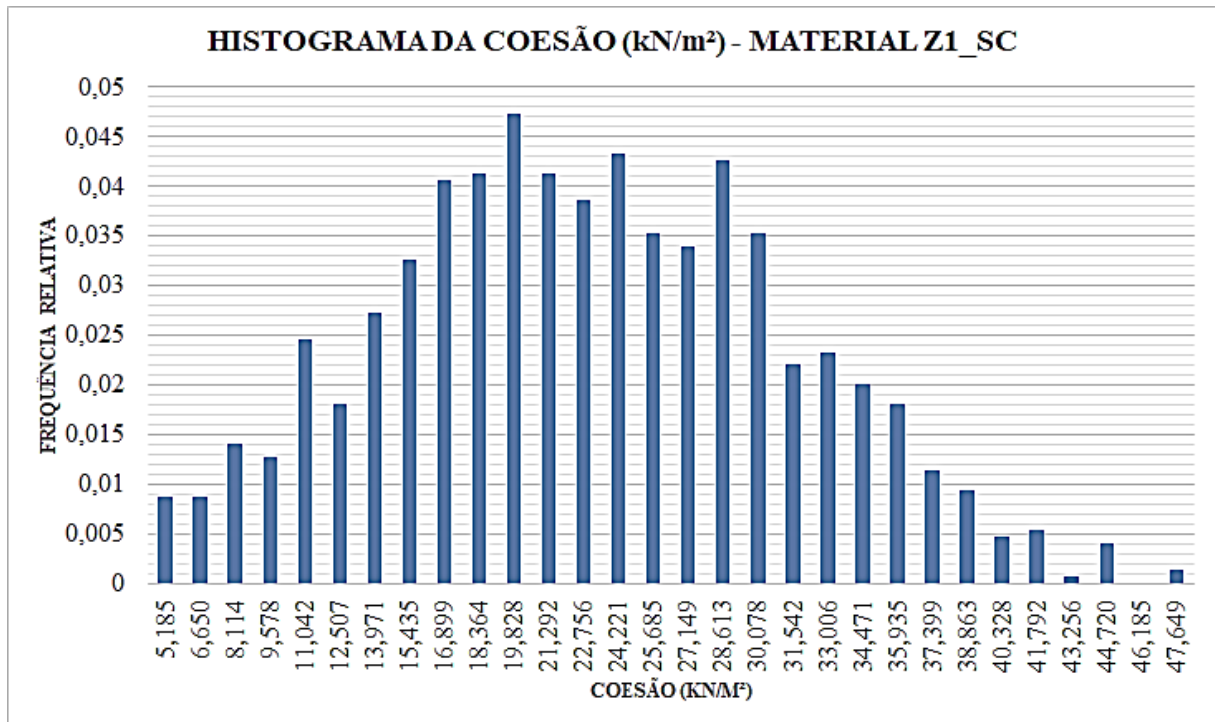
Material Name	Property	Distribution	Mean	Std. Dev.	Rel. Min	Rel. Max
Z1_SC	Cohesion	Normal	22.2	8.88	17.76	26.64
Z1_SC	Phi	Normal	32.2	4.4	13.2	13.2
Z1_SC	Unit Weight	Normal	18	0.54	1.62	1.62
F/D_A_SW	Cohesion	Normal	0	0	0	0
F/D_A_SW	Phi	Normal	30	3	9	9
F/D_A_SW	Unit Weight	Normal	18.6	0.558	1.674	1.674
RF/RR_ENR_GW	Cohesion	Normal	0	0	0	0
RF/RR_ENR_GW	Phi	Normal	40	4	12	12
RF/RR_ENR_GW	Unit Weight	Normal	18.6	0.558	1.674	1.674
F1_A.ALUV_SP	Cohesion	Normal	1	0	0	0
F1_A.ALUV_SP	Phi	Normal	35	2	6	6
F1_A.ALUV_SP	Unit Weight	Normal	20	0.519	1.557	1.557
TRA_SW	Cohesion	Normal	0	0	0	0
TRA_SW	Phi	Normal	30	3	9	9
TRA_SW	Unit Weight	Normal	18.6	0.558	1.674	1.674

## A.2. HISTOGRAMAS DAS PROPRIEDADES GEOTÉCNICAS DOS MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO

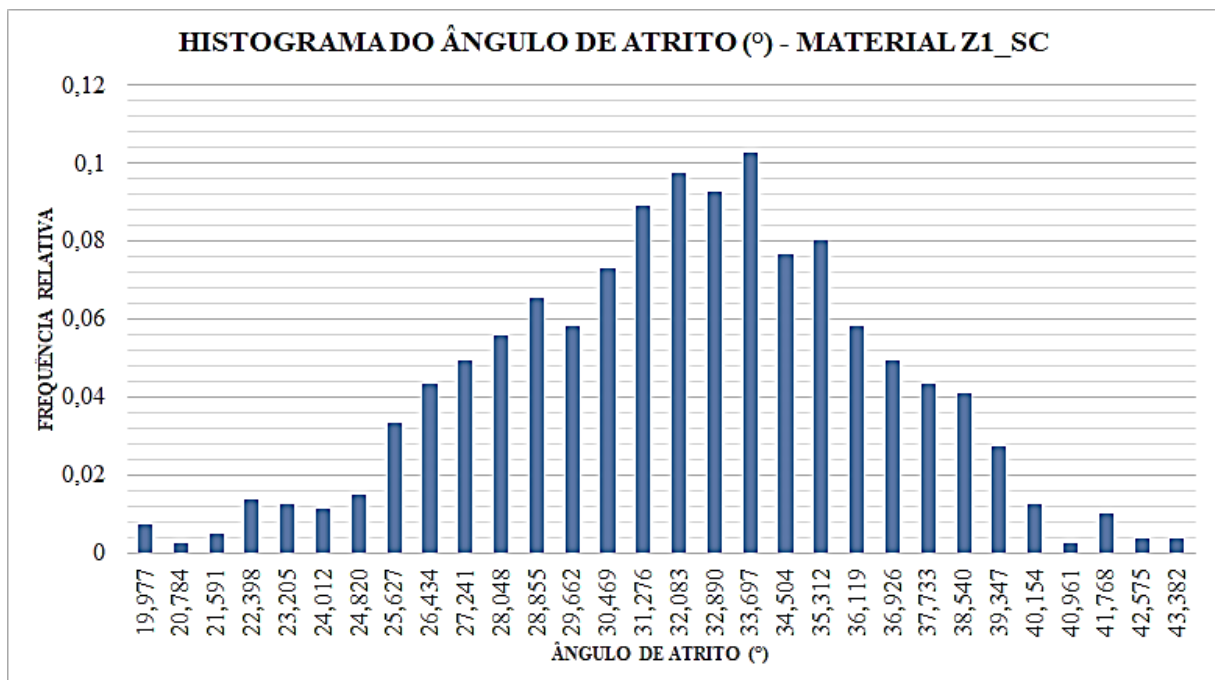
FIGURA A.2.1 – Distribuição de frequência do peso específico: material Z1\_SC



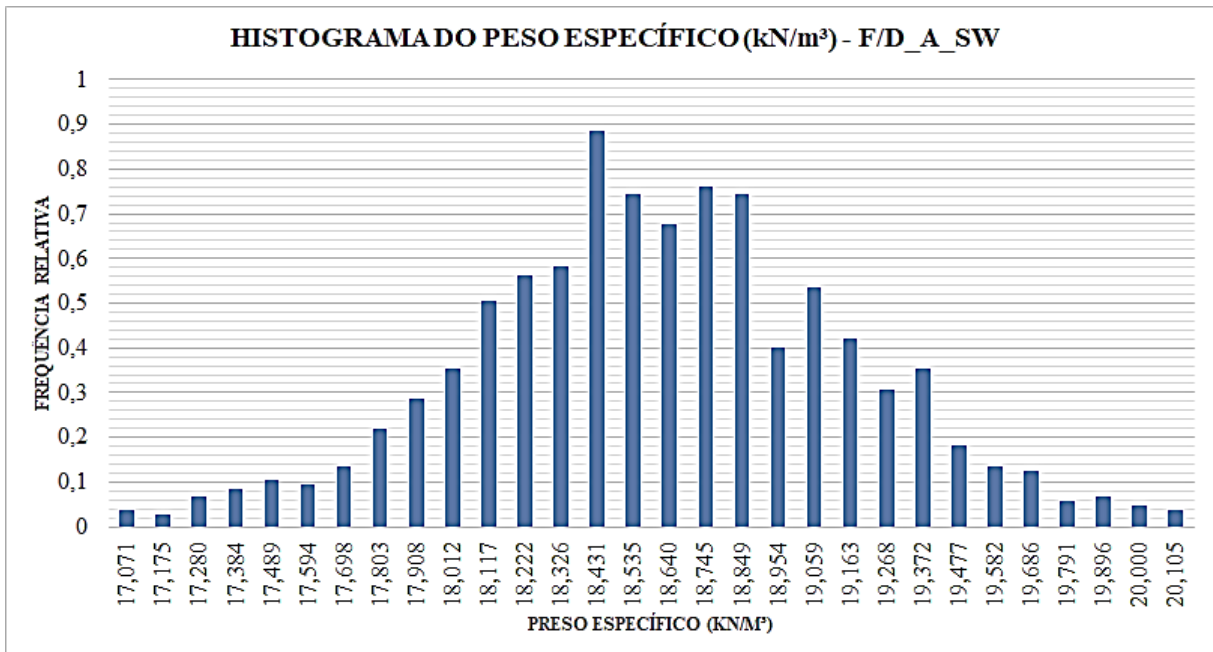
**FIGURA A.2.2** – Distribuição de frequência da coesão: material Z1\_SC



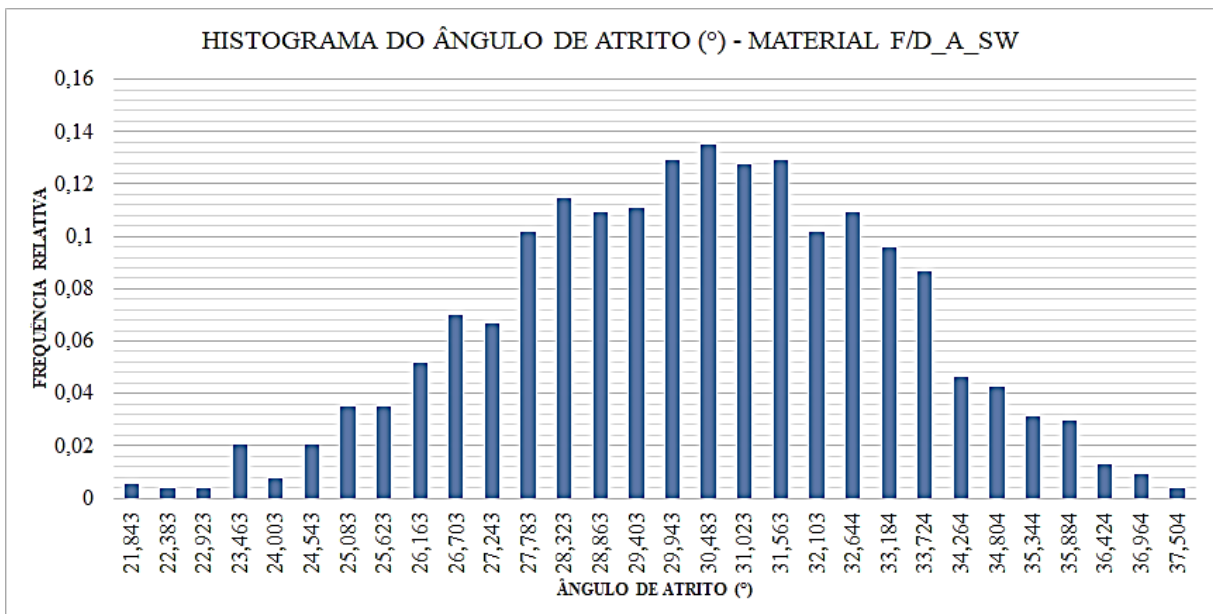
**FIGURA A.2.3** – Distribuição de frequência do ângulo de atrito: material Z1\_SC



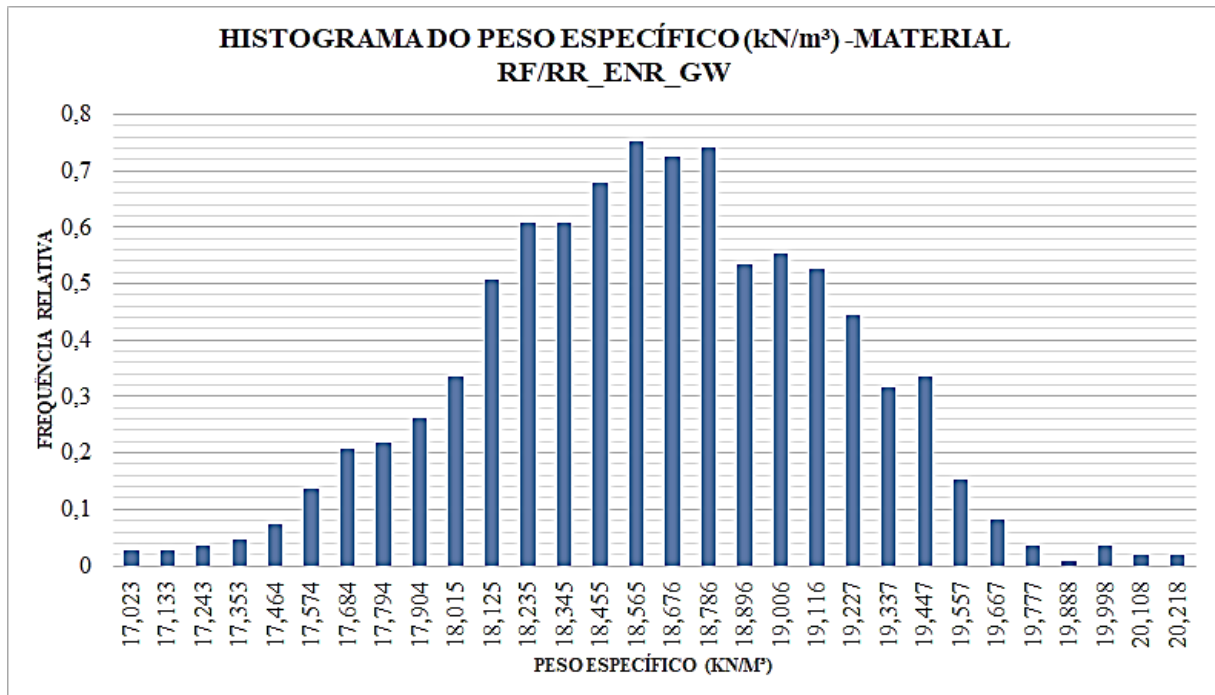
**FIGURA A.2.4 – Distribuição de frequência do peso específico: material F/D\_A\_SW**



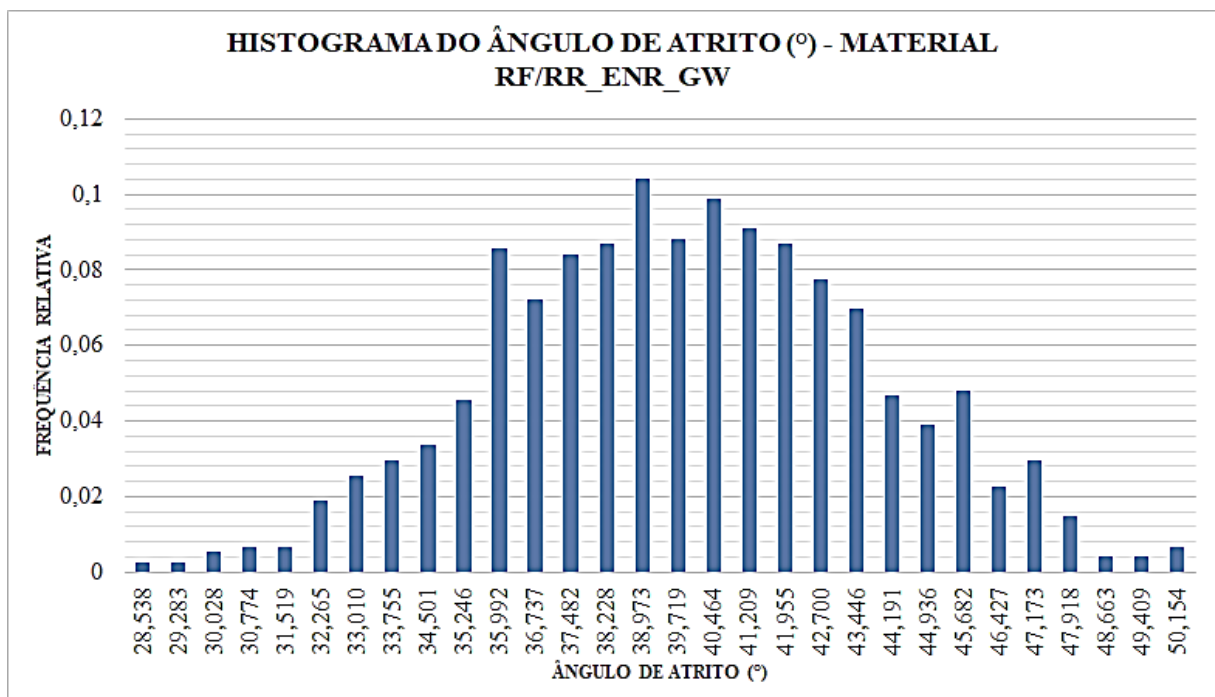
**FIGURA A.2.5 – Distribuição de frequência do ângulo de atrito: material F/D\_A\_SW**



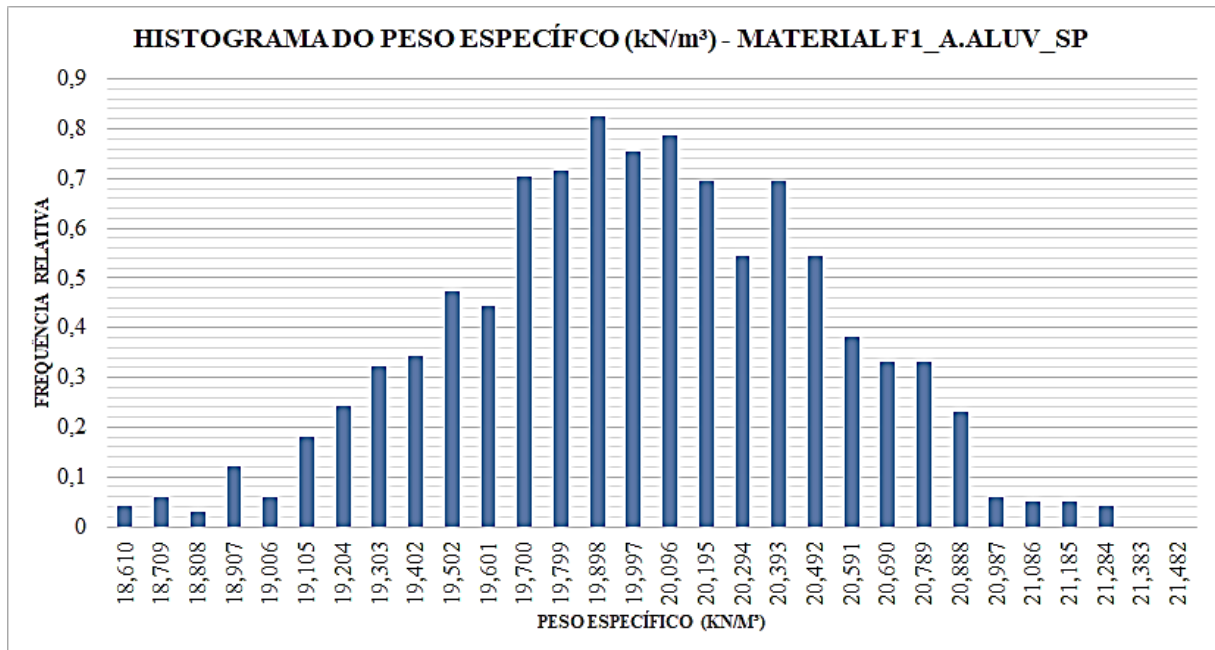
**FIGURA A.2.6** – Distribuição de frequência do peso específico: material RF\_RR\_ENR\_GW



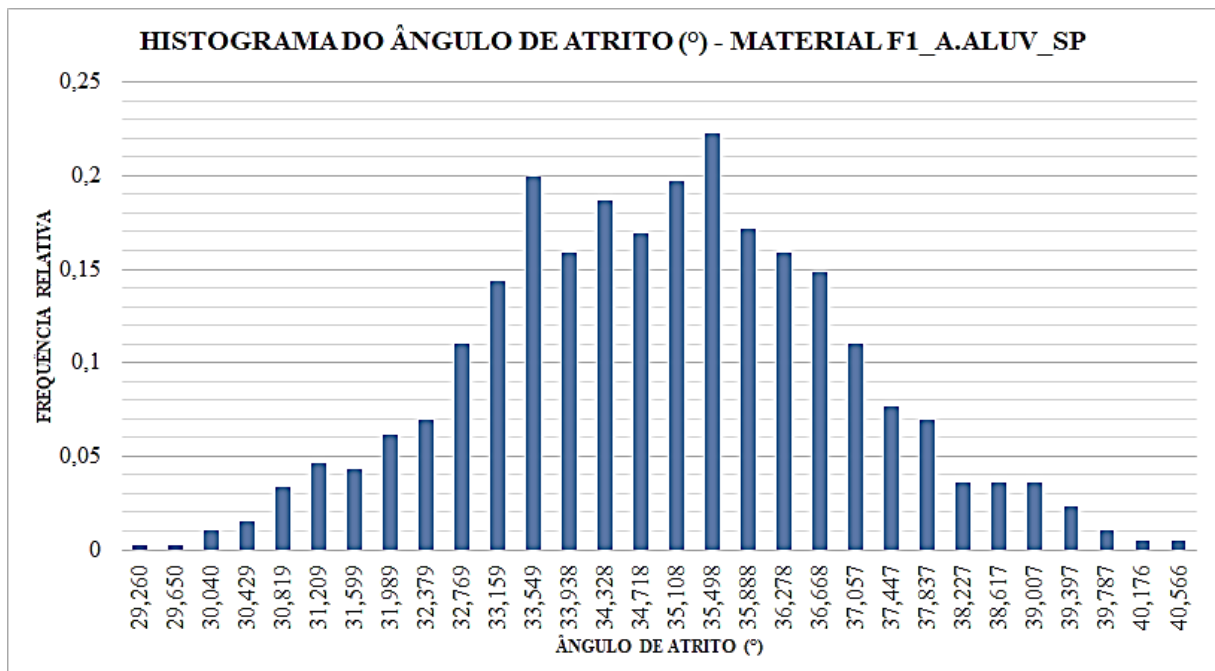
**FIGURA A.2.7** – Distribuição de frequência do ângulo de atrito: material RF\_RR\_ENR\_GW



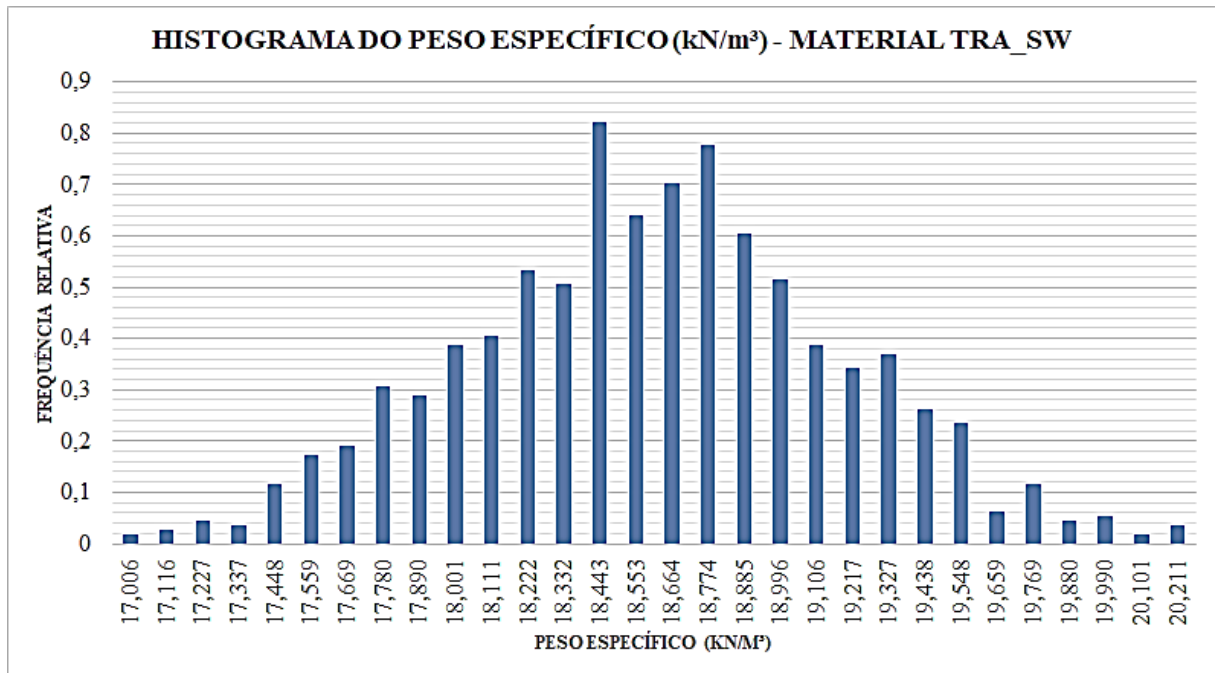
**FIGURA A.2.8** – Distribuição de frequência do peso específico: material F1\_A.ALUV\_SP



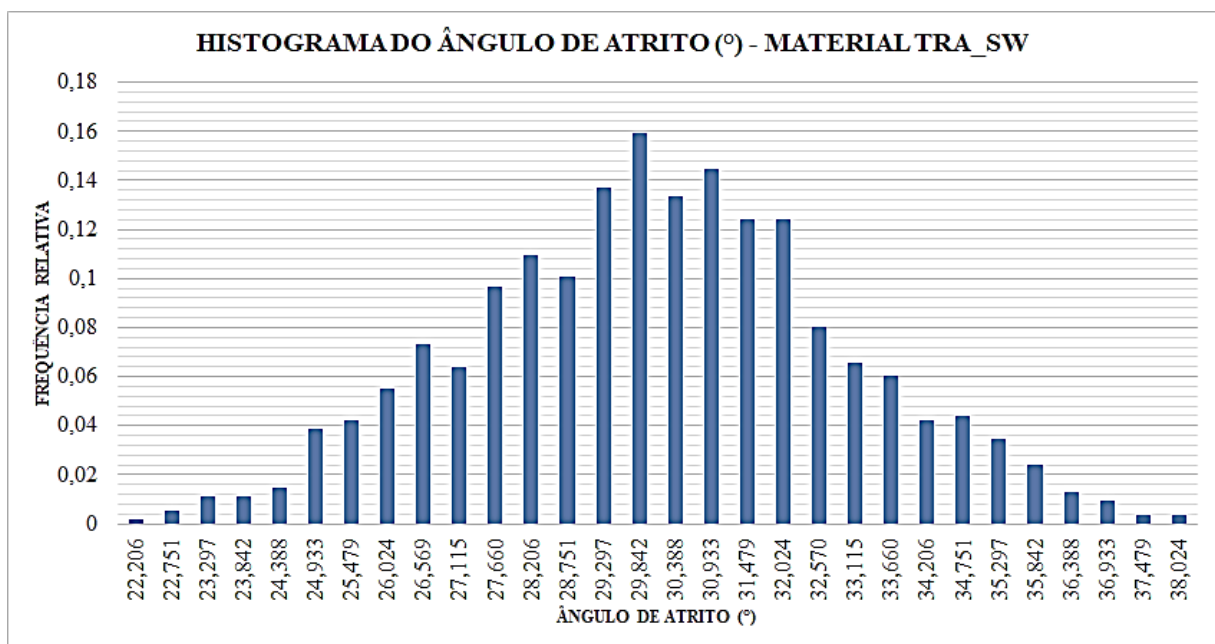
**FIGURA A.2.9** – Distribuição de frequência do ângulo de atrito: material F1\_A.ALUV\_SP



**FIGURA A.2.11 – Distribuição de frequência do específico: material TRA\_SW**

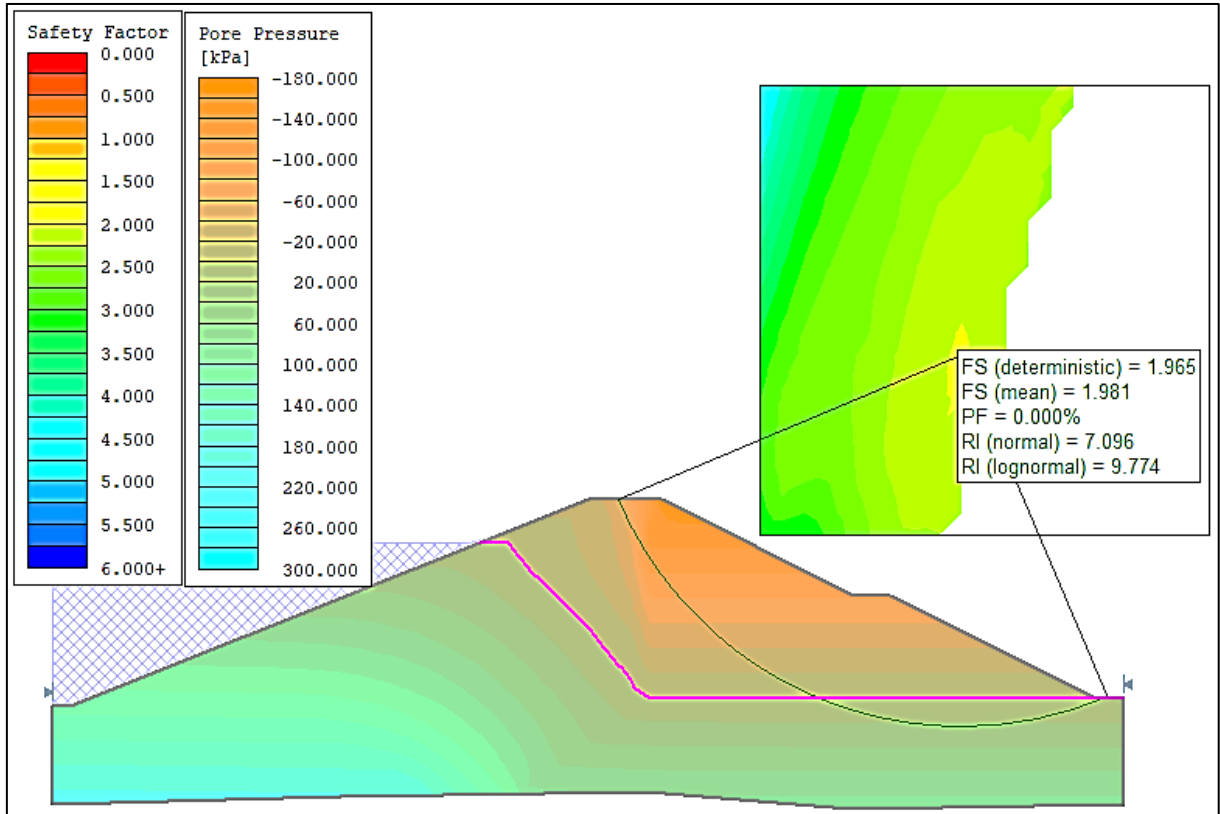


**FIGURA A.2.12 – Distribuição de frequência do ângulo de atrito: material TRA\_SW**

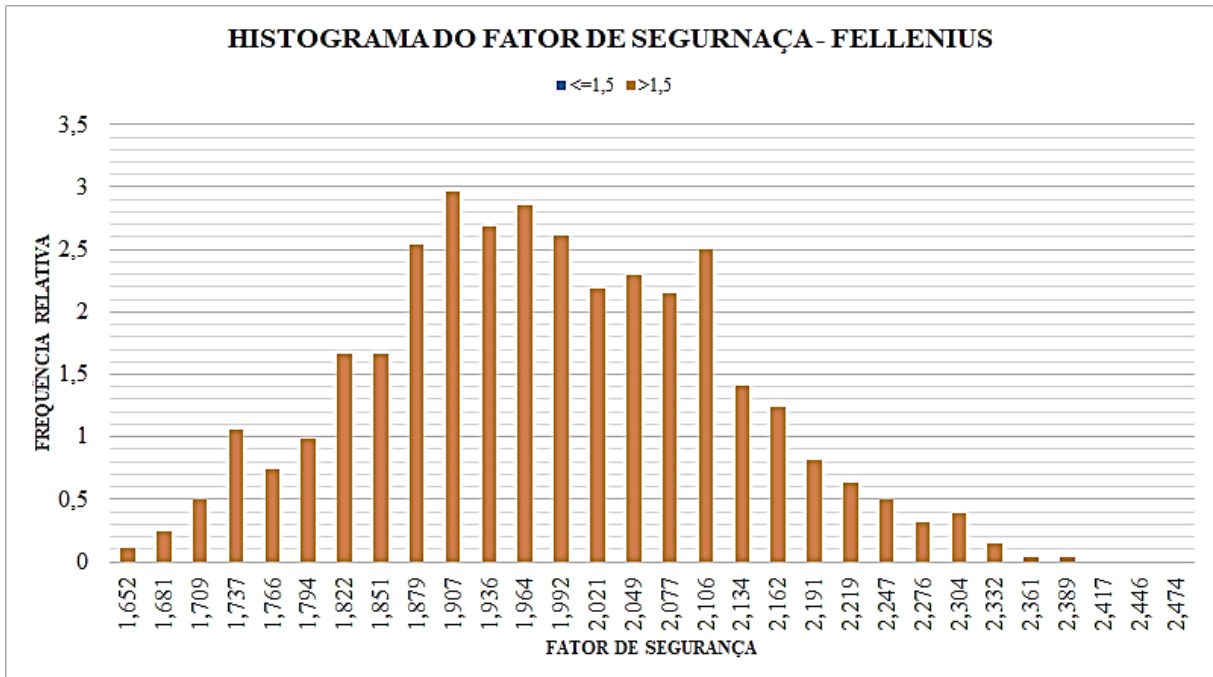


### A.3. RESERVATÓRIO CHEIO: SUPERFÍCIES DE RUPTURA E HISTOGRAMAS DE FATOR DE SEGURANÇA

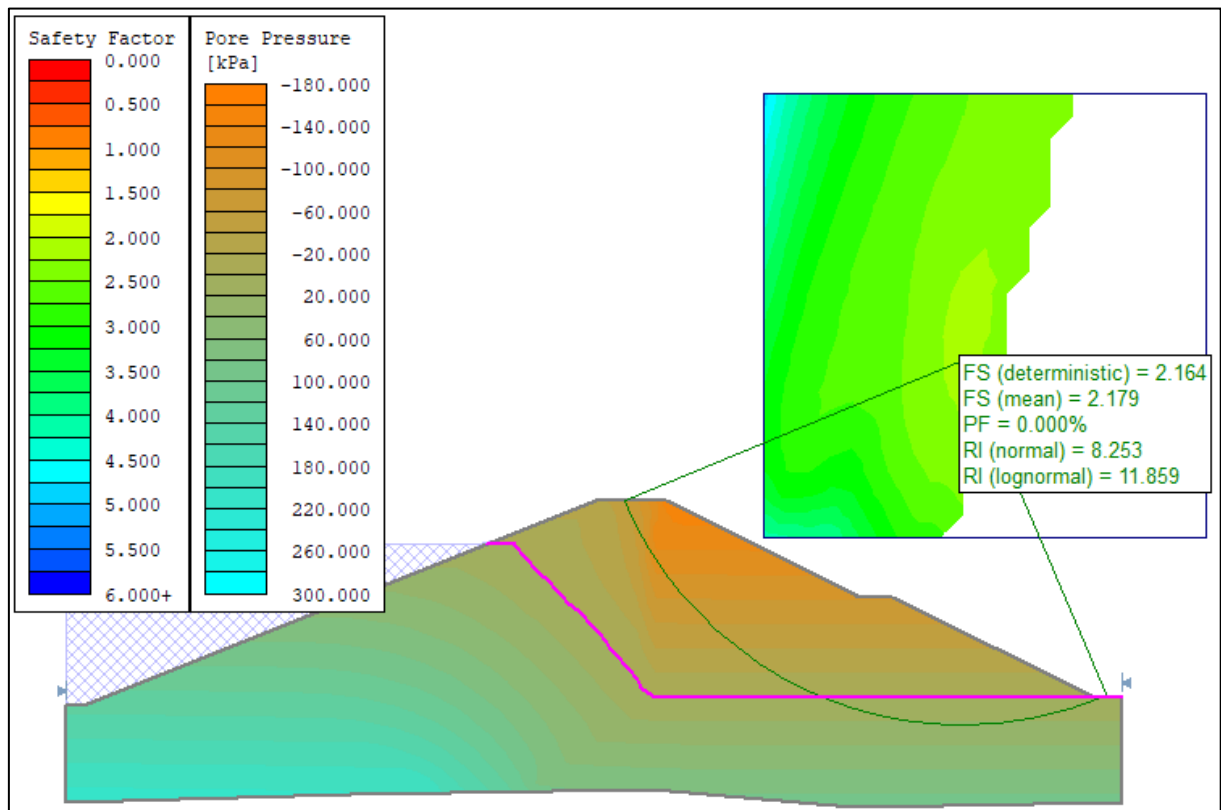
**FIGURA A.3.1** – Barragem Faé: superfície de ruptura para o Método de Fellenius (reservatório cheio)



**FIGURA A.3.2 – Barragem Faé: histograma do Fator de Segurança para o Método de Fellenius (reservatório cheio)**

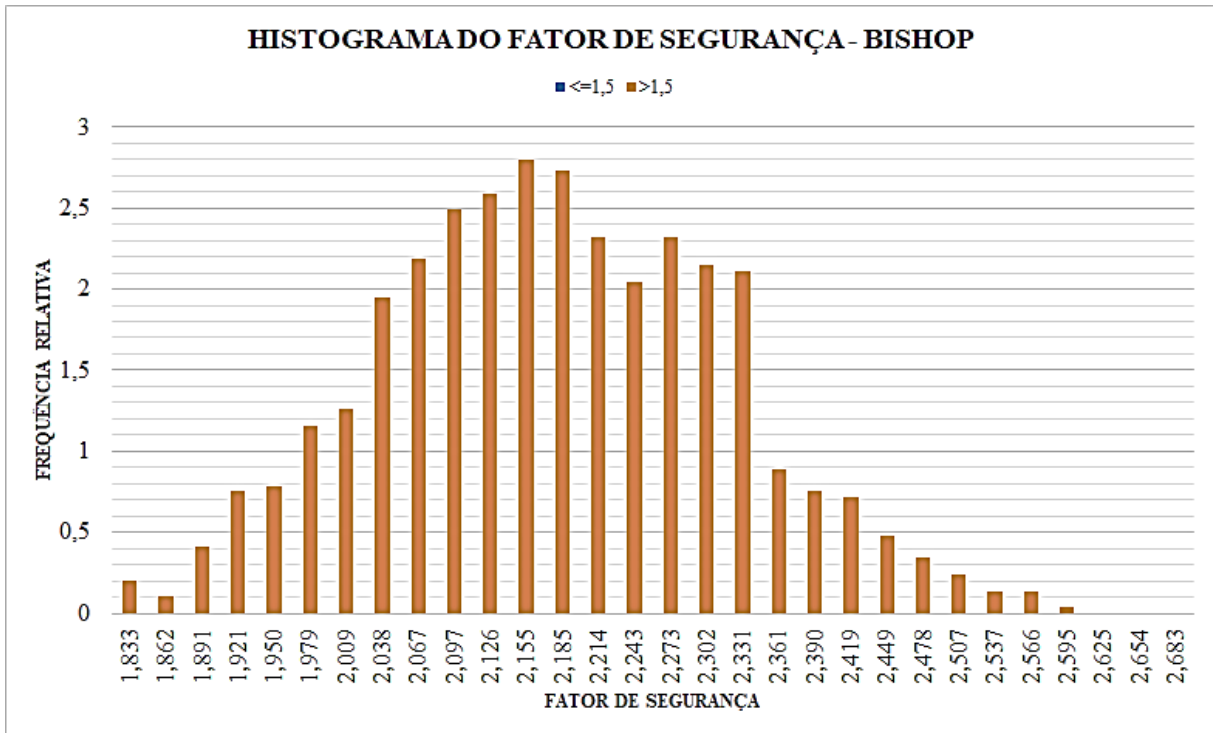


**FIGURA A.3.3 – Barragem Faé: superfície de ruptura para o Método de Bishop Simplificado (reservatório cheio)**

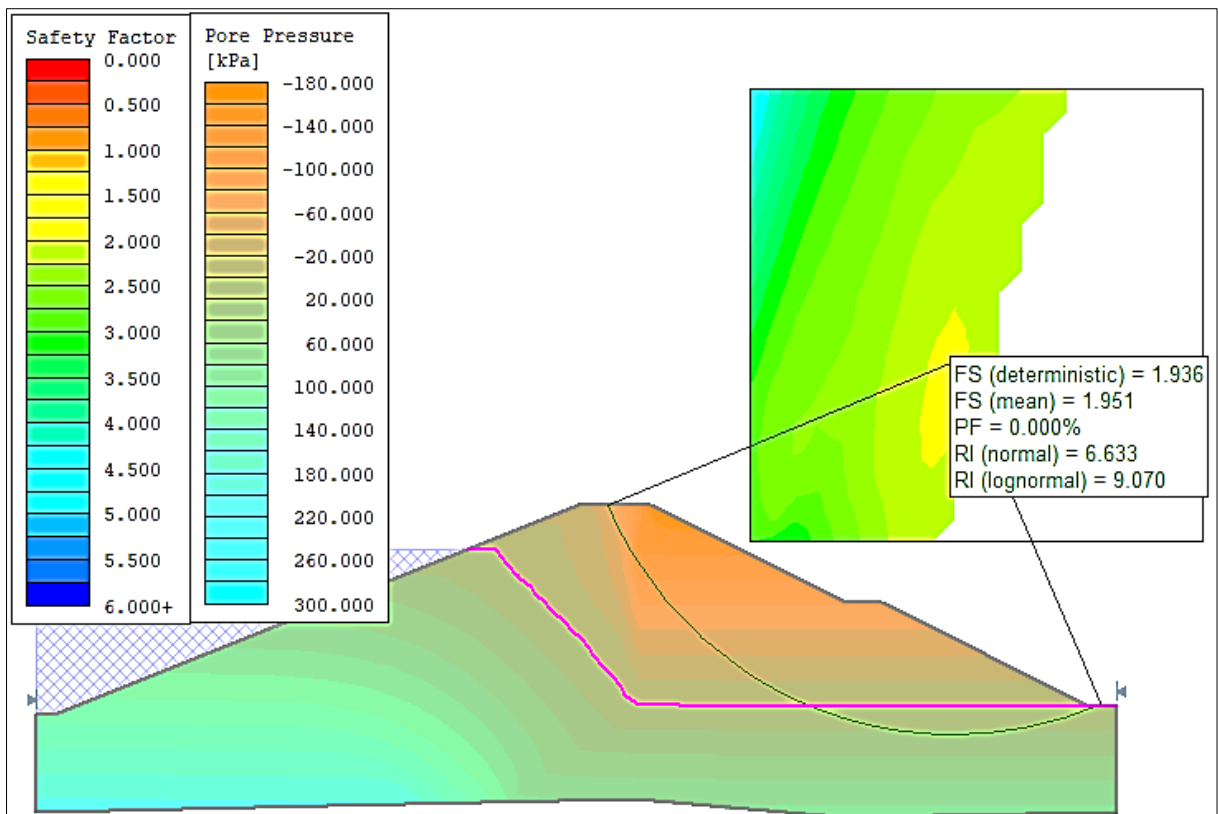




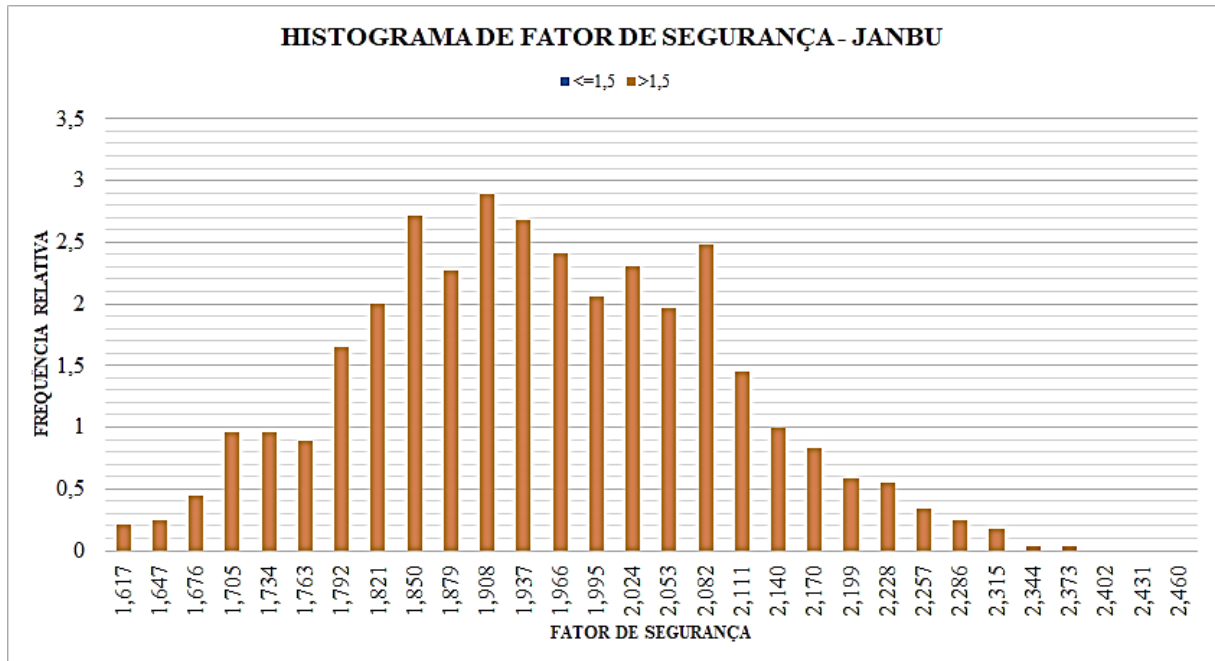
**FIGURA A.3.4 – Barragem Faé: histograma do Fator de Segurança para o Método de Bishop Simplificado (reservatório cheio)**



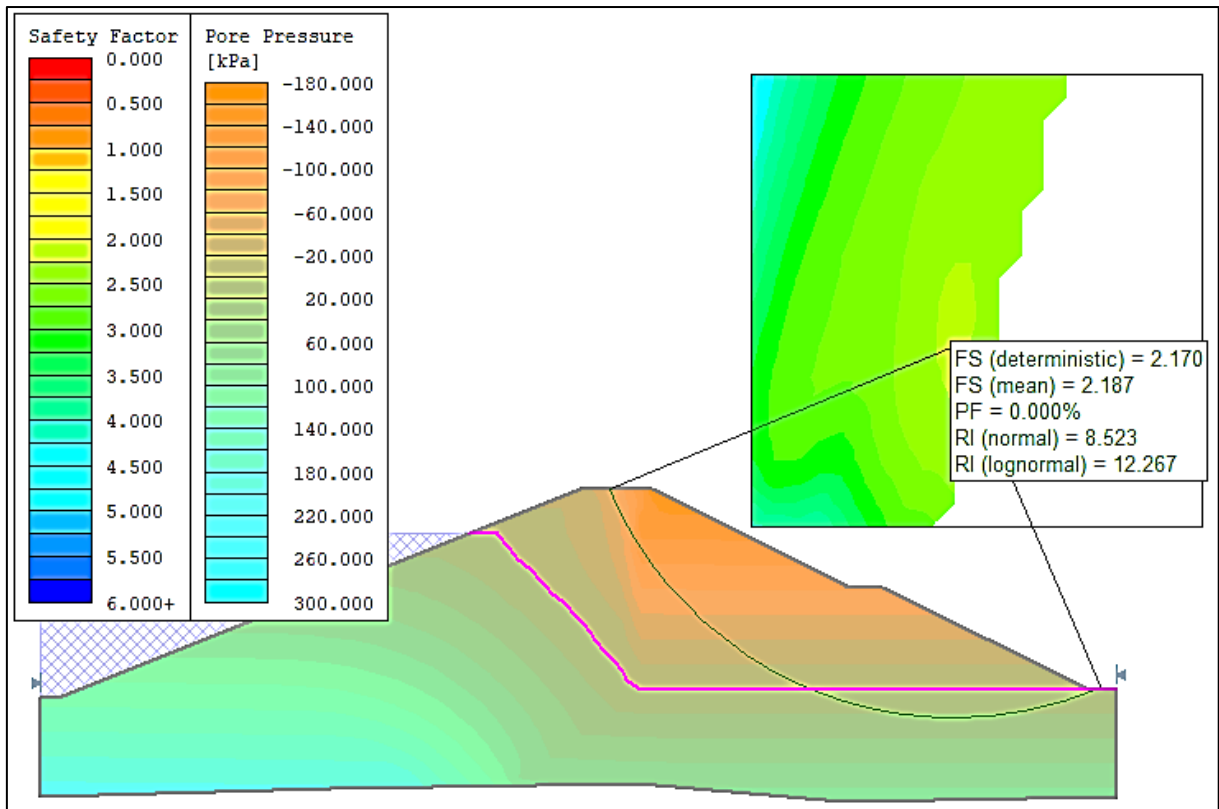
**FIGURA A.3.5 – Barragem Faé: superfície de ruptura para o Método de Janbu (reservatório cheio)**



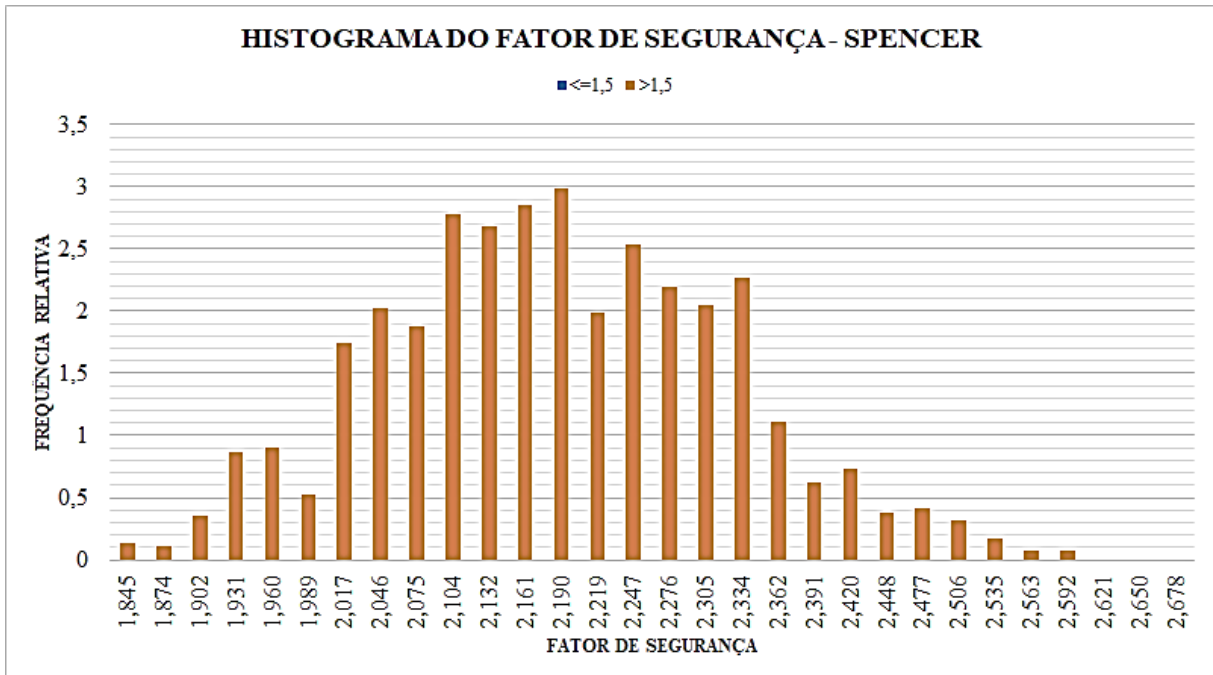
**FIGURA A.3.6** – Barragem Faé: histograma do Fator de Segurança para o Método de Janbu (reservatório cheio)



**FIGURA A.3.7** – Barragem Faé: superfície de ruptura para o Método de Spencer: (reservatório cheio)

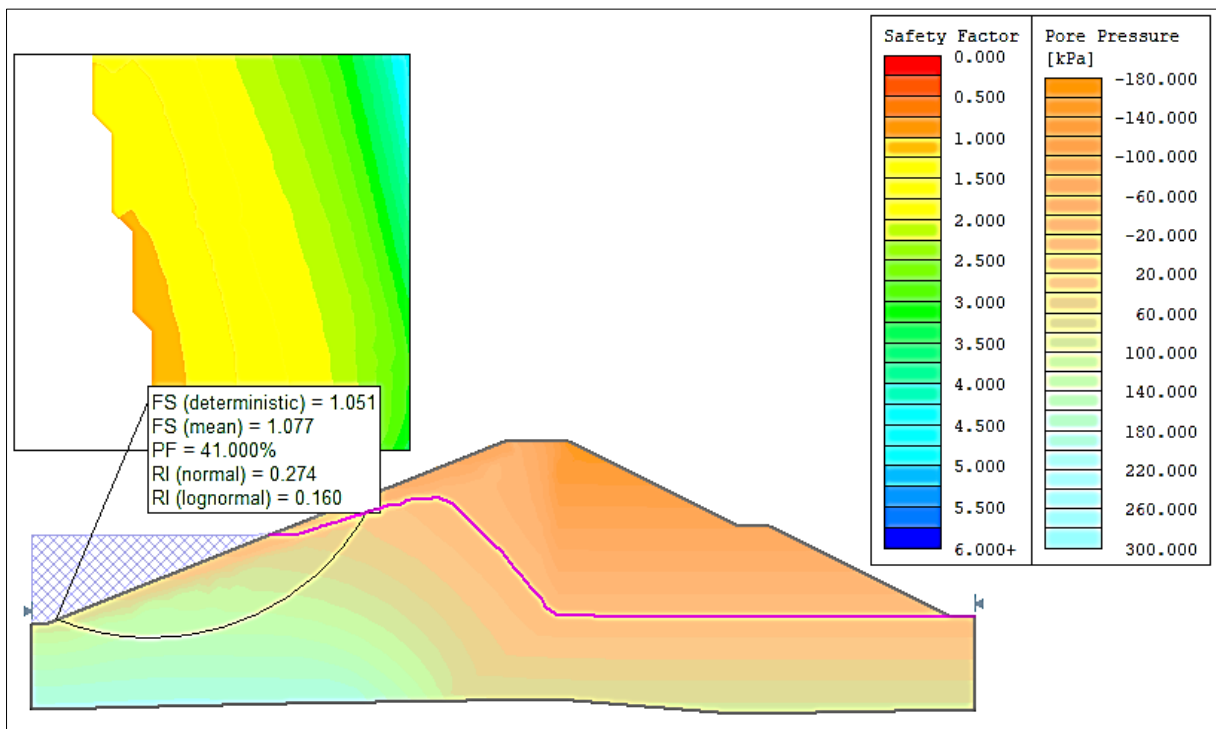


**FIGURA A.3.7 – Barragem Faé: histograma do Fator de Segurança para o Método de Spencer: (reservatório cheio)**

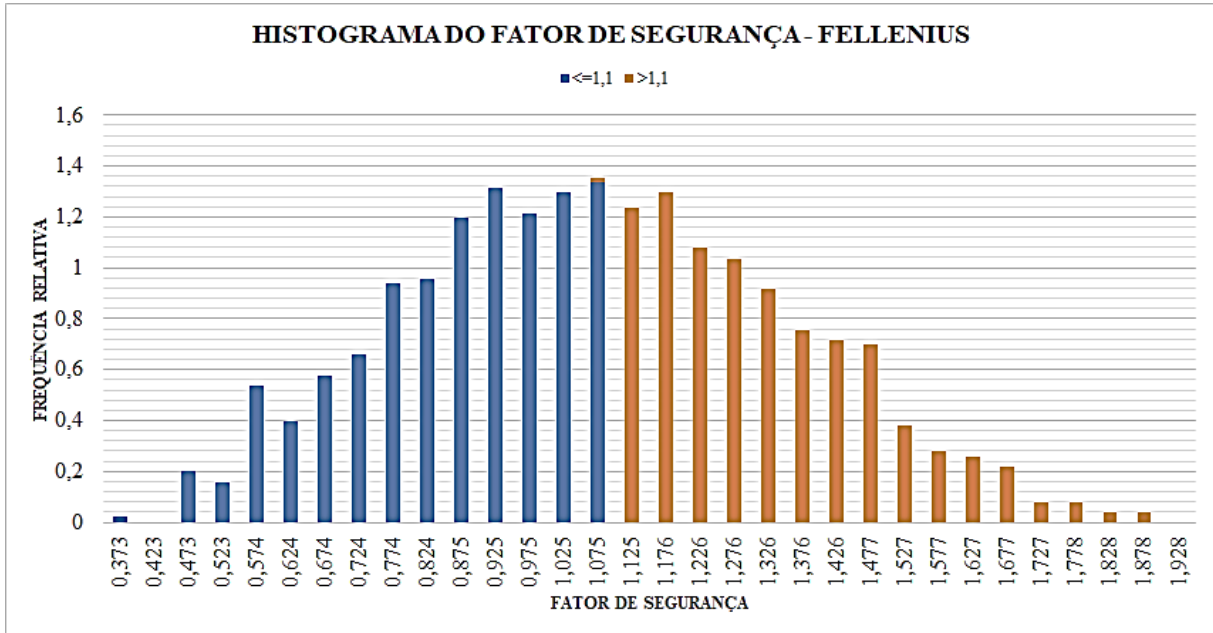


**A.4. REBAIXAMENTO RÁPIDO: SUPERFÍCIES DE RUPTURA E HISTOGRAMAS DE FATOR DE SEGURANÇA**

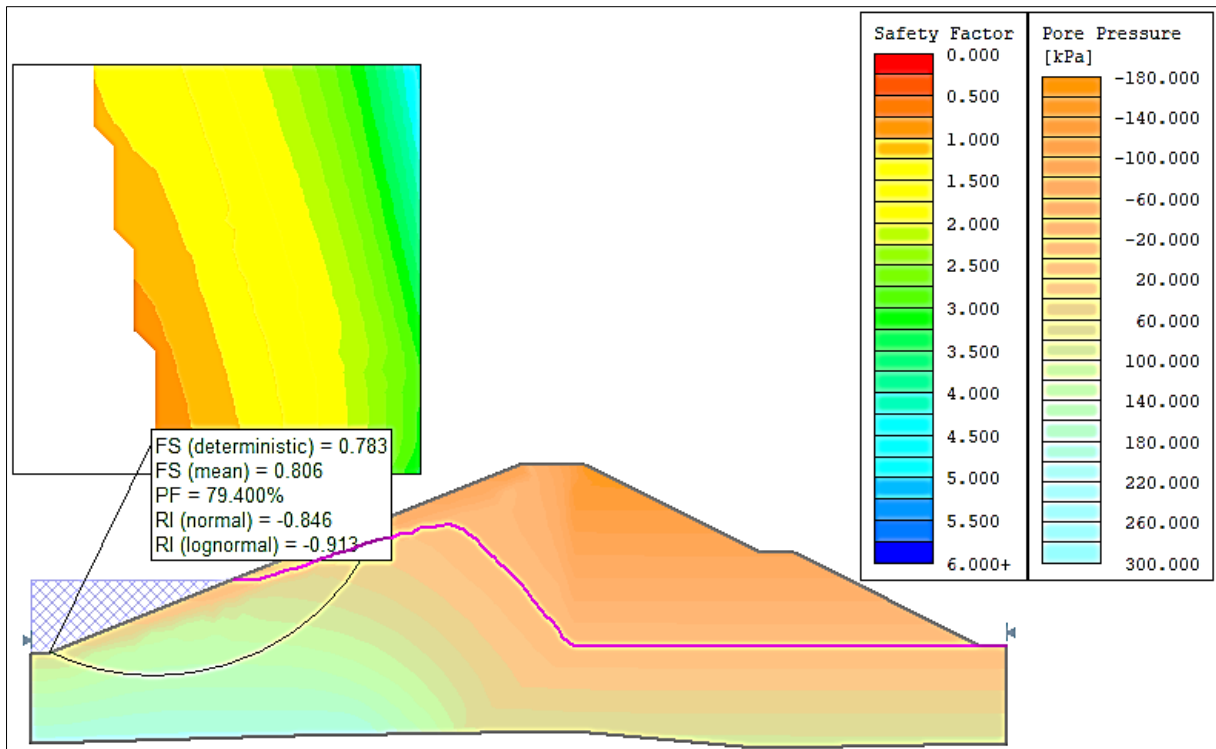
**FIGURA A.4.1 – Barragem Faé: superfície de ruptura para o Método de Fellenius (rebaixamento rápido, dia 35)**



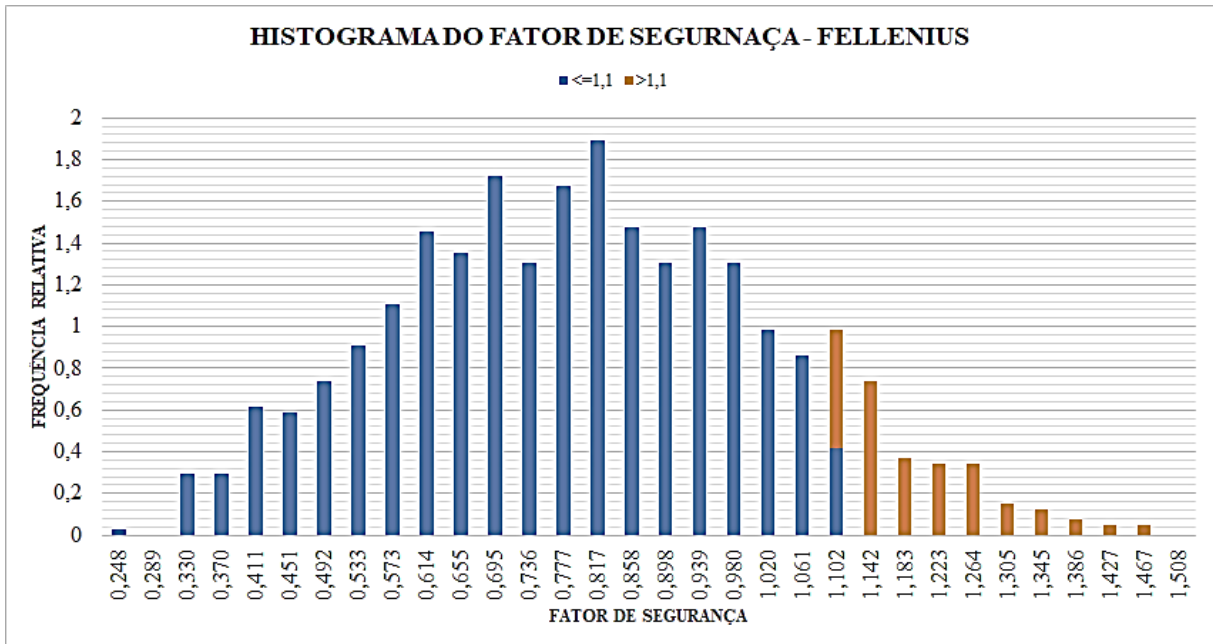
**FIGURA A.4.2 – Barragem Faé: histograma do Fator de Segurança para o Método de Fellenius (rebaixamento rápido, dia 35)**



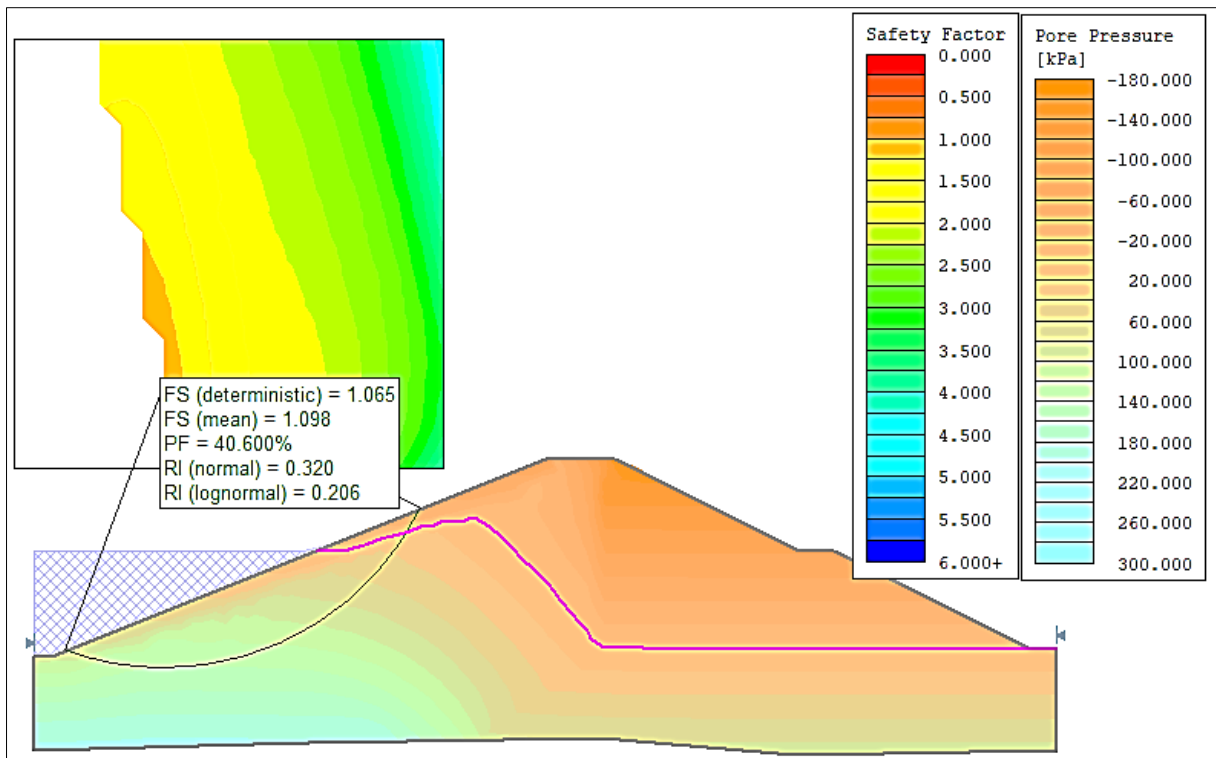
**FIGURA A.4.3 – Barragem Faé: superfície de ruptura para o Método de Fellenius (rebaixamento rápido, PF=79,40%)**



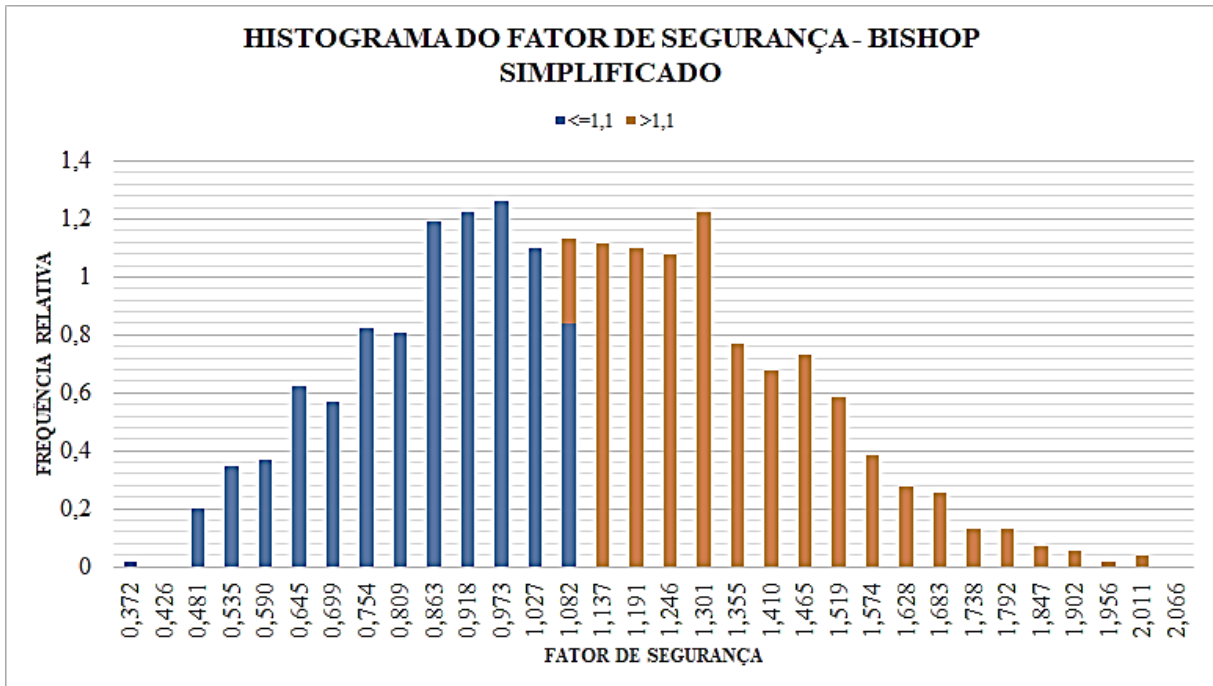
**FIGURA A.4.4 – Barragem Faé: histograma do Fator de Segurança para o Método de Fellenius (rebaixamento rápido, PF=79,40%)**



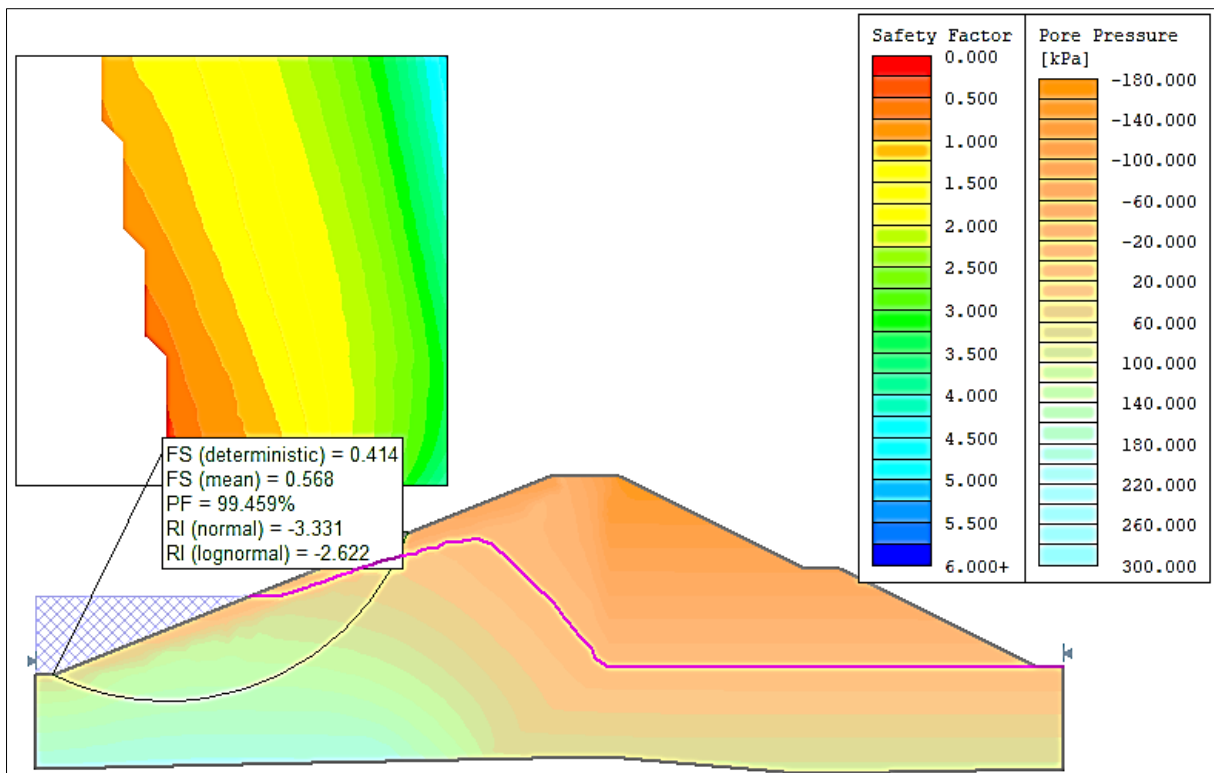
**FIGURA A.4.5 – Barragem Faé: superfície de ruptura para o Método de Bishop Simplificado (rebaixamento rápido, dia 29)**



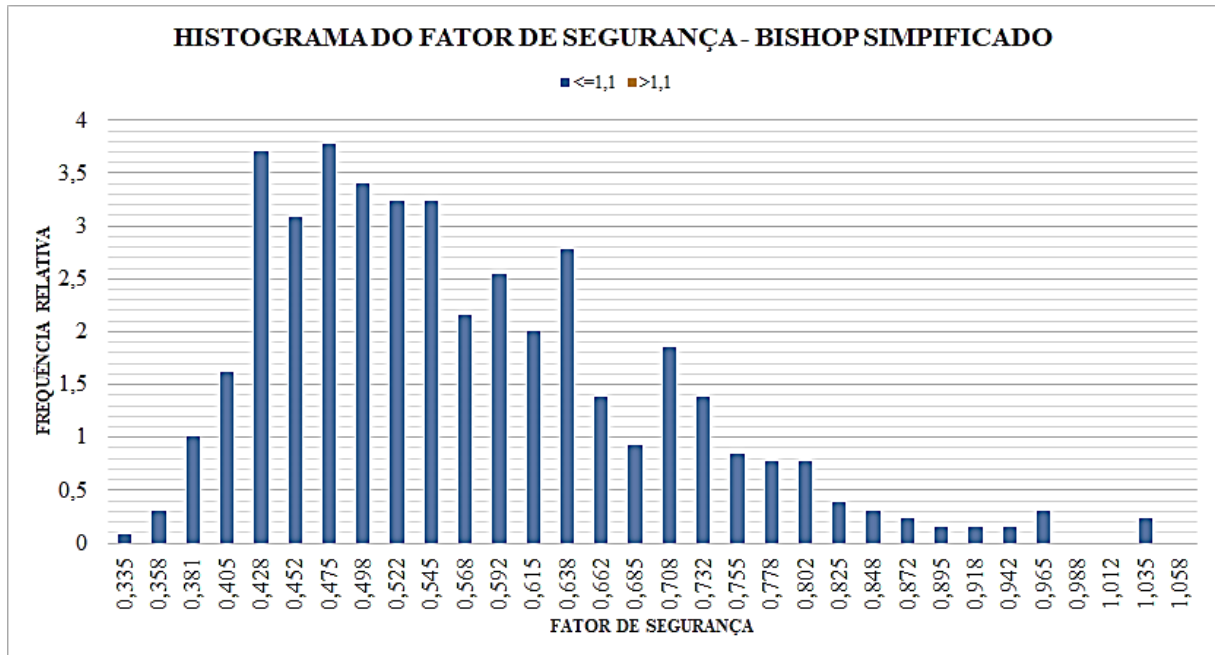
**FIGURA A.4.6** – Barragem Faé: histograma do Fator de Segurança para o Método de Bishop Simplificado (rebaixamento rápido, dia 29)



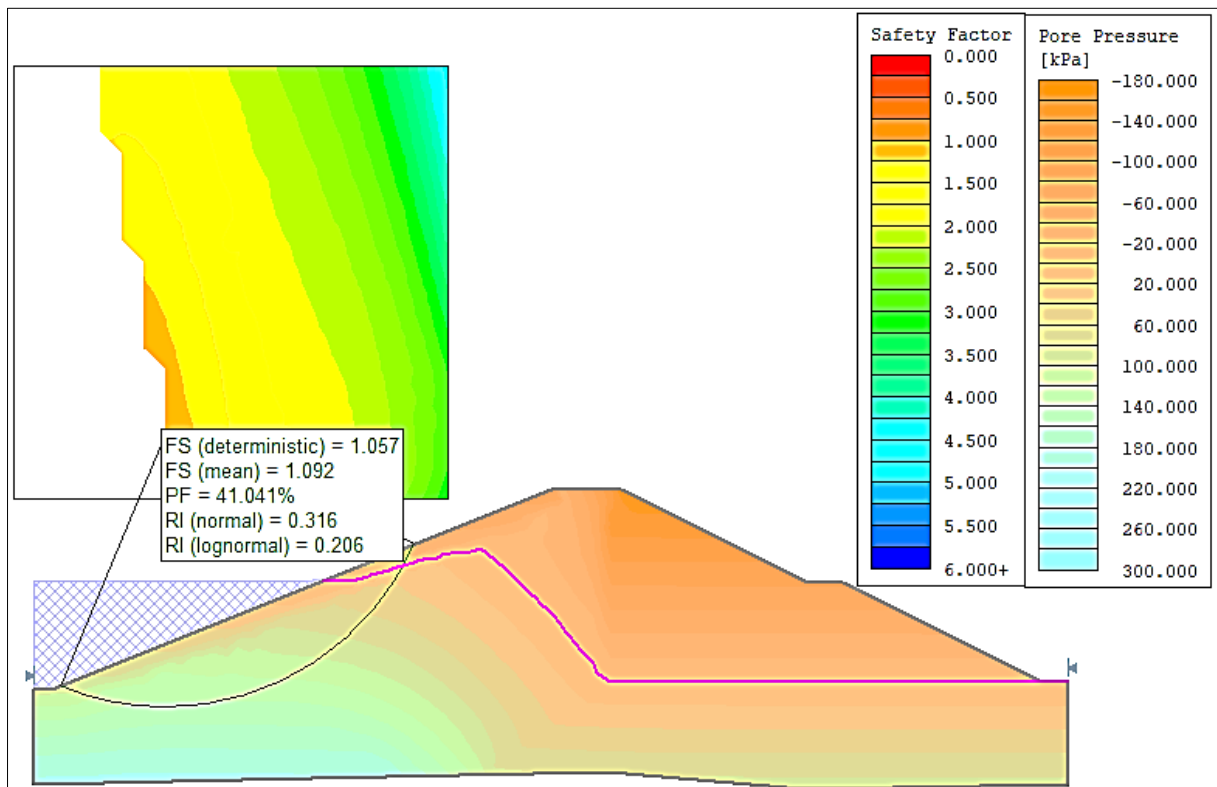
**FIGURA A.4.7** – Barragem Faé: superfície de ruptura para o Método de Bishop Simplificado (rebaixamento rápido, PF=99,459%)



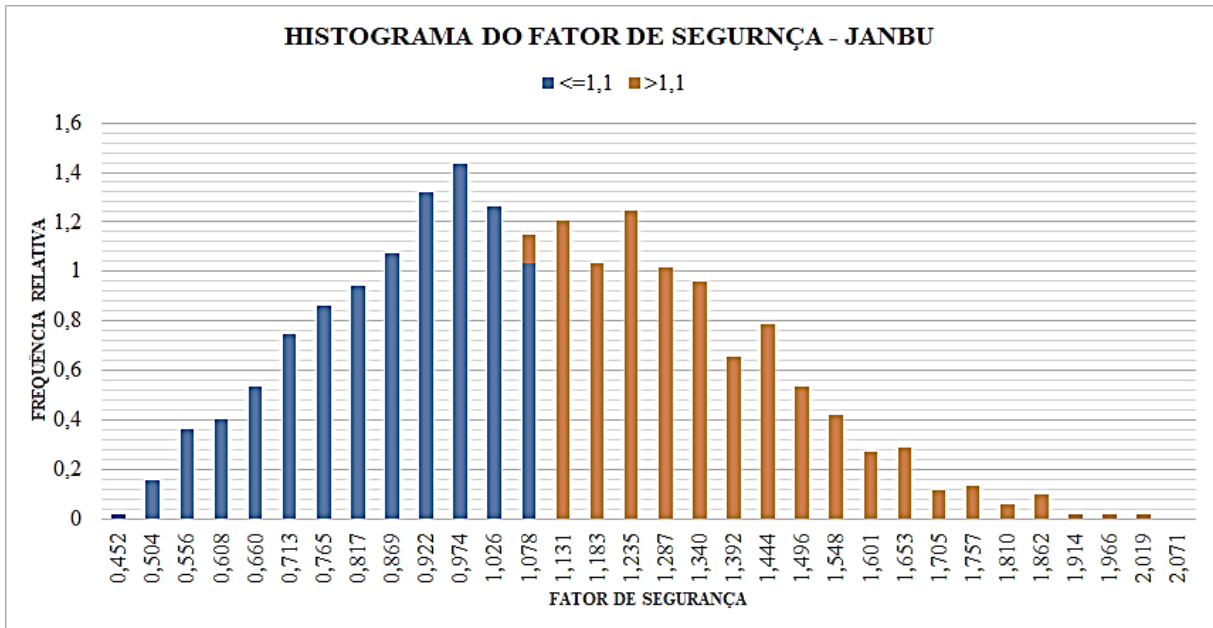
**FIGURA A.4.8** – Barragem Faé: histograma do fator de segurança para o Método de Bishop Simplificado (rebaixamento rápido, PF=99,459%)



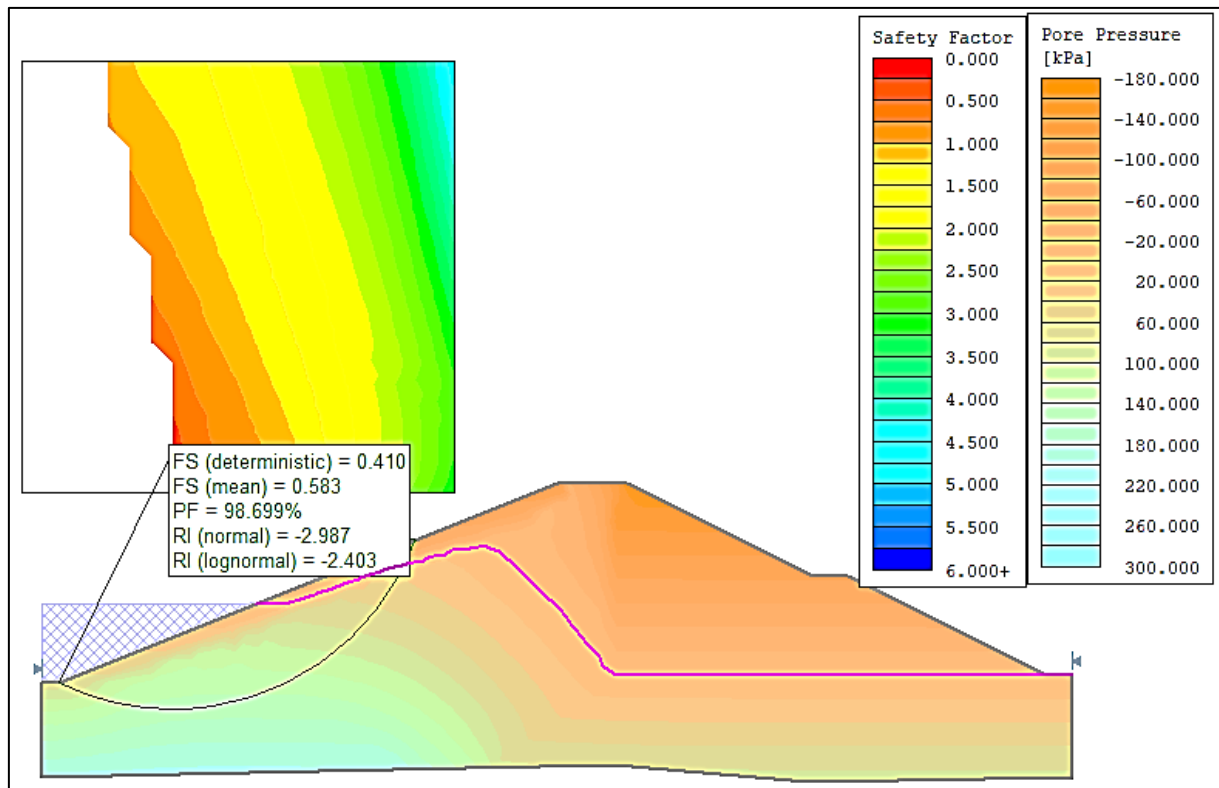
**FIGURA A.4.9** – Barragem Faé: superfície de ruptura para o Método de Janbu (rebaixamento rápido, dia 28)



**FIGURA A.4.10 – Barragem Faé: histograma do Fator de Segurança para o Método de Janbu (rebaixamento rápido, dia 28)**

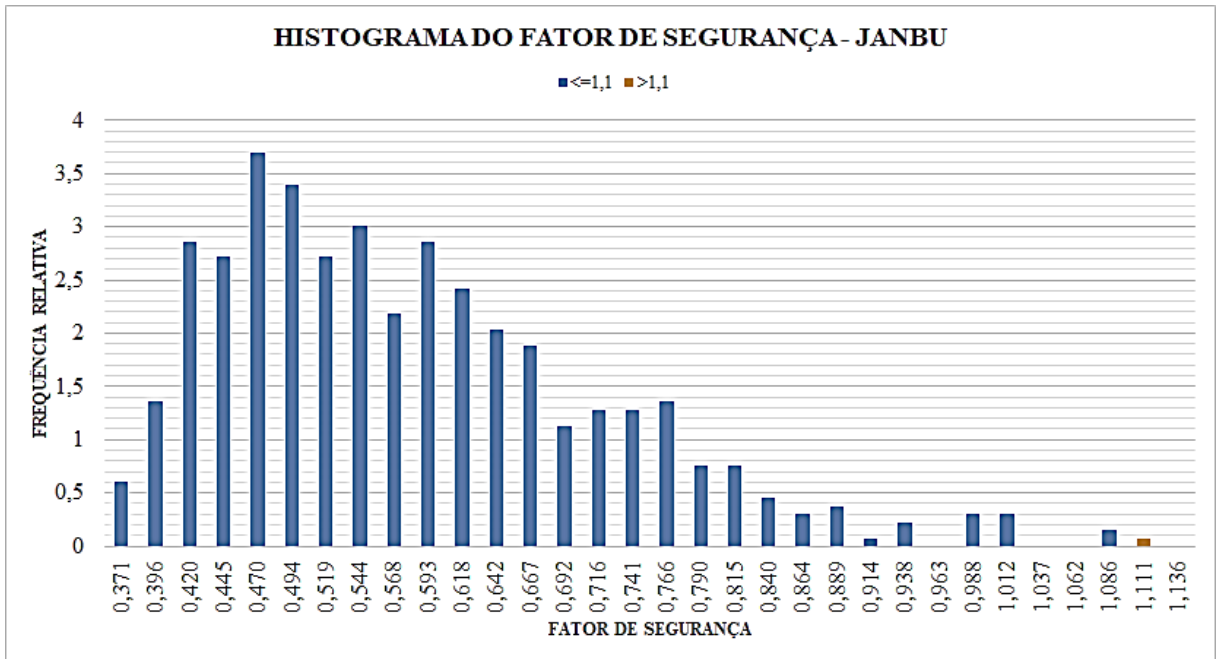


**FIGURA A.4.11 – Barragem Faé: superfície de ruptura para o Método de Janbu (rebaixamento rápido, PF=98,699%)**

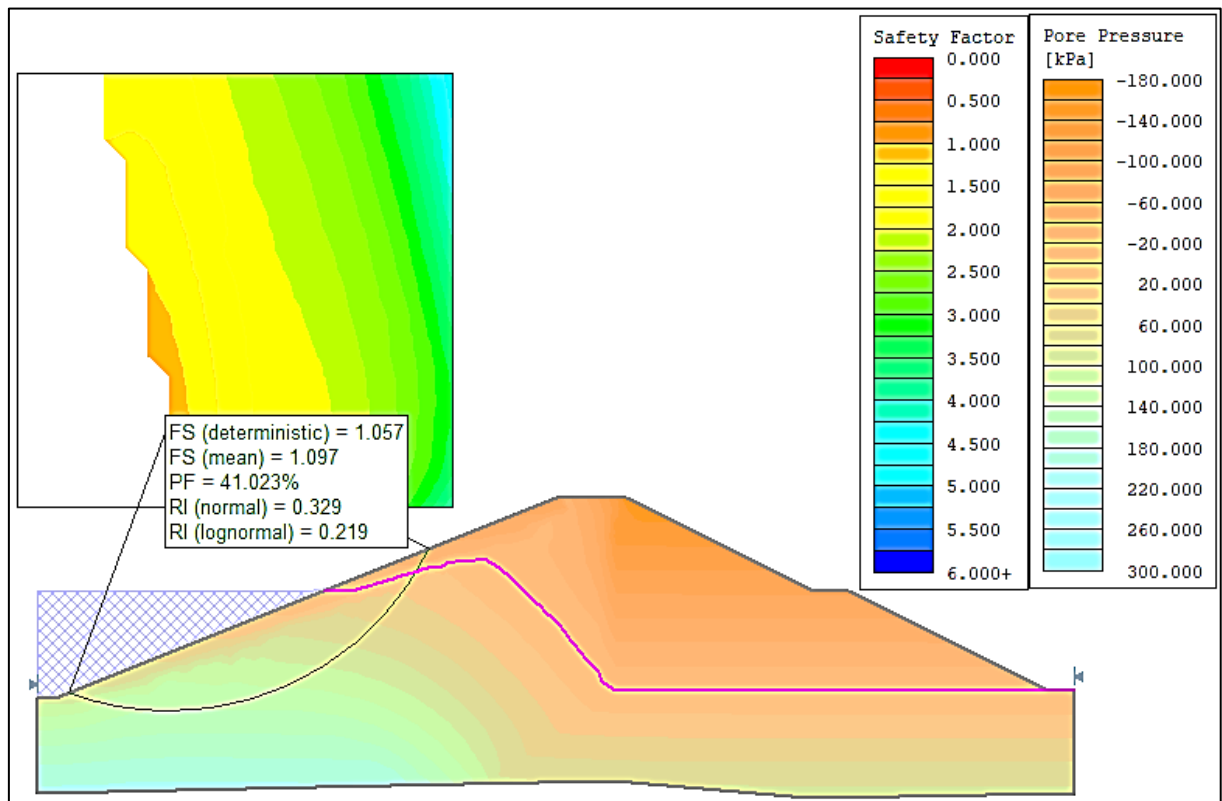




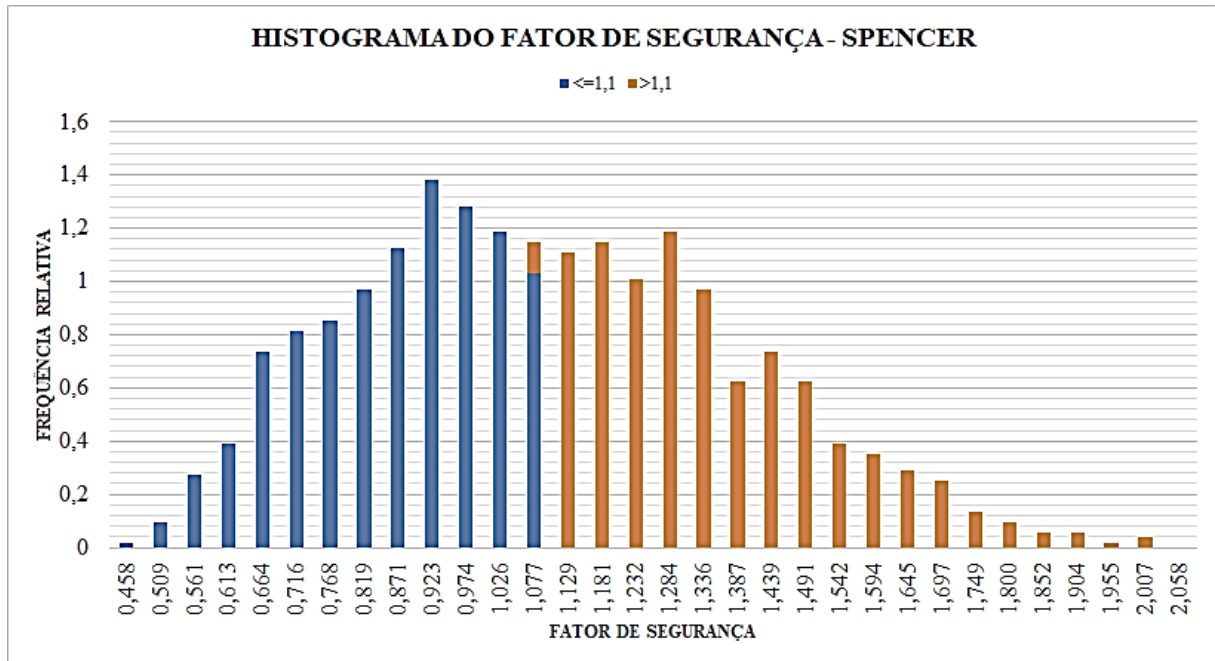
**FIGURA A.4.12 – Barragem Faé: histograma do Fator de Segurança para o Método de Janbu (rebaixamento rápido, PF=98,699%)**



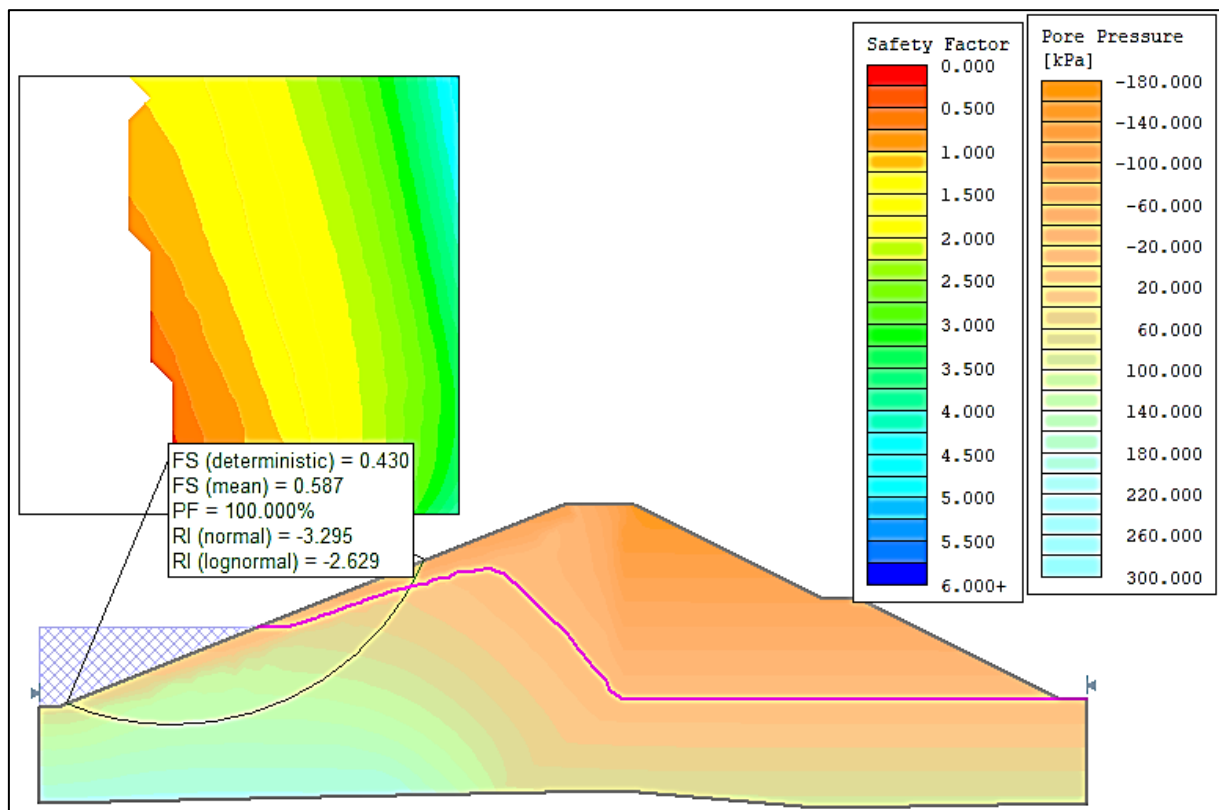
**FIGURA A.4.13 – Barragem Faé: superfície de ruptura para o Método de Spencer (rebaixamento rápido, dia 29)**



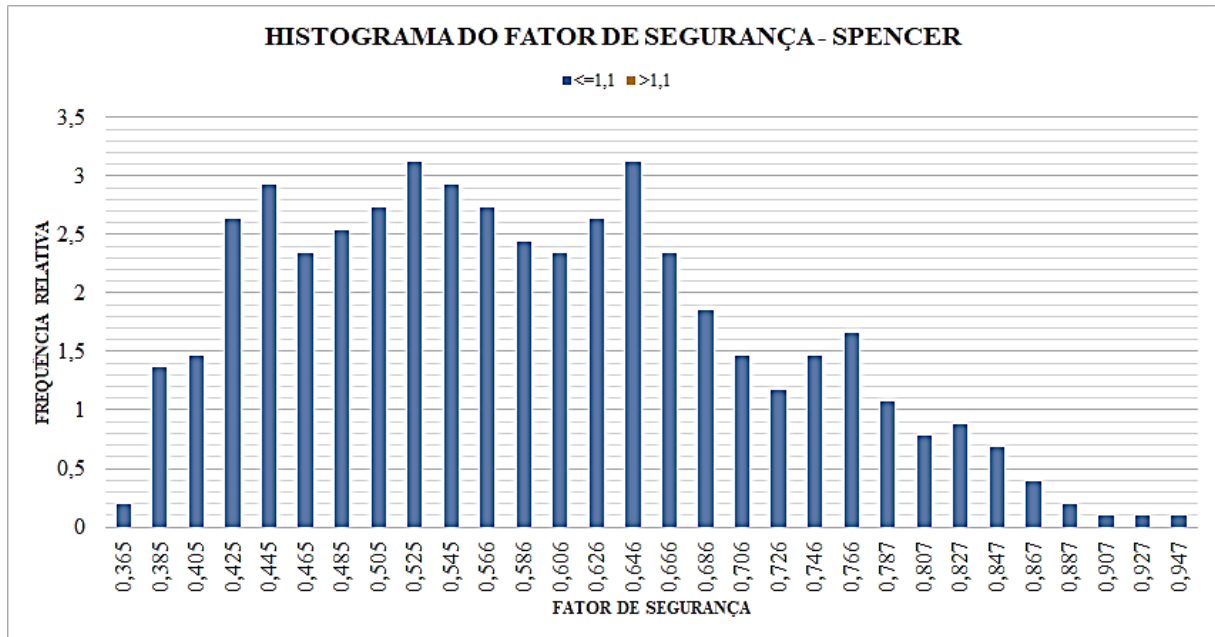
**FIGURA A.4.14** – Barragem Faé: histograma do Fator de Segurança para o Método de Spencer (rebaixamento rápido, dia 29)



**FIGURA A.4.15** – Barragem Faé: superfície de ruptura para o Método de Spencer (rebaixamento rápido, PF=100%)



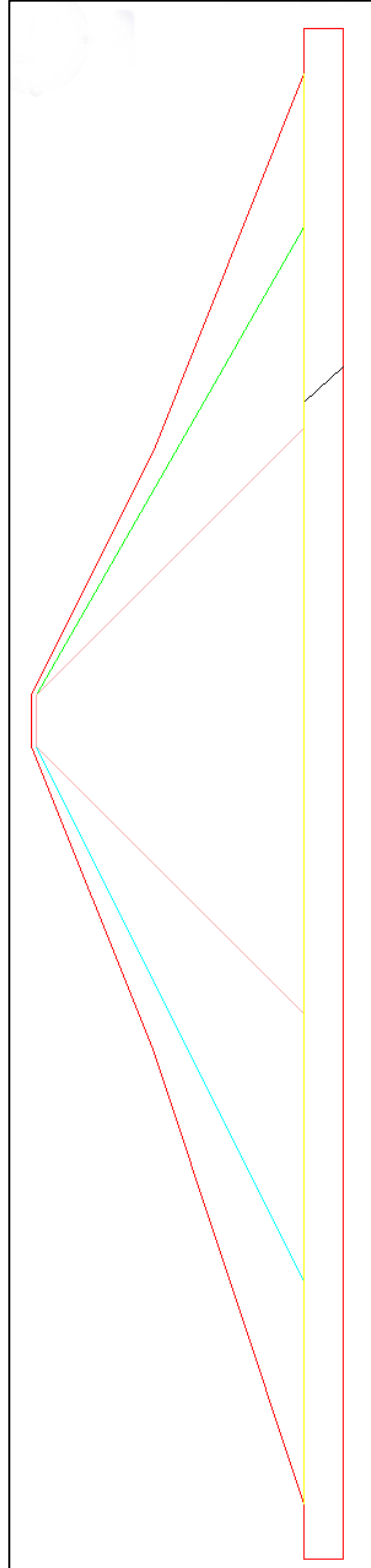
**FIGURA A.4.16** – Barragem Faé: histograma do Fator de Segurança para o Método de Spencer (rebaixamento rápido, PF=100%)



## APÊNDICE B – BARRAGEM ORÓS

### B.1. MODELAGEM E MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO

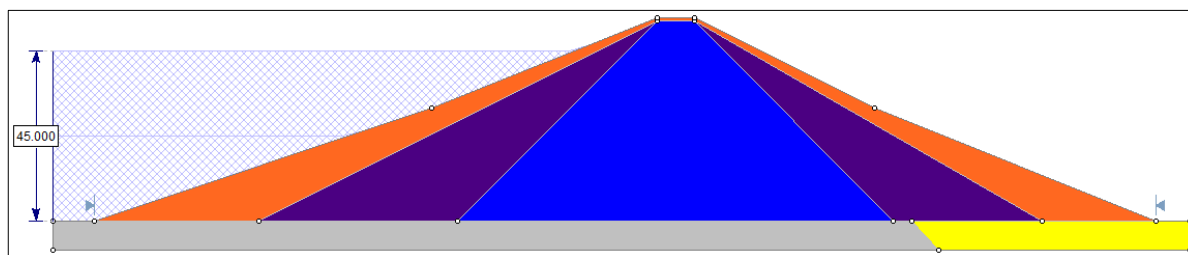
**FIGURA B.1.1** – Geometria da Barragem Orós no AutoCAD



**TABELA B.1.1** – Coordenadas dos vértices das polilinhas da geometria da Barragem Óros no AutoCAD

VÉRT.	EXTERNO		INTERNO 01		INTERNO 02		INTERNO 03		INTERNO 04		INTERNO 05	
	x	y	x	y	x	y	x	y	x	y	x	y
1	-10.8226	-7.7004	97	0	44	0	160	53	0	0	225.071	-7.7004
2	-10.8226	0	150	53	150	53	252.75	0	283	0	218	0
3	0	0	160	53	AS CORES LIGAM O CONJUNTO DE CORRDENADAS AO ELEMENTO NA FIGURA C.1.1							
4	90	30	213	0								
5	150	54										
6	160	54										
7	208	30										
8	283	0										
9	292.094	0										
10	292.094	-7.7004										
11	-10.8226	-7.7004										

**FIGURA B.1.2** – Geometria da Barragem Óros no Slide 6.0



**TABELA B.1.2** – Materiais e suas propriedades, valores médios, inseridas no Slide 6.0

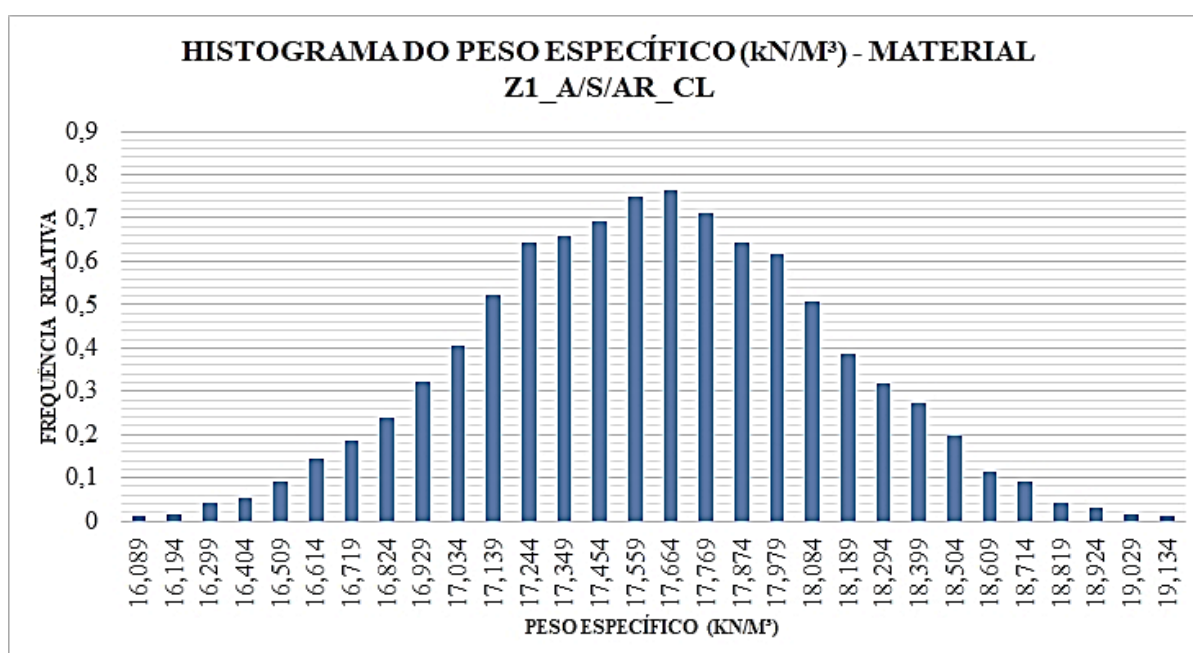
Material Name	Color	Unit Weight (kN/m <sup>3</sup> )	Strength Type	Cohesion (kN/m <sup>2</sup> )	Phi	KS (m/s)	Soil Type
Z1_A/S/AR_CL	■	17.603	Mohr-Coulomb	86.229	30.964	8e-010	Clay
Z2_A/P_SW	■	18.6	Mohr-Coulomb	0	33.024	1.5e-007	Sand
Z3_ENR_GW	■	18.6	Mohr-Coulomb	0	33.024	0.00027	General
F4_ROCHA	■	19	Mohr-Coulomb	500	45	1e-024	General
F5_A.DEP.SP	■	19.81	Mohr-Coulomb	22.55	27	1.5e-007	Sand

TABELA B.1.3 – Propriedades geotécnicas, valores médios e desvio padrão, no Slide 6.0

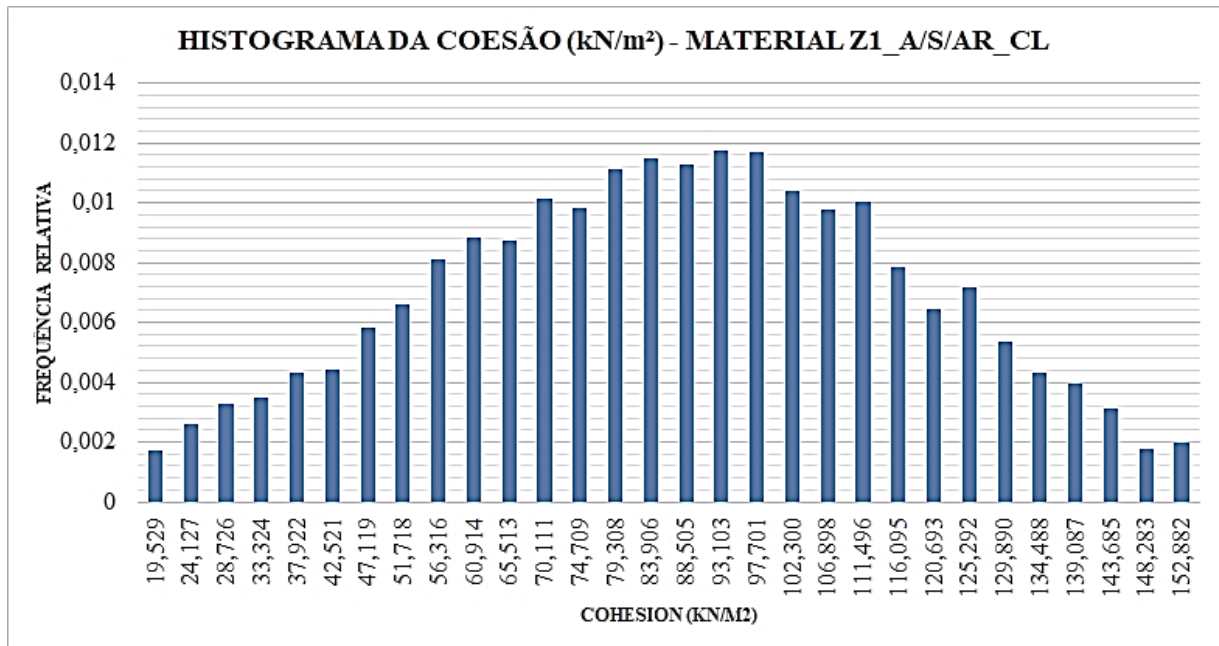
Material Name	Property	Distribution	Mean	Std. Dev.	Rel. Min	Rel. Max
Z1_A/S/AR_CL	Cohesion	Normal	86.229	34.52	69.04	103.56
Z1_A/S/AR_CL	Unit Weight	Normal	17.603	0.528	1.584	1.584
Z1_A/S/AR_CL	Phi	Normal	30.964	3.096	9.288	9.288
Z2_A/P_SW	Phi	Normal	33.024	3.302	9.906	9.906
Z2_A/P_SW	Unit Weight	Normal	18.6	0.558	1.674	1.674
Z2_A/P_SW	Cohesion	Normal	0	0	0	0
Z3_ENR_GW	Unit Weight	Normal	18.6	0.558	1.674	1.674
Z3_ENR_GW	Phi	Normal	33.024	3.302	9.906	9.906
Z3_ENR_GW	Cohesion	Normal	0	0	0	0
F4_ROCHA	Phi	Normal	45	4.5	13.5	13.5
F4_ROCHA	Cohesion	Normal	500	0	0	0
F4_ROCHA	Unit Weight	Normal	19	0.57	1.71	1.71
F5_A.DEP_SP	Unit Weight	Normal	19.81	0.594	1.782	1.782
F5_A.DEP_SP	Phi	Normal	27	2.7	8.1	8.1
F5_A.DEP_SP	Cohesion	Normal	22.55	9.022	18.004	27.066

## B.2. HISTOGRAMAS DAS PROPRIEDADES GEOTÉCNICAS DOS MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO

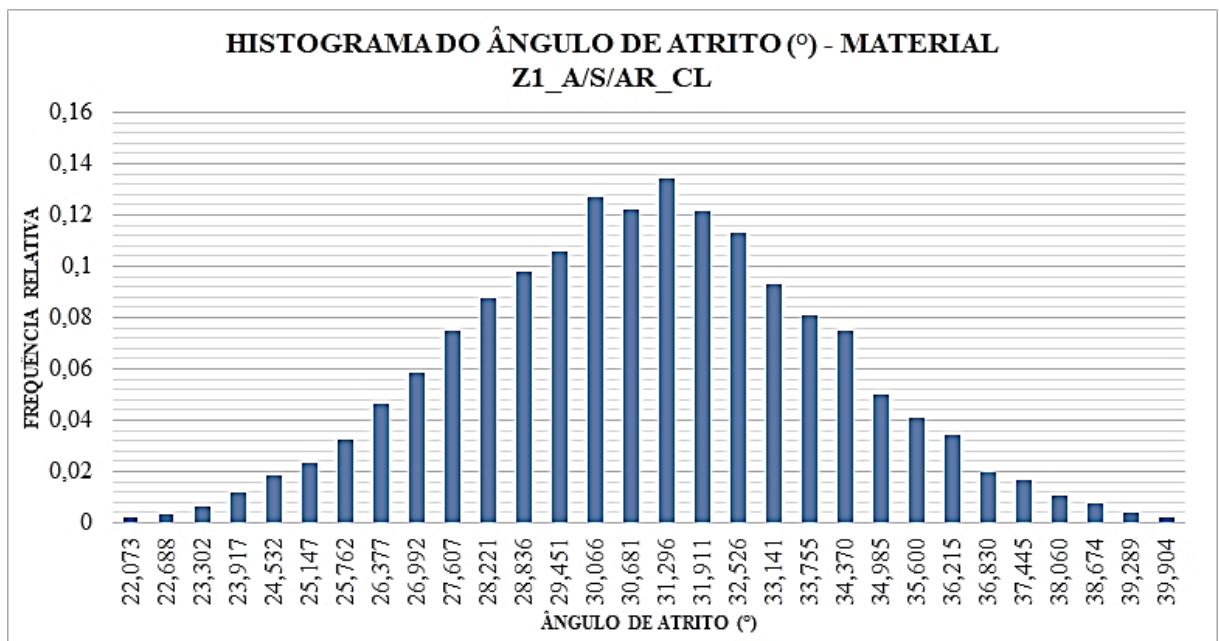
FIGURA B.2.1 – Distribuição de frequência do peso específico: material Z1\_A/S/AR\_CL



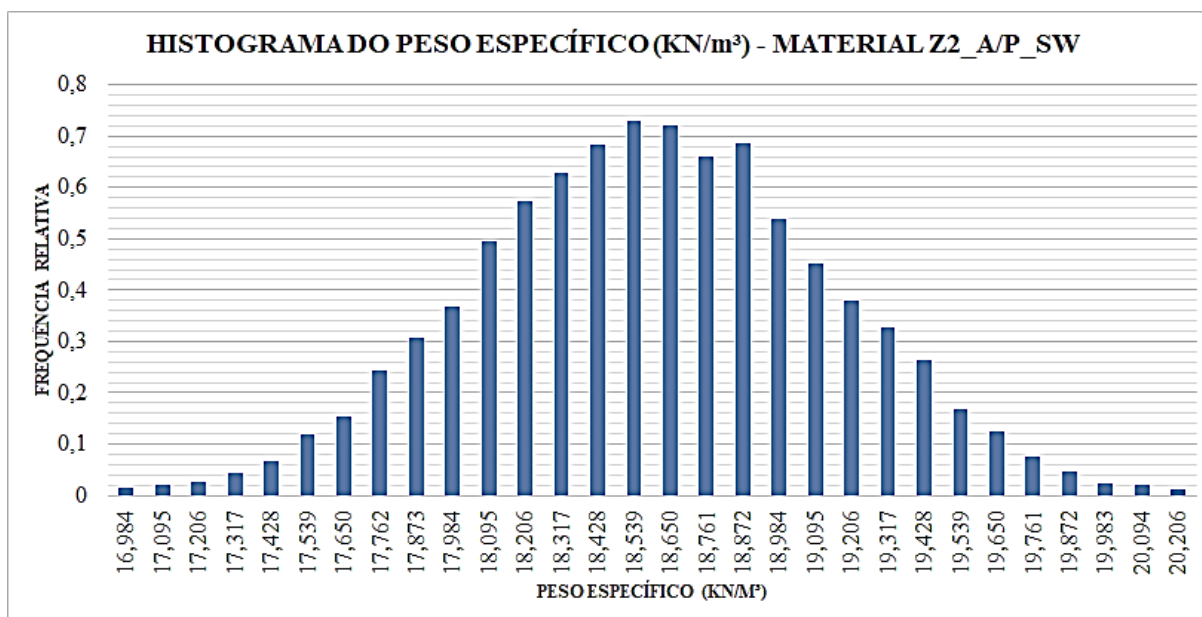
**FIGURA B.2.2 – Distribuição de frequência da coesão: material Z1\_A/S/AR\_CL**



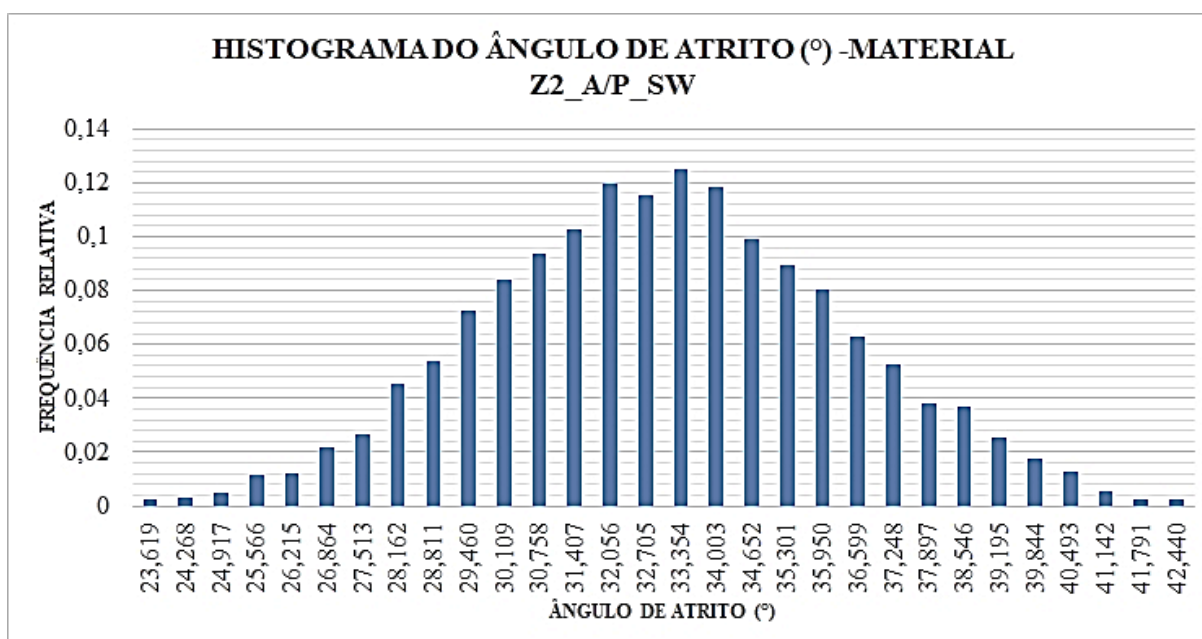
**FIGURA B.2.3 – Distribuição de frequência do ângulo de atrito: material Z1\_A/S/AR\_CL**



**FIGURA B.2.4 – Distribuição de frequência do peso específico: material Z2\_A/P\_SW**

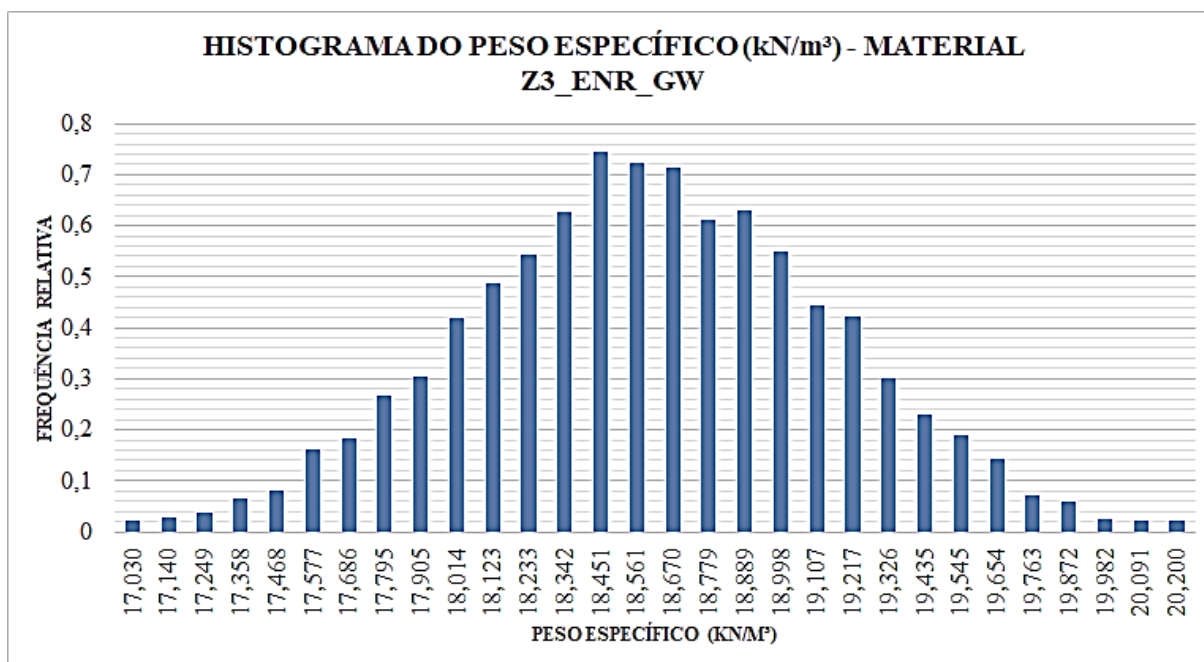


**FIGURA B.2.5 – Distribuição de frequência do ângulo de atrito: material Z2\_A/P\_SW**

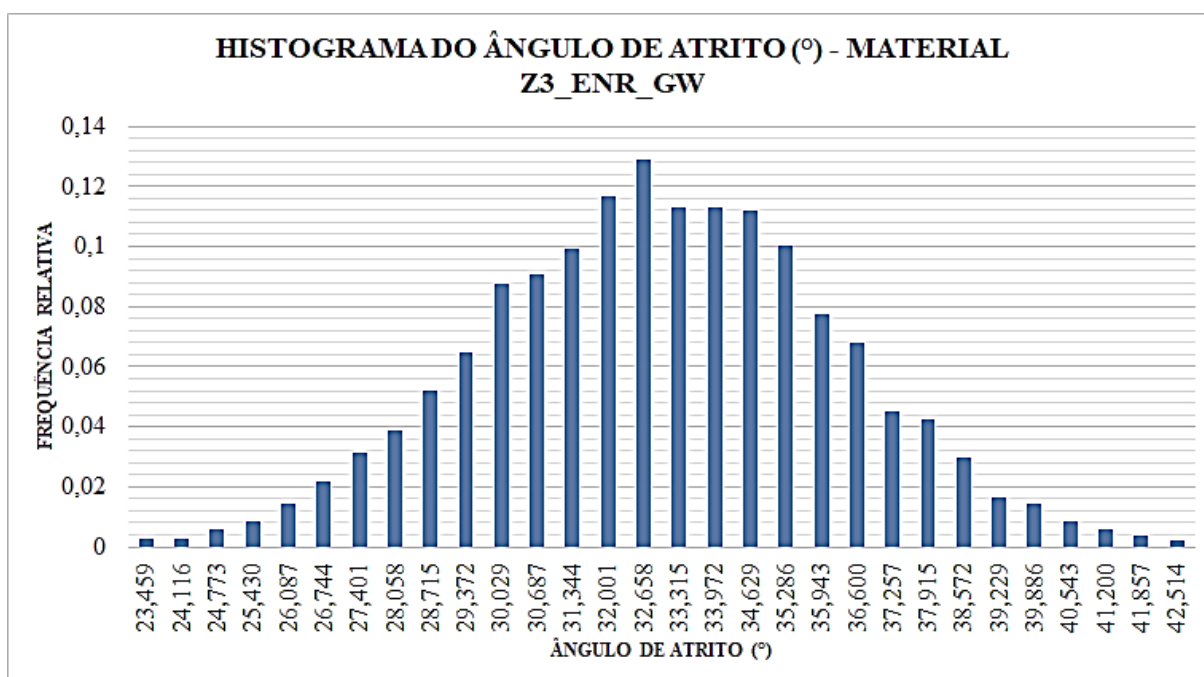




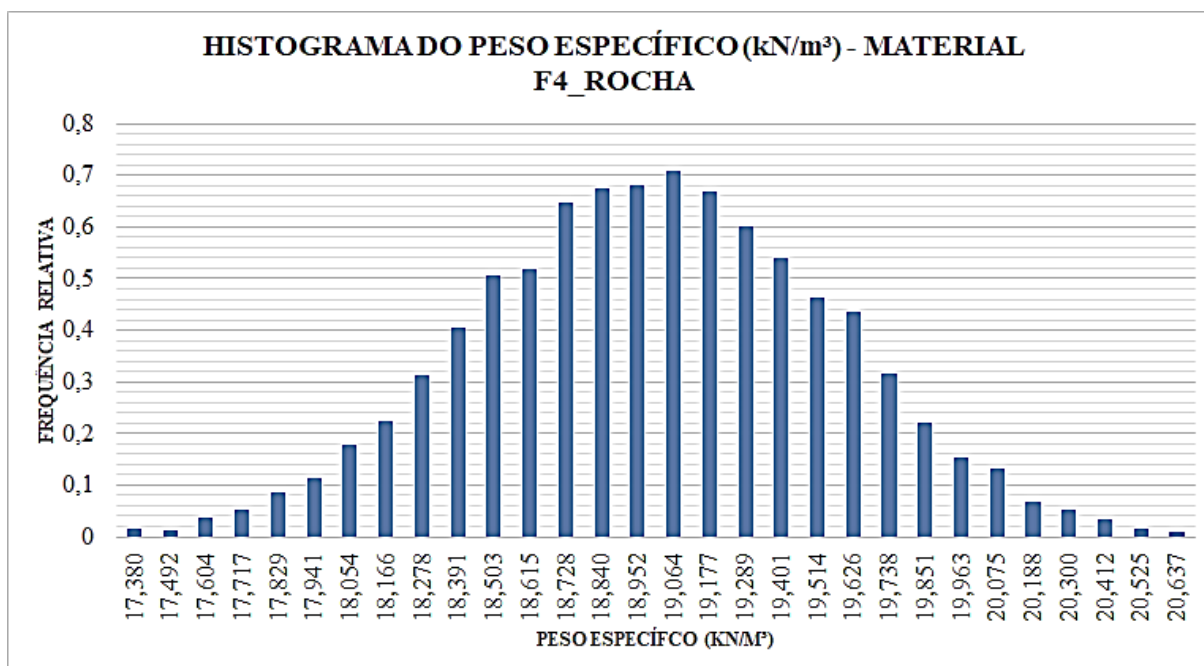
**FIGURA B.2.6** – Distribuição de frequência do peso específico: material Z3\_ENR\_GW



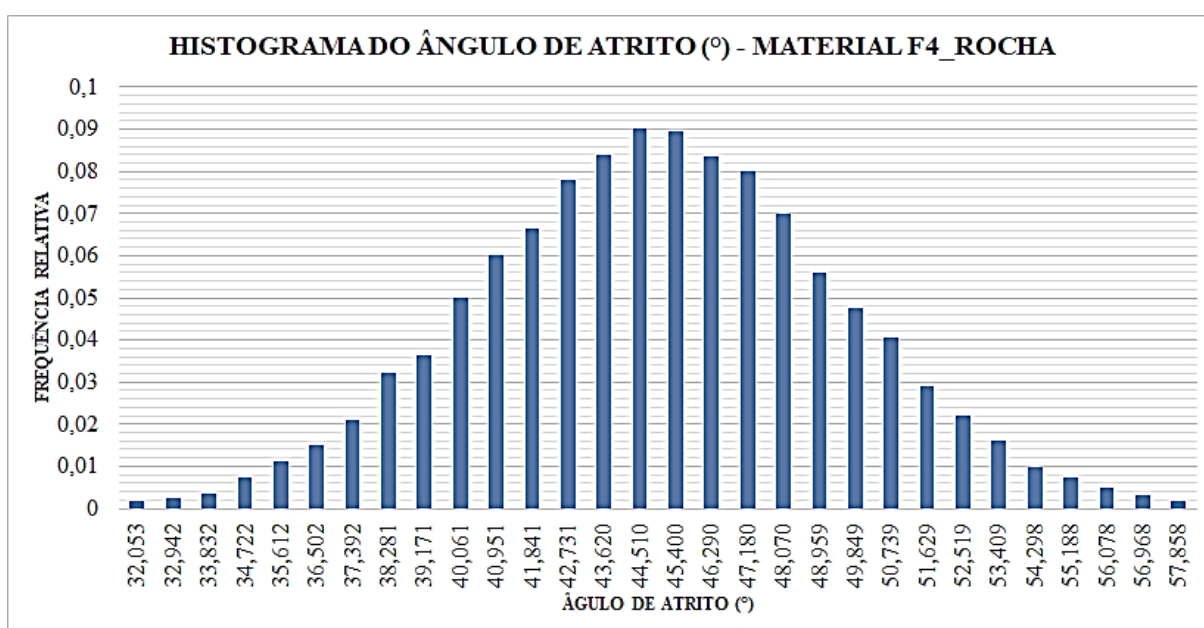
**FIGURA B.2.7** – Distribuição de frequência do ângulo de atrito: material Z3\_ENR\_GW



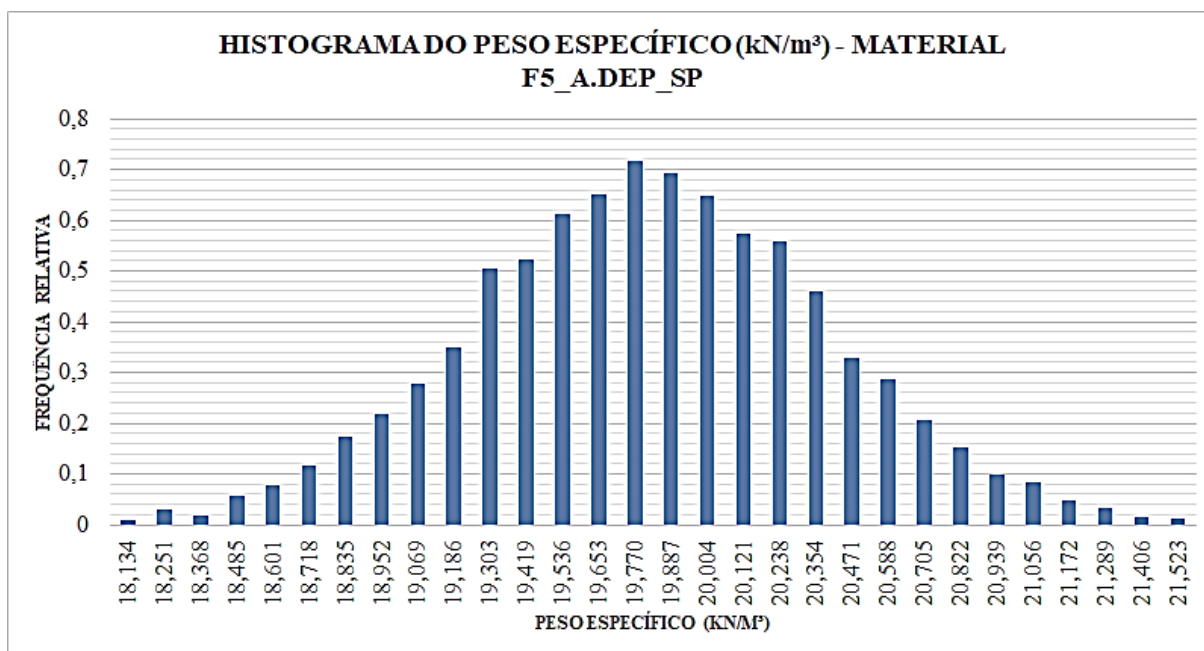
**FIGURA B.2.8 – Distribuição de frequência do peso específico: material F4\_ROCHA**



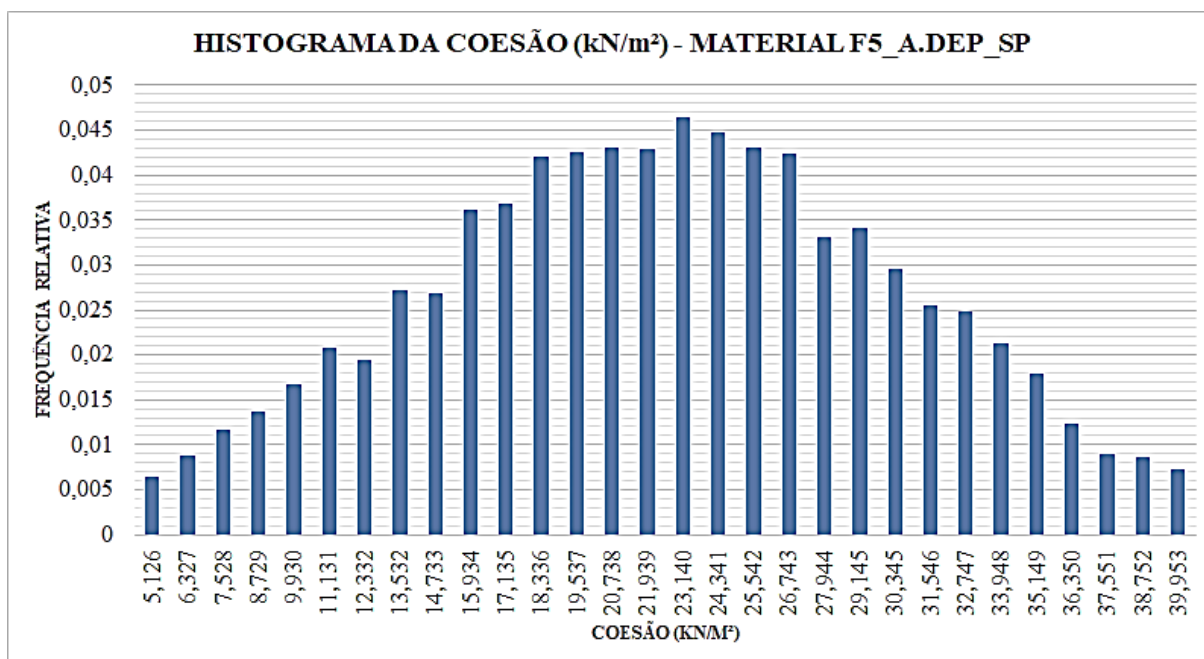
**FIGURA B.2.9 – Distribuição de frequência do ângulo de atrito: material F4\_ROCHA**

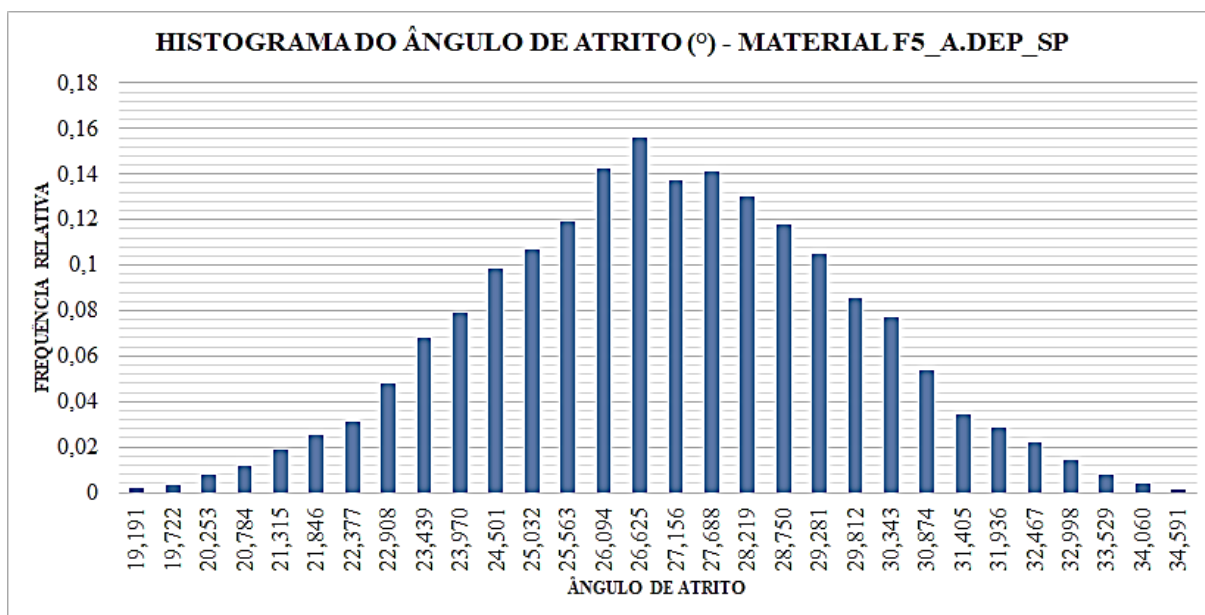


**FIGURA B.2.10 – Distribuição de frequência do peso específico: material F4\_A.DEP\_SP**

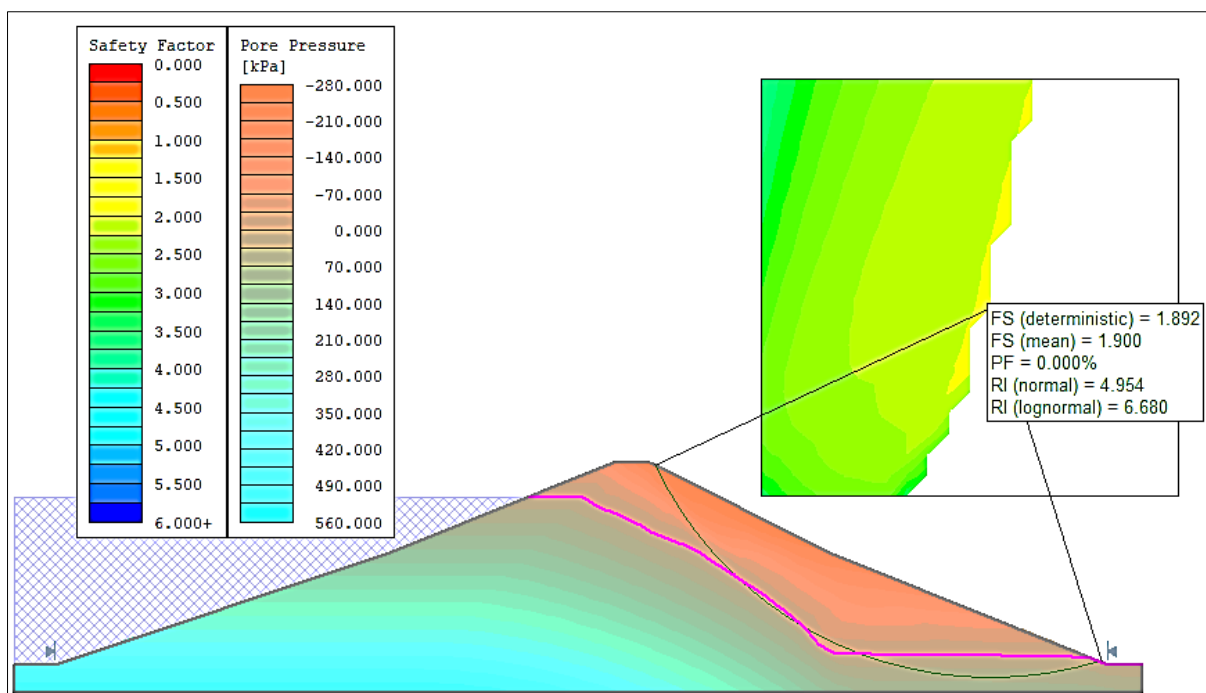


**FIGURA B.2.11 – Distribuição de frequência da coesão: material F5\_A.DEP\_SP**

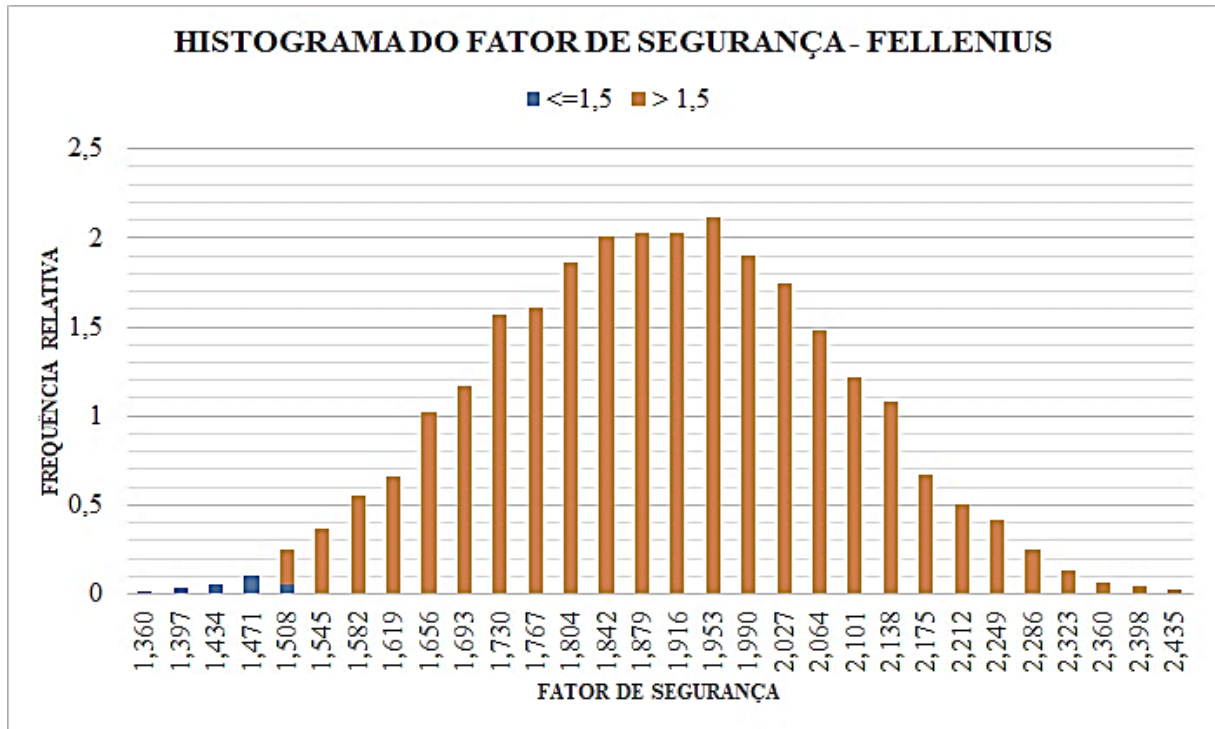


**FIGURA B.2.12** – Distribuição de frequência do ângulo de atrito: material F5\_A.DEP\_SP

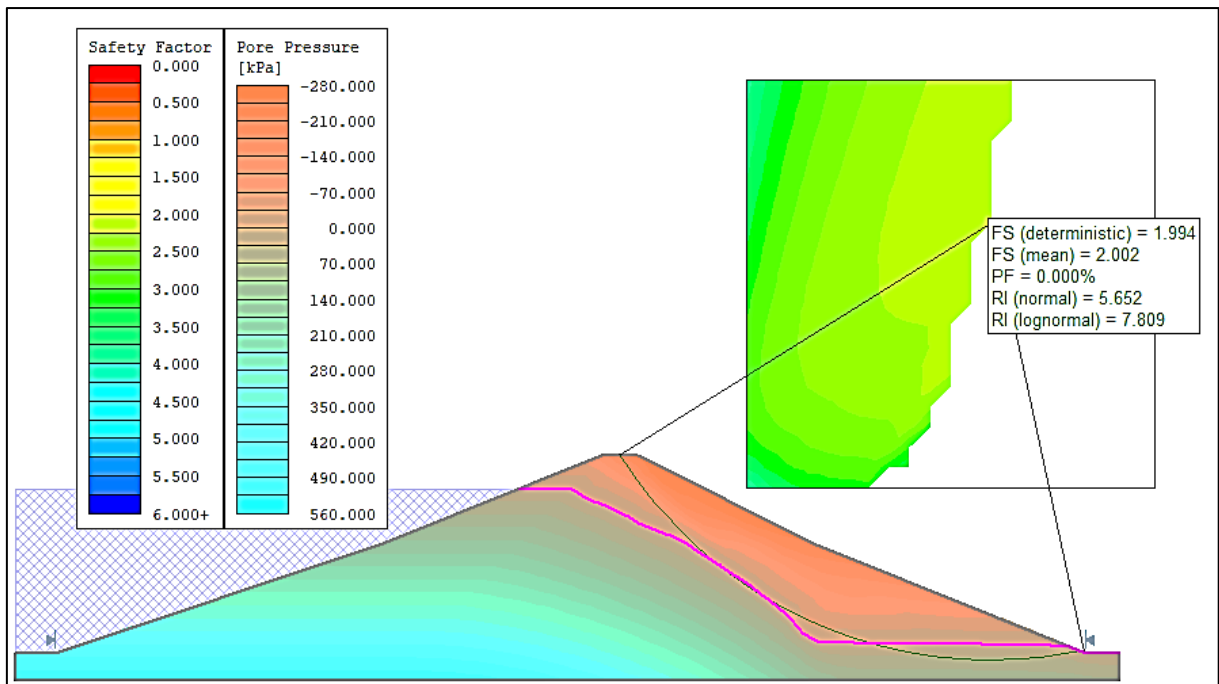
### B.3. RESERVATÓRIO CHEIO: SUPERFÍCIES DE RUPTURA E HISTOGRAMAS DE FATOR DE SEGURANÇA

**FIGURA B.3.1** – Barragem Orós: Superfície de ruptura para o método de Método de Fellenius (reservatório cheio)

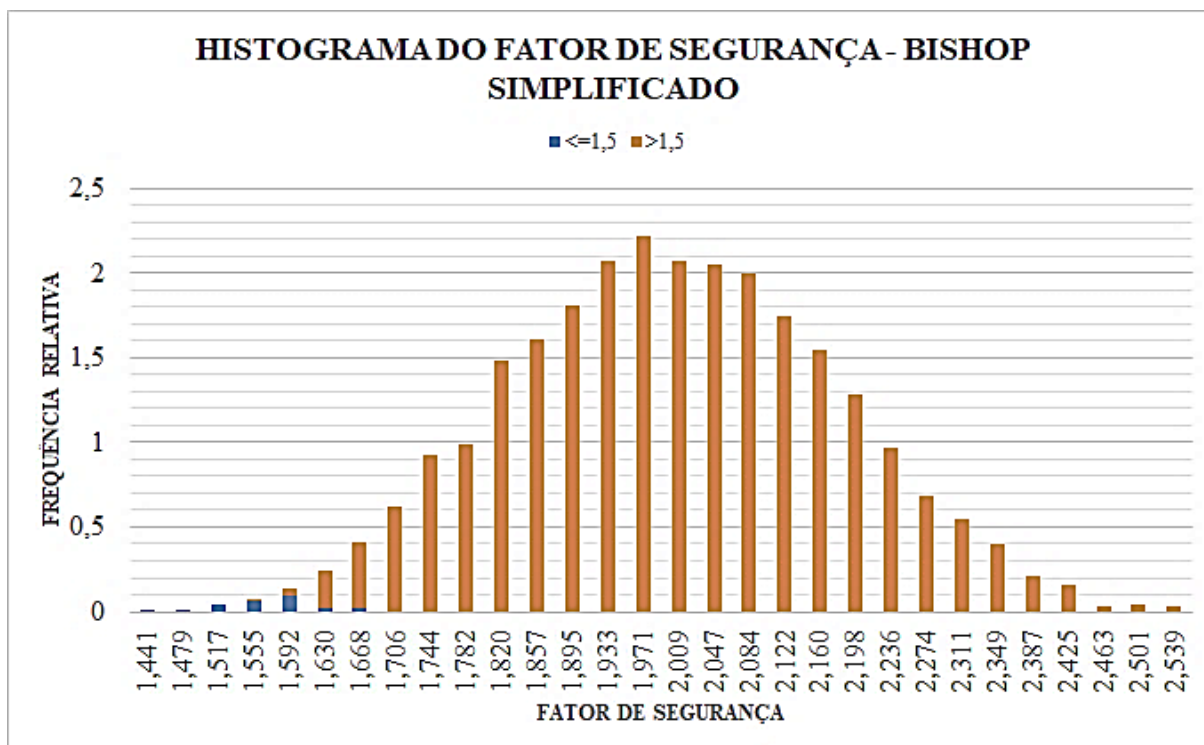
**FIGURA B.3.2** – Barragem Orós: histograma do Fator de Segurança para o método de Método de Fellenius (reservatório cheio)



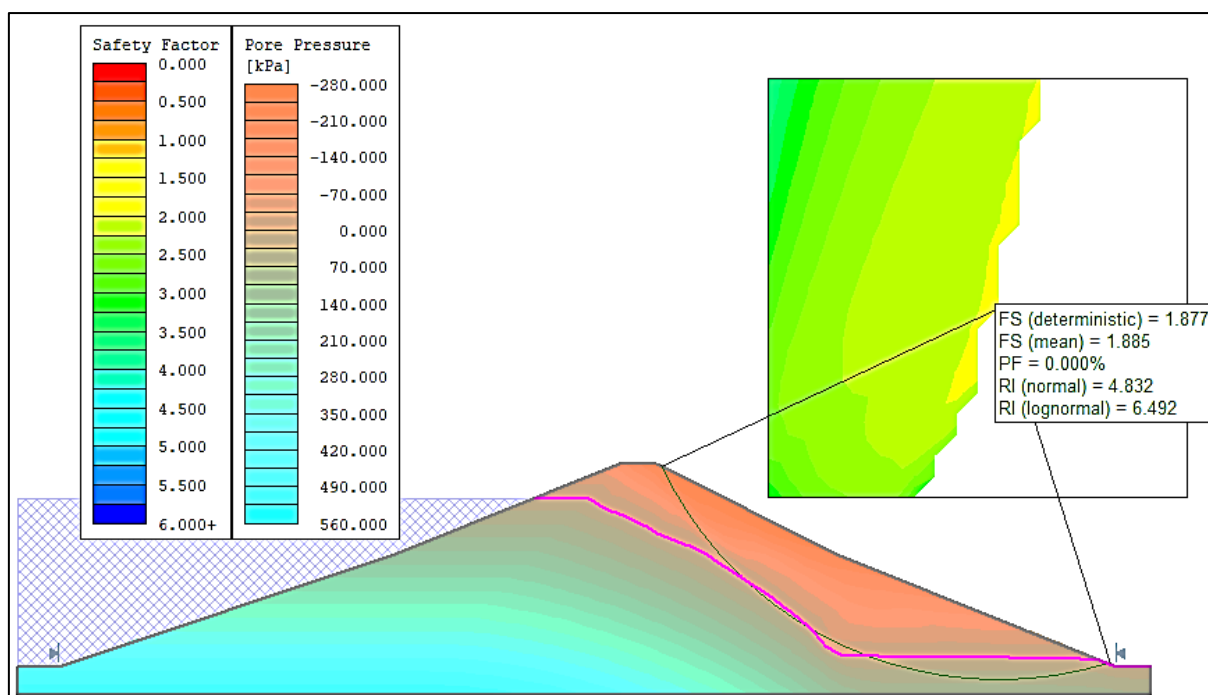
**FIGURA B.3.3** – Barragem Orós: superfície de ruptura para o método de Bishop Simplificado (reservatório cheio)



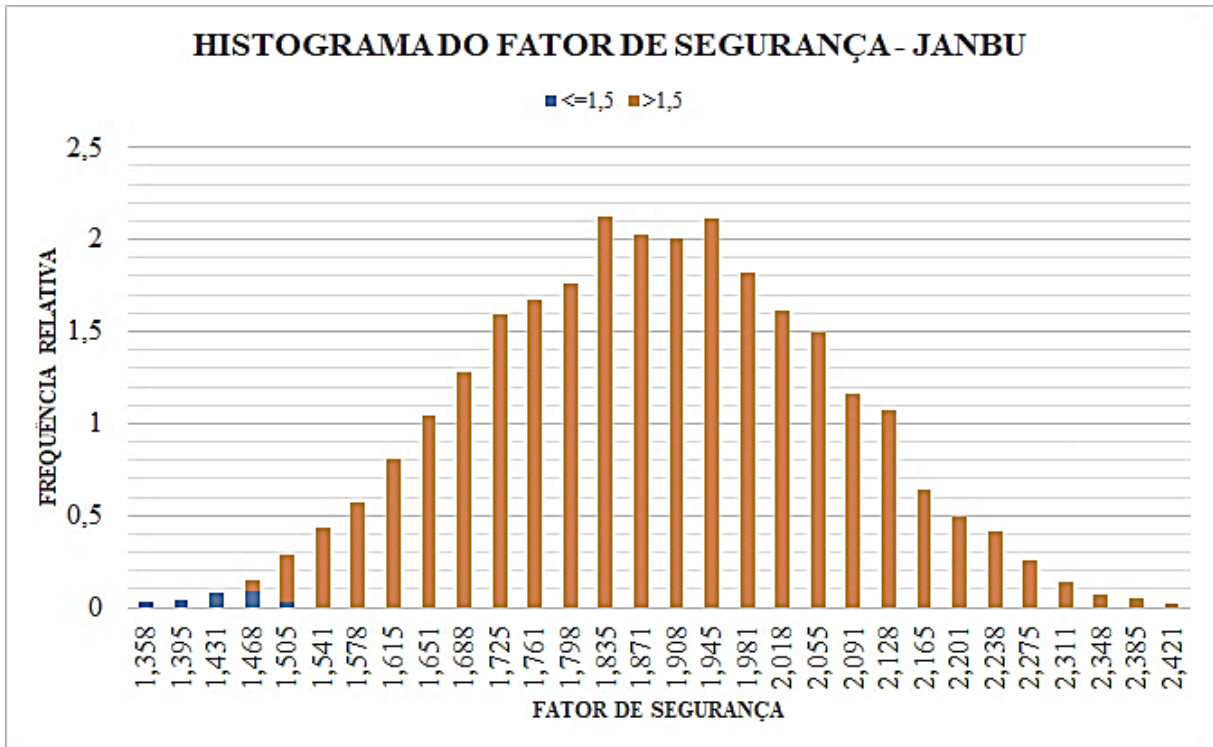
**Figura B.3.4** – Barragem Orós: histograma do fator de segurança para o método de método de bishop simplificado (reservatório cheio)



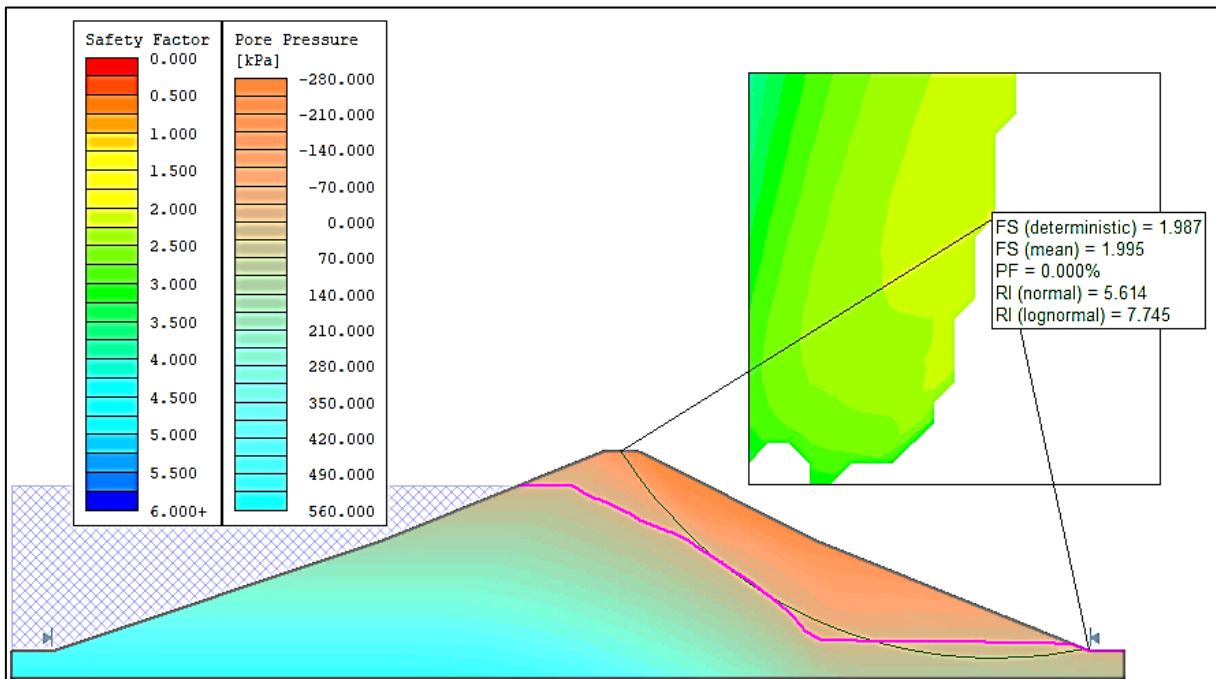
**Figura B.3.5** – Barragem Orós: superfície de ruptura para o método de Janbu (reservatório cheio)



**FIGURA B.3.6 – Barragem Orós: histograma do Fator de Segurança para o método de Janbu (reservatório cheio)**

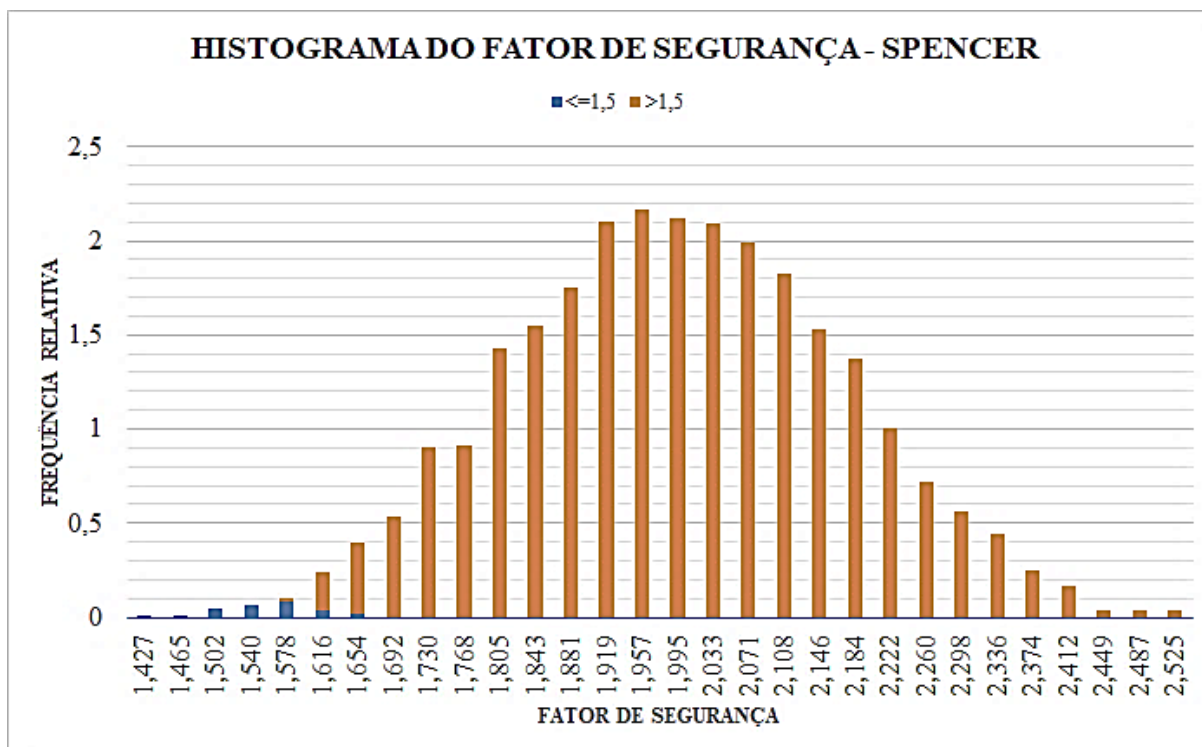


**FIGURA B.3.7 – Barragem Orós: superfície de ruptura para o método de Spencer (reservatório cheio)**



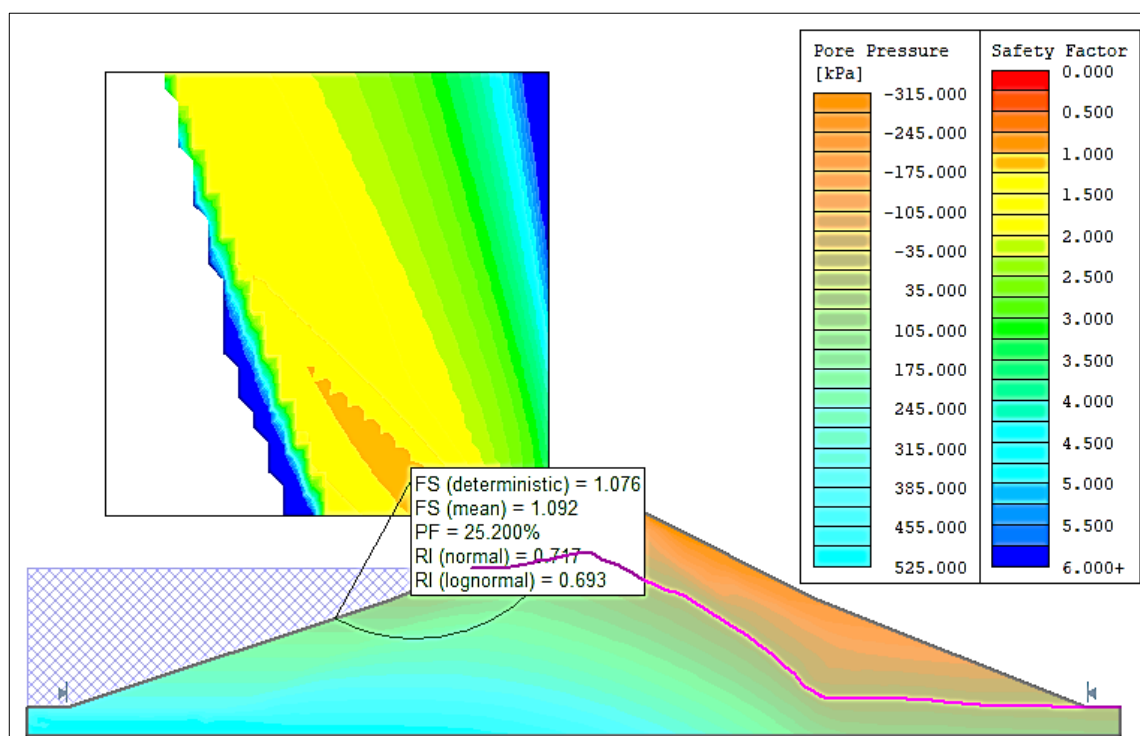


**FIGURA B.3.8** – Barragem Orós: histograma do Fator de Segurança para o método de Spencer (reservatório cheio)



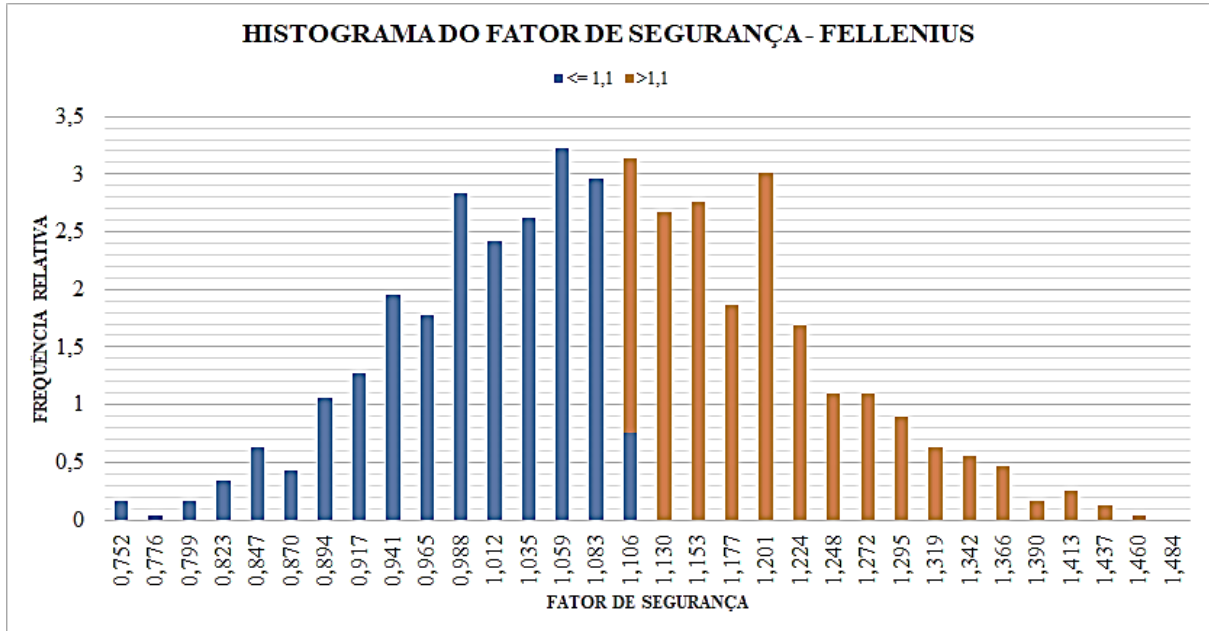
#### B.4. REBAIXAMENTO RÁPIDO: SUPERFÍCIES DE RUPTURA E HISTOGRAMAS DE FATOR DE SEGURANÇA

**FIGURA B.4.1** – Barragem Orós: superfície de ruptura para o Método de Fellenius (rebaixamento rápido, dia 41)

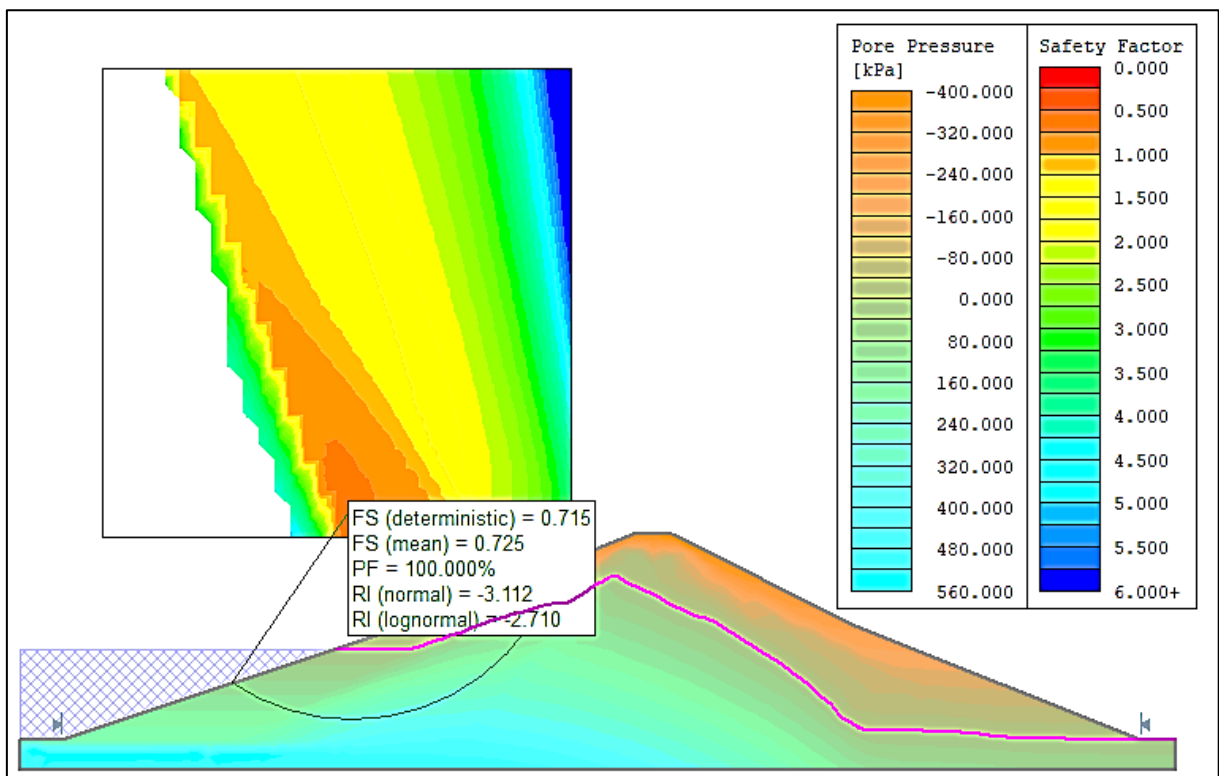




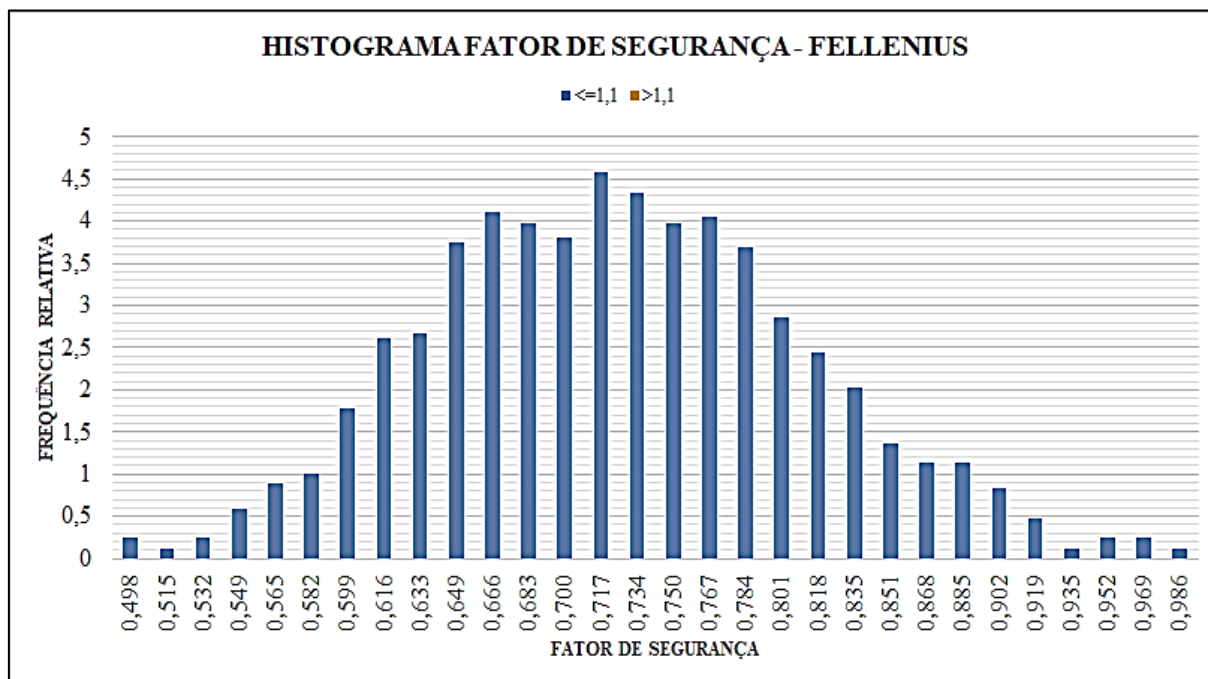
**FIGURA B.4.2 – Barragem Orós: histograma do Fator de Segurança para o Método de Fellenius (rebaixamento rápido, dia 41)**



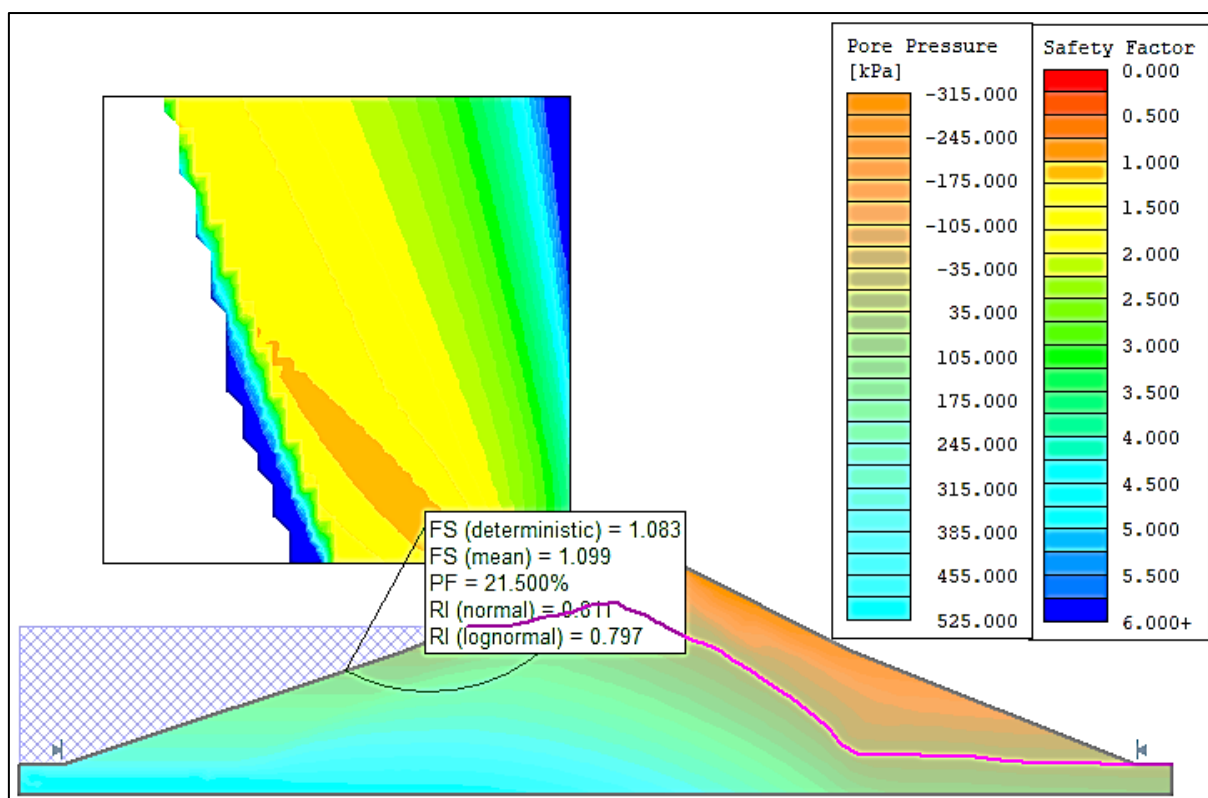
**FIGURA B.4.3 – Barragem Orós: superfície de ruptura para o Método de Fellenius (rebaixamento rápido, PF=100%)**



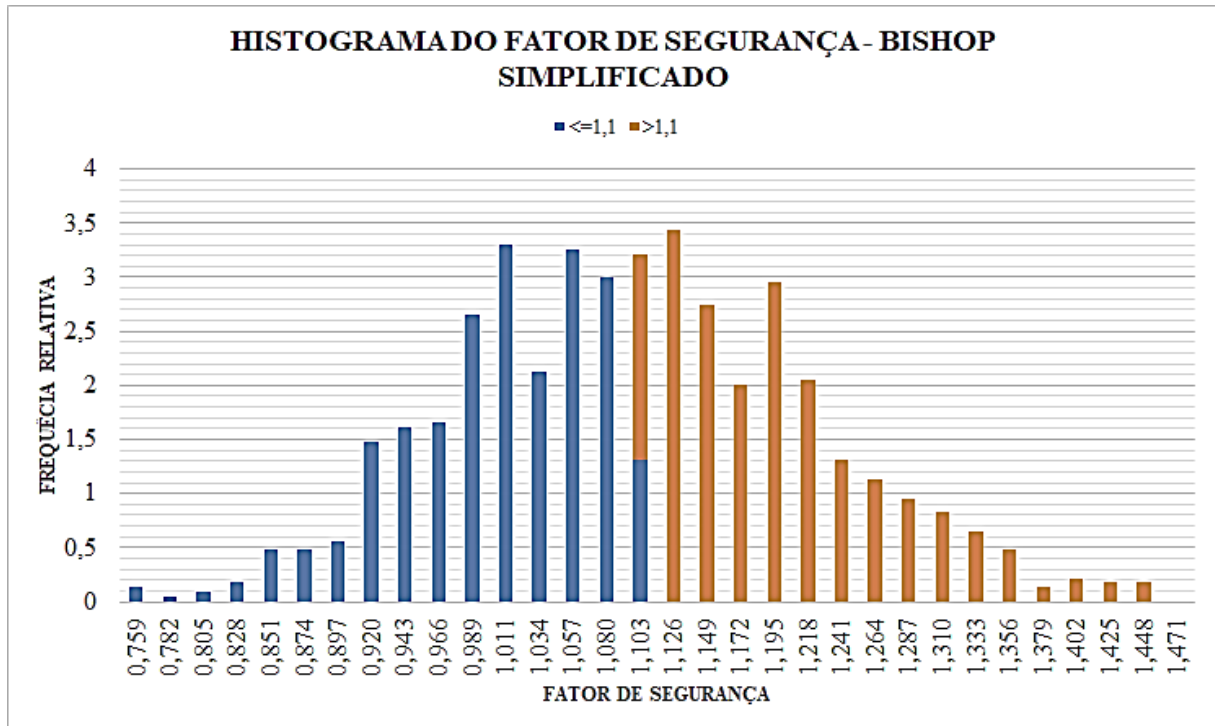
**FIGURA B.4.4** – Barragem Orós: histograma do Fator de Segurança para o Método de Fellenius (rebaixamento rápido, PF=100%)



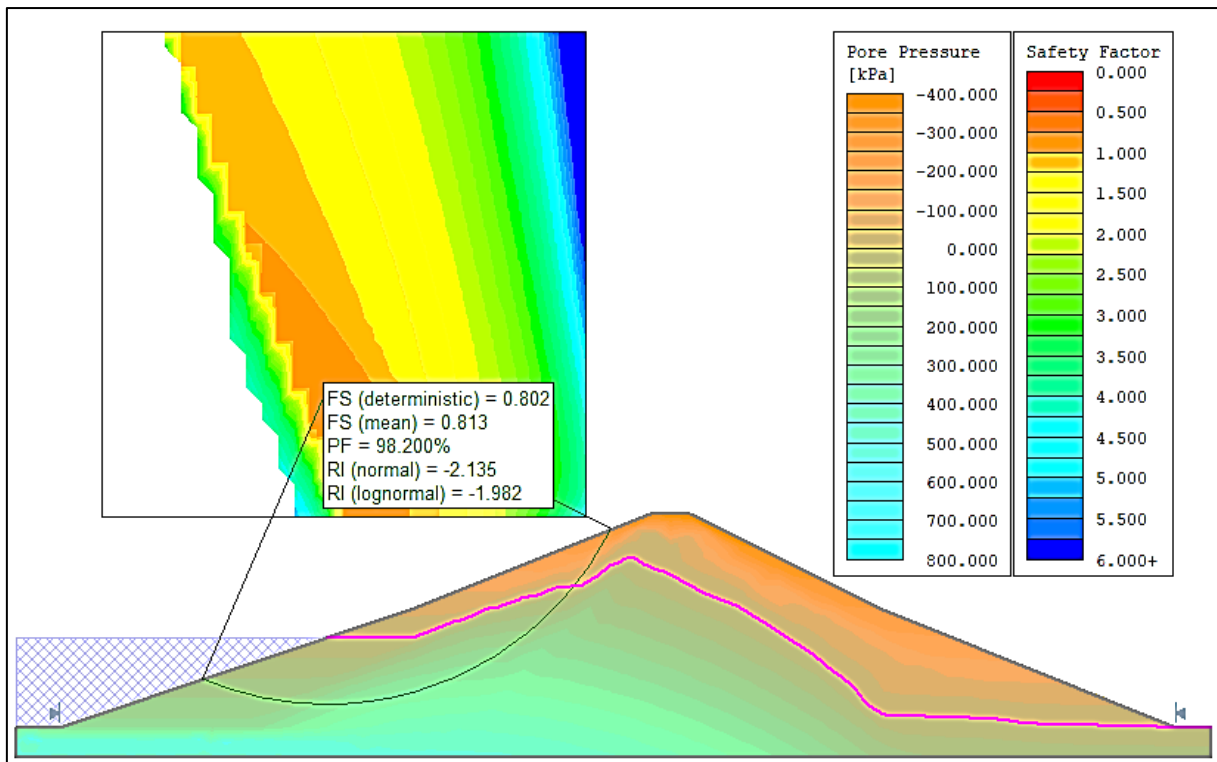
**FIGURA B.4.5** – Barragem Orós: superfície de ruptura para o Método de Bishop Simplificado (rebaixamento rápido, dia 56)



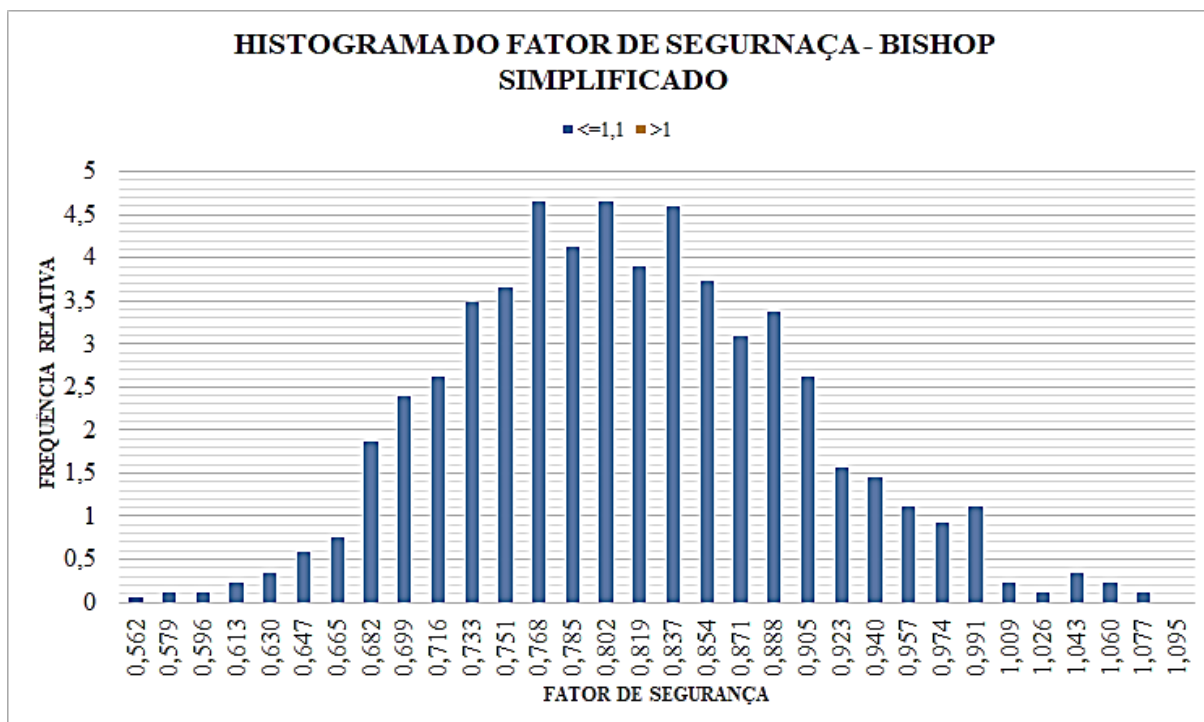
**FIGURA B.4.6** – Barragem Orós: histograma do Fator de Segurança para o Método de Bishop Simplificado (rebaixamento rápido, dia 56)



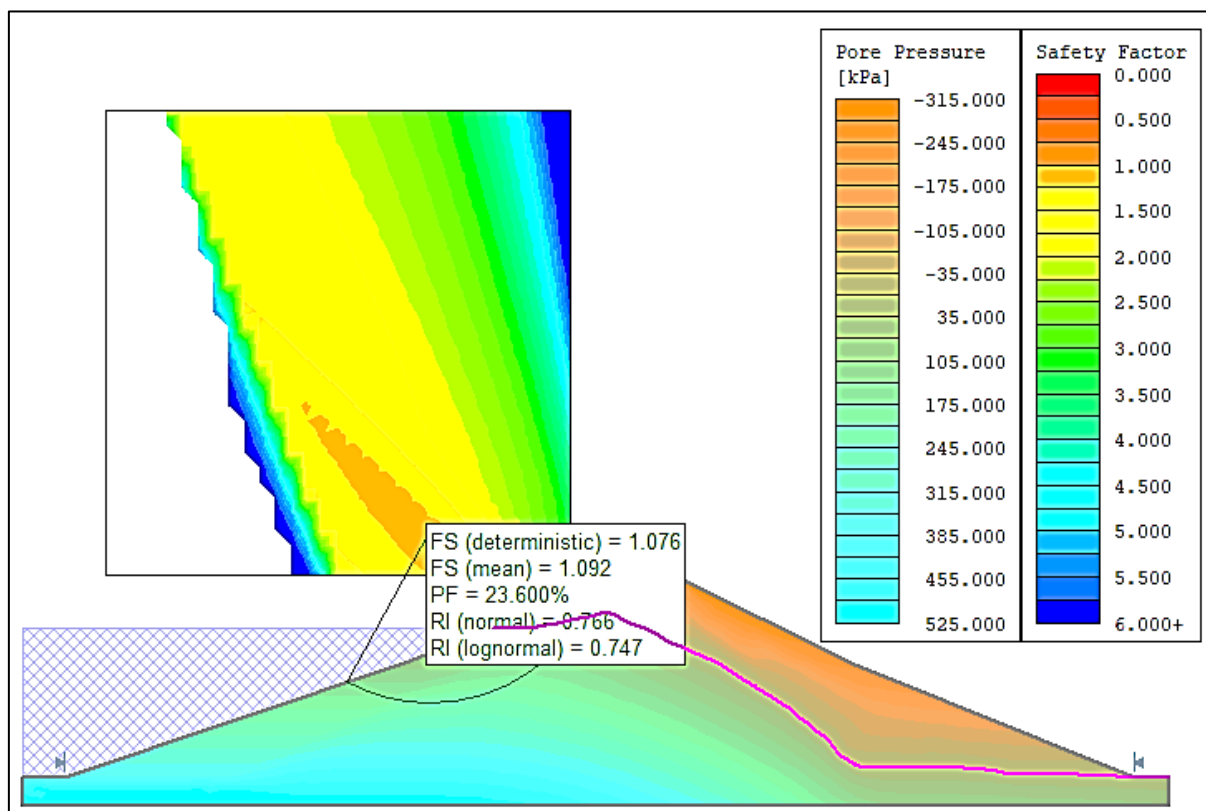
**FIGURA B.4.7** – Barragem Orós: superfície de ruptura para o Método de Bishop Simplificado (rebaixamento rápido, PF=98,20%)



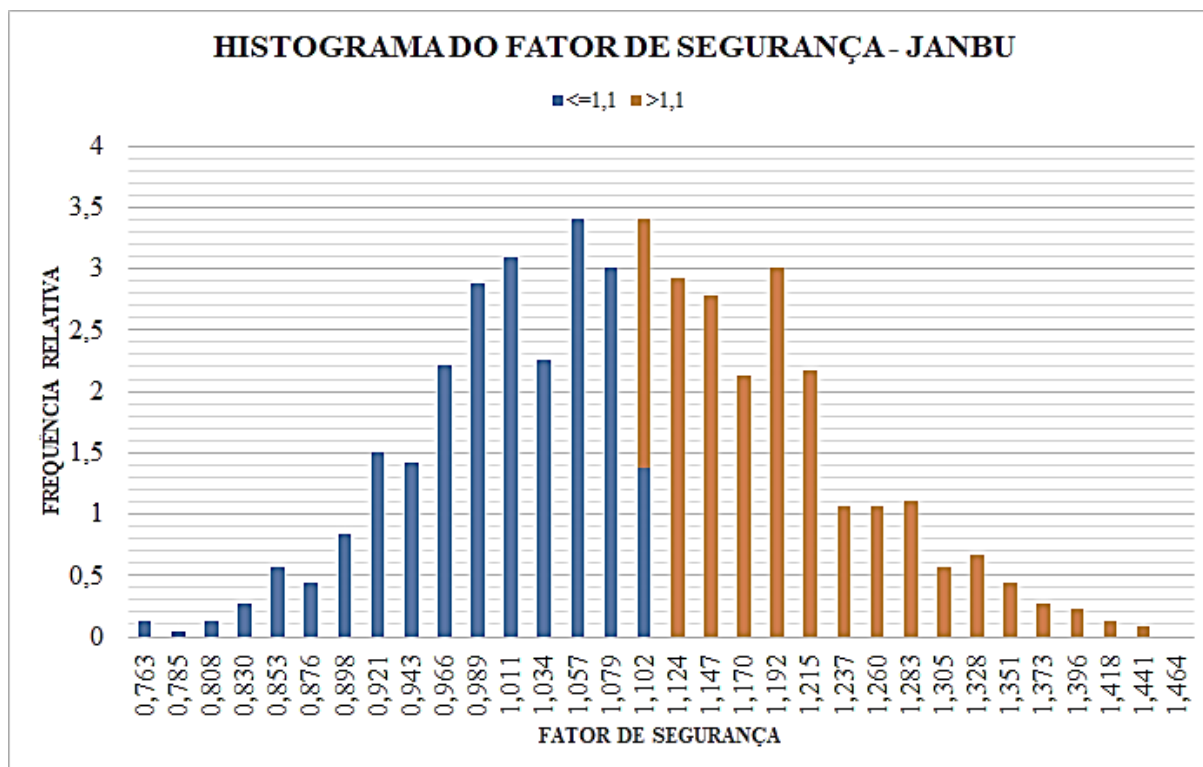
**FIGURA B.4.8** – Barragem Orós: histograma do fator de segurança para o Método de Bishop Simplificado (rebaixamento rápido, PF=98,2%)



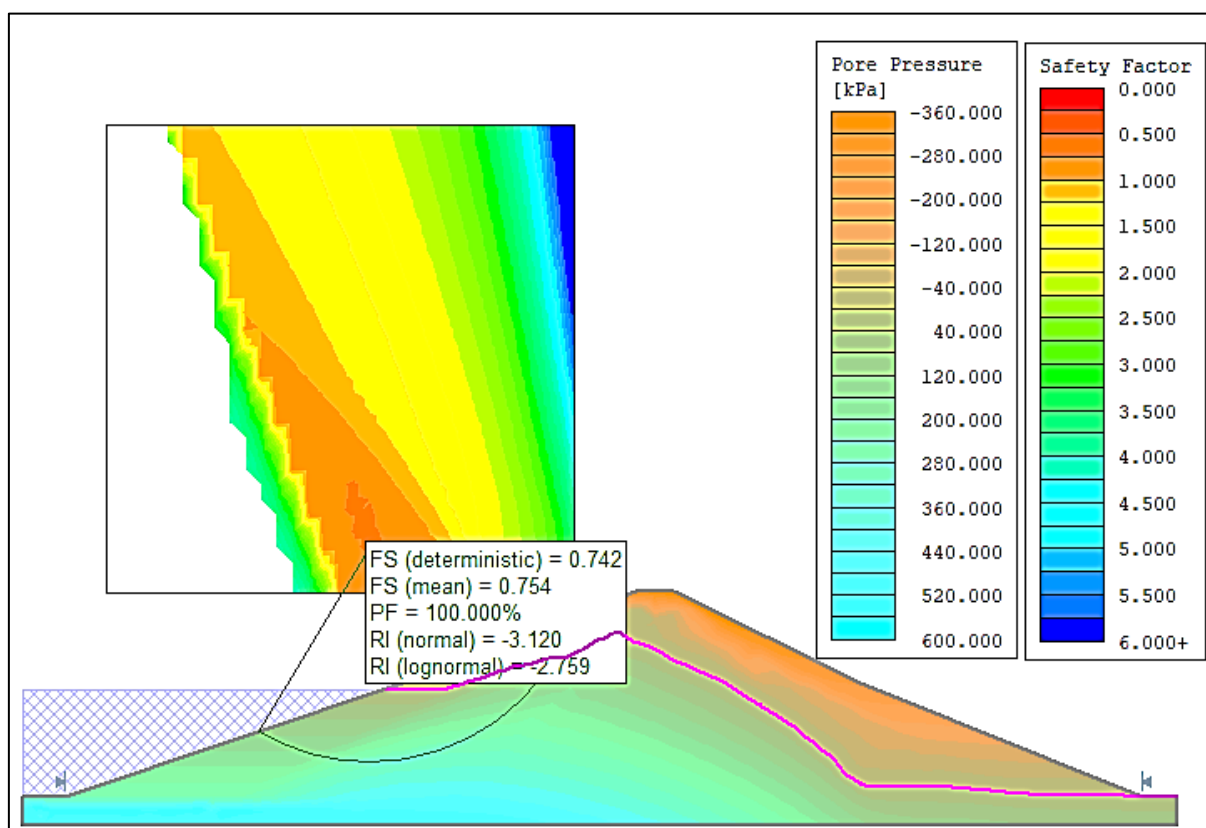
**FIGURA B.4.9** – Barragem Orós: superfície de ruptura para o Método de Janbu (rebaixamento rápido, dia 38)



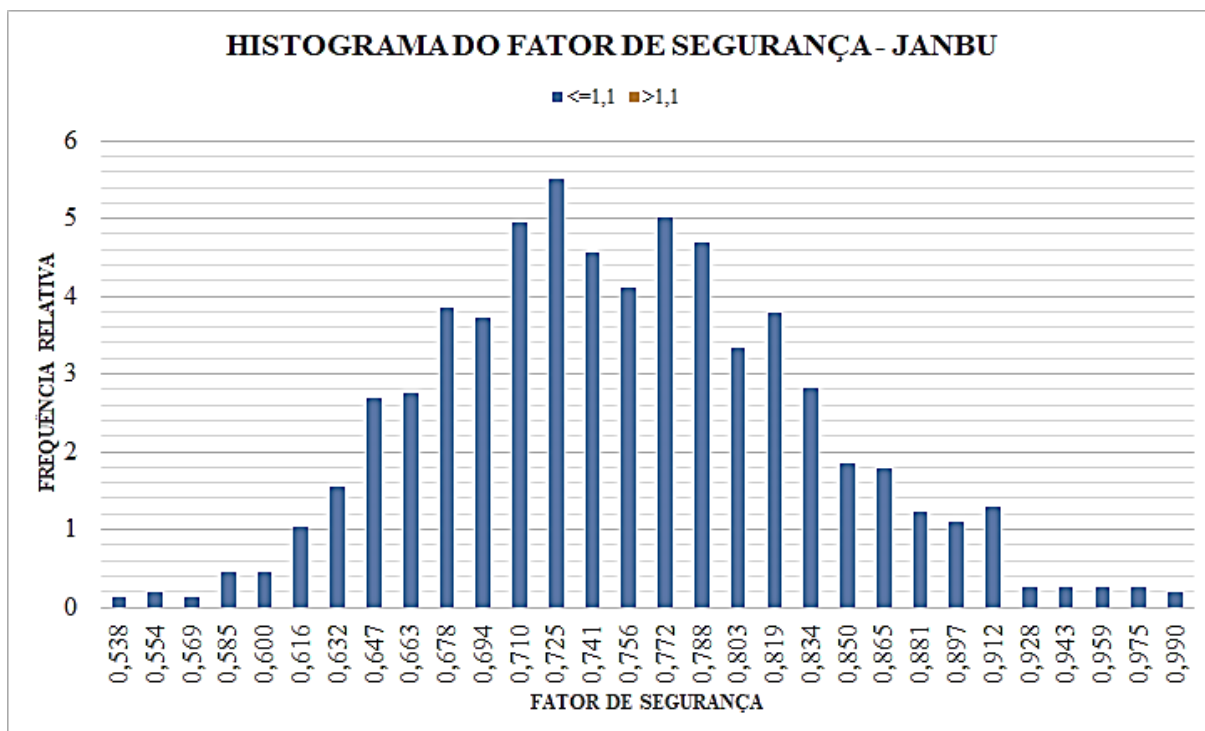
**FIGURA B.4.10** – Barragem Orós: histograma do Fator de Segurança para o Método de Janbu (rebaixamento rápido, dia 38)



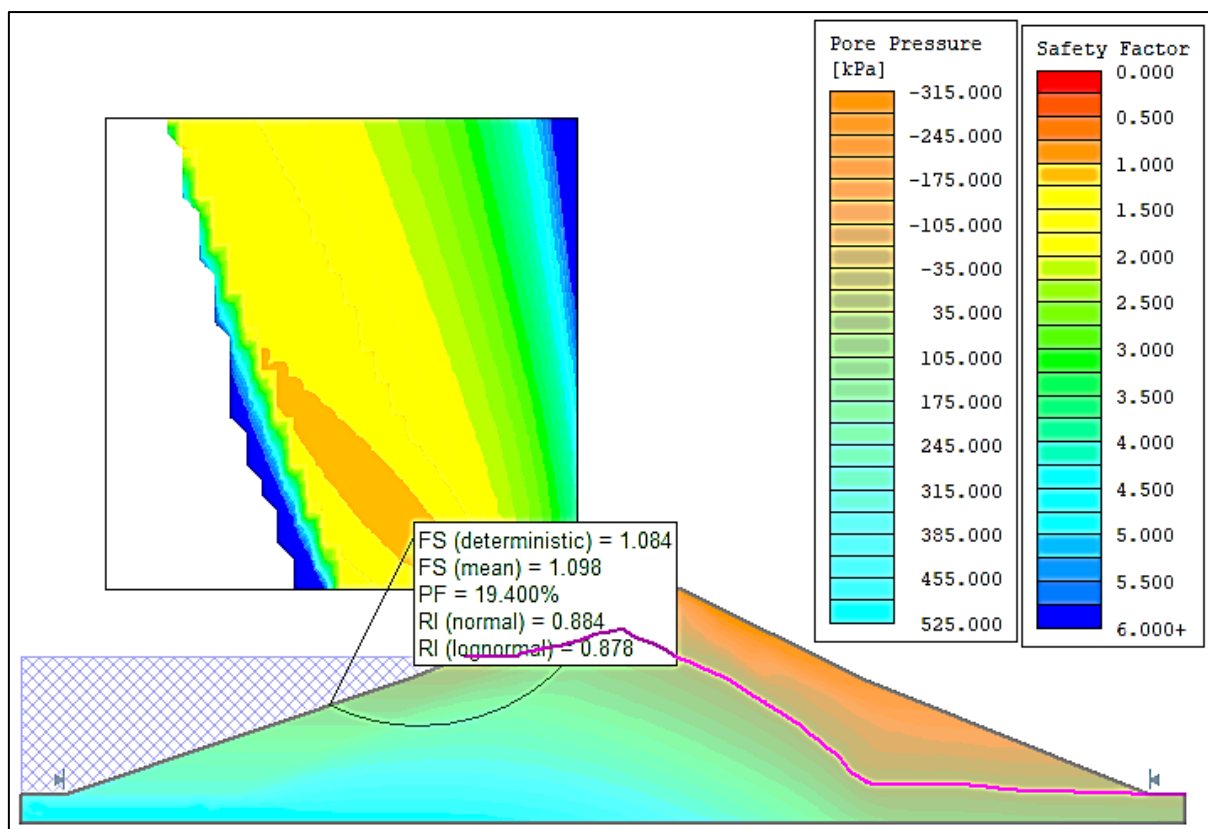
**FIGURA B.4.11** – Barragem Orós: superfície de ruptura para o Método de Janbu (rebaixamento rápido, PF=100%)



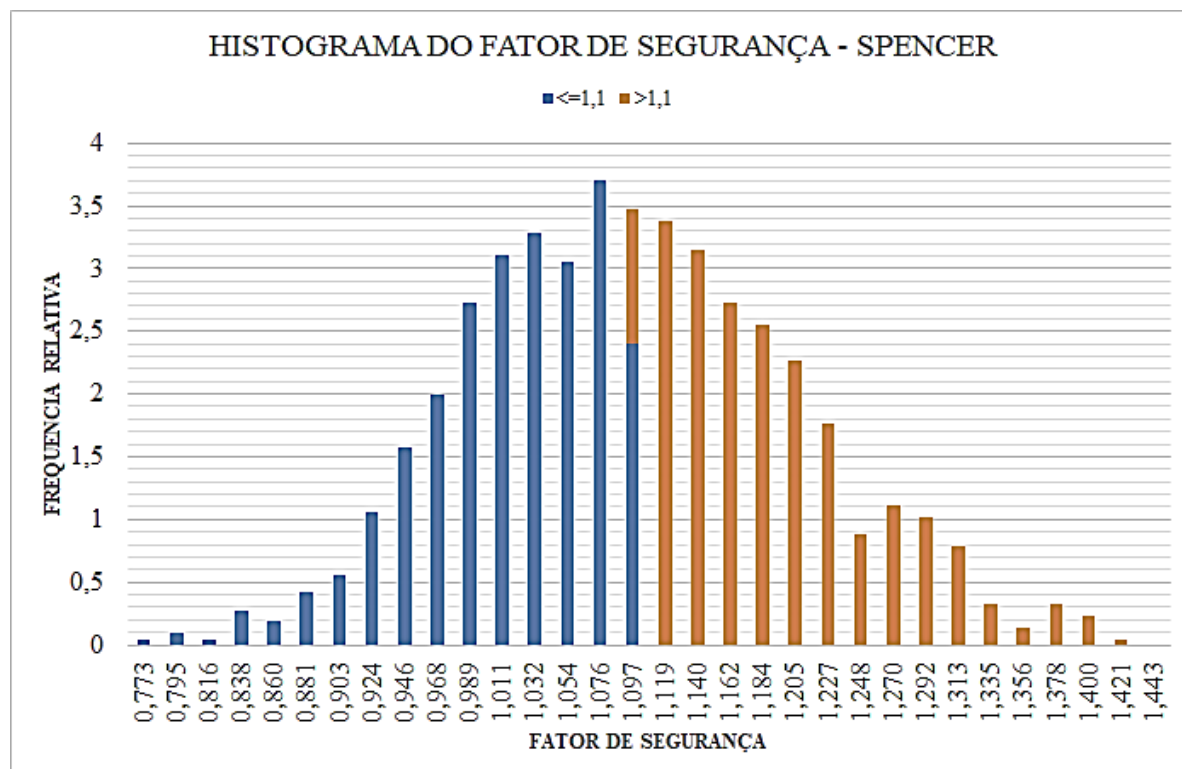
**FIGURA B.4.12** – Barragem Orós: histograma do Fator de Segurança para o Método de Janbu (rebaixamento rápido, PF=100%)



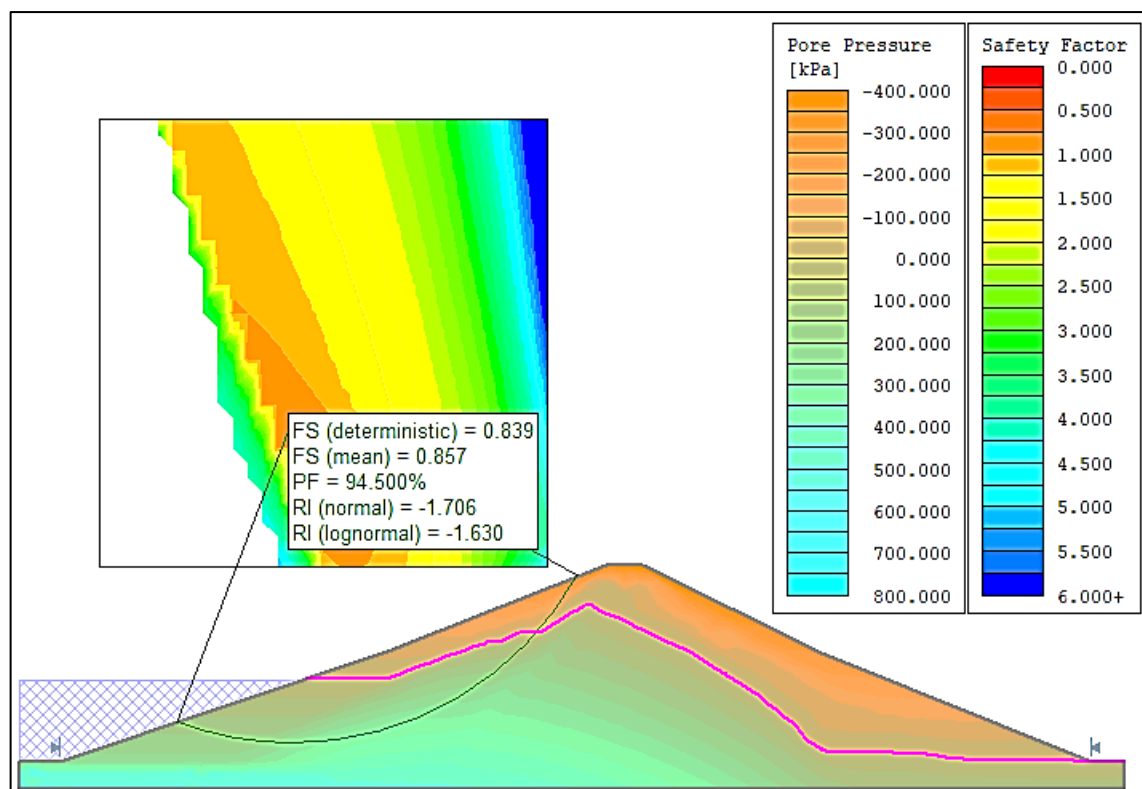
**FIGURA B.4.13** – Barragem Orós: superfície de ruptura para o Método de Spencer (rebaixamento rápido, dia 62)



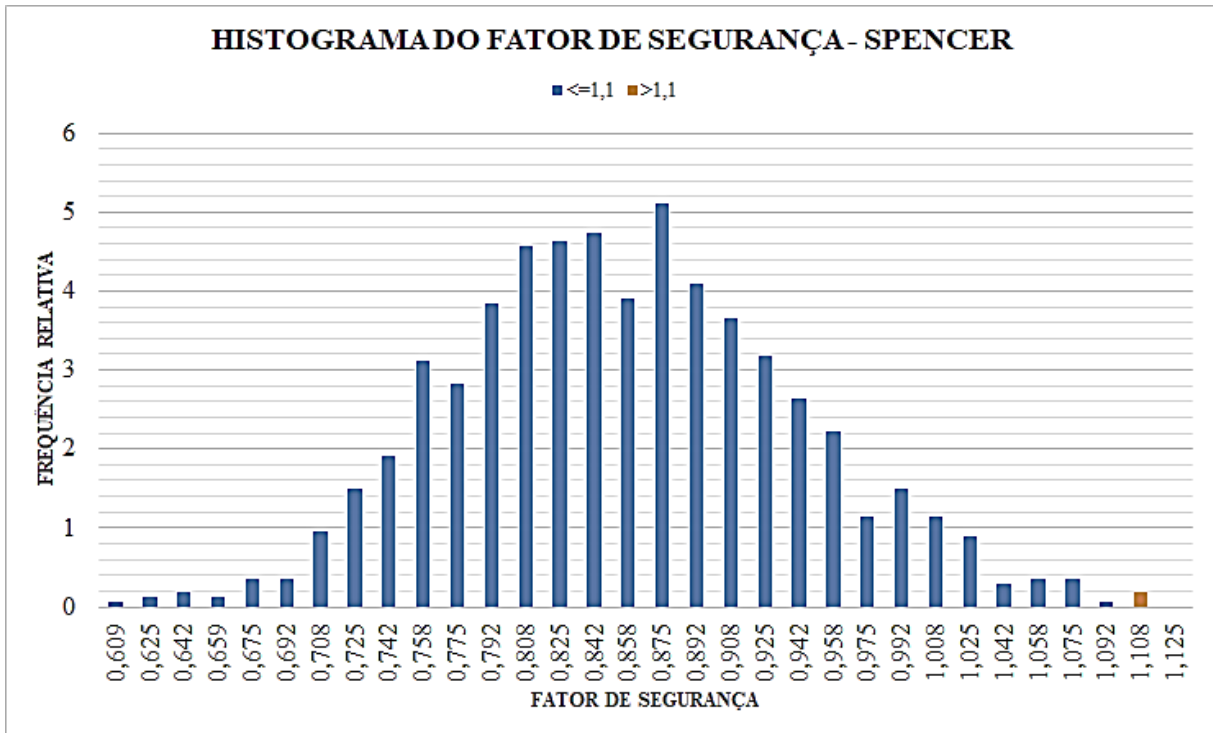
**FIGURA B.4.14** – Barragem Orós: histograma do Fator de Segurança para o Método de Spencer (rebaixamento rápido, dia 62)



**FIGURA B.4.15** – Barragem Orós: superfície de ruptura para o Método de Spencer (rebaixamento rápido, PF=94,50%)



**FIGURA B.4.16** – Barragem Orós: histograma do Fator de Segurança para o Método de Spencer (rebaixamento rápido, PF=94,50%)





## ANEXO A – TABELA DE PROPRIEDADES MÉDIAS DOS SOLOS

Classificação USC	Propriedades Médias dos Solos										
	Compactação		Índices de Vazios	Coeficiente de Permeabilidade (10-6 cm/s)	Compressibilidade		Resistência ao Cisalhamento				
	g sm (g/cm <sup>3</sup> )	h <sub>ot</sub> (%)			1,4 kg/cm <sup>2</sup> (% Vol.)	3,5 kg/cm <sup>2</sup> (% Vol.)	C (kg/cm <sup>2</sup> )	C <sub>SAT</sub> (kg/cm <sup>2</sup> )	tg q		
GW	> 1,90	< 13,3	(*)	27000 ± 13000	< 1,4	(*)	(*)	(*)	(*)	> 0,79	
GP	> 1,76	< 12,4	(*)	64000 ± 34000	< 0,8	(*)	(*)	(*)	(*)	> 0,74	
GM	> 1,82	< 14,5	(*)	> 0,3	< 1,2	< 3,0	(*)	(*)	(*)	> 0,67	
GC	> 1,84	< 14,7	(*)	> 0,3	< 1,2	< 2,4	(*)	(*)	(*)	> 0,60	
SW	1,9 ± 0,08	13,3 ± 2,5	0,37 ± (*)	(*)	1,4 ± (*)	(*)	0,40 ± 0,04	(*)	0,79 ± 0,02		
SP	1,76 ± 0,03	12,4 ± 1,0	0,5 ± 0,03	> 15,0	0,8 ± 0,3	(*)	0,23 ± 0,06	(*)	0,74 ± 0,02		
SM	1,82 ± 0,02	14,5 ± 0,4	0,48 ± 0,02	7,5 ± 4,8	1,2 ± 0,1	3,0 ± 0,4	0,52 ± 0,06	0,2 ± 0,07	0,67 ± 0,02		
SM-SC	1,90 ± 0,02	12,8 ± 0,5	0,41 ± 0,02	0,8 ± 0,6	1,4 ± 1,0	2,9 ± 1,0	0,51 ± 0,22	0,15 ± 0,06	0,66 ± 0,07		
SC	1,84 ± 0,02	14,6 ± 0,5	0,48 ± 0,01	0,3 ± 0,2	1,2 ± 0,2	2,4 ± 0,5	0,76 ± 0,15	0,11 ± 0,06	0,60 ± 0,07		
ML	1,65 ± 0,02	19,2 ± 0,7	0,63 ± 0,02	0,59 ± 0,02	1,5 ± 0,2	2,6 ± 0,3	0,68 ± 0,10	0,09 ± (*)	0,62 ± 0,04		
ML-SC	1,74 ± 0,03	16,8 ± 0,7	0,54 ± 0,03	0,13 ± 0,07	1,0 ± 0,2	2,2 ± 0,0	0,64 ± 0,17	0,22 ± (*)	0,62 ± 0,06		
CL	1,73 ± 0,02	17,3 ± 0,3	0,56 ± 0,01	0,08 ± 0,03	1,4 ± 0,2	2,6 ± 0,4	0,88 ± 0,10	0,13 ± 0,02	0,54 ± 0,04		
MH	1,31 ± 0,06	36,3 ± 3,2	1,15 ± 0,12	0,16 ± 0,10	2,0 ± 1,2	3,8 ± 0,8	0,73 ± 0,30	0,20 ± 0,09	0,47 ± 0,05		
CH	1,50 ± 0,03	25,5 ± 1,2	0,80 ± 0,04	0,05 ± 0,05	2,6 ± 1,5	3,9 ± 1,5	1,04 ± 0,34	0,11 ± 0,06	0,35 ± 0,09		

Fonte: Vieira *et al* (1996)